

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Міністерство освіти і науки України

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МЕЛЕШКО ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 656.259.12:629.423.31

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ В
УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НОВИХ ТИПІВ РУХОМОГО СКЛАДУ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Галузь знань 27–Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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



В .В. Мелешко

Науковий керівник: Гаврилюк Володимир Ілліч,
доктор фізико-математичних наук, професор

Дніпро – 2020

АНОТАЦІЯ

Мелешко В. В. Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту.– Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна МОН України, Дніпро, 2020.

У дисертаційній роботі проведено дослідження електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола і розроблено методи підвищення функціональної безпеки рейкових кіл.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-практичного завдання підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності.

Вперше:

- розроблено математичну модель поширення електричних завад від декількох одиниць ЕРС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії, яка дозволяє визначити ступінь впливу завад на рейкові кола;

- розроблено метод підвищення функціональної безпеки рейкових кіл, заснований на використанні вейвлет-аналізу сигнального струму і класифікатора на основі штучних нейронних мереж, що дозволяє своєчасно виявити появу над-нормативних завад і спотворень сигнального струму і попередити небезпечні збої ТРК;

- розроблено метод підвищення функціональної безпеки ТРК шляхом моніторингу сигнального струму з використанням адаптивної нечіткої нейронної мережі, що дозволяє виявити і контролювати розвиток дефектів рейкового кола,

починаючи з їх зародження, в результаті чого стає можливим своєчасне запобігання переходу системи в граничний стан, а в подальшому можливий перехід до обслуговування ТРК з урахуванням їх фактичного стану.

Удосконалено:

- математичну модель апаратно-програмного комплексу для вимірювання електричних завад від ЕРС в рейках, яка відрізняється від існуючих тим, що враховує взаємний вплив компонентів системи, що дозволяє науково-обґрунтувати вибір параметрів комплексу для забезпечення необхідного динамічного діапазону, точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад;

- математичну модель впливу гармонійних завад на колійний приймач тонального рейкового кола, яка відрізняється від існуючих тим, що враховує амплітуду, частоту і фазу гармонік тягового струму, що дозволяє визначити граничні параметри електричних завад, перевищення яких може викликати збій в роботі РК в нормальному, шунтовому і контрольному режимах роботи.

Обґрунтованість та достовірність результатів, отриманих у дисертації, підтверджується системним підходом до вирішення поставленої задачі, коректним використанням сучасного математичного апарату, відсутністю протиріч з основними положеннями теорії електричних кіл, а також збігом отриманих результатів з даними експериментальних досліджень.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблено програму та методику контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також таблиці зі значенням граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації прийнято до використання у дистанції сигналізації та зв'язку, що підтверджується відповідним актом.

Математична модель та метод контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також таблиці зі значеннями граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та

автоматичної локомотивної сигналізації використовуються при викладанні дисципліни "Цифрова обробка сигналів в системах залізничної автоматики"; метод моніторингу сигнального струму тональних рейкових кіл з використанням класифікатора на основі штучних нейронних мереж використовується при викладанні дисципліни "Технічні специфікації інтероперабельності для контрольно-управляючих систем. Європейська система управління залізничними перевезеннями (ERTMS)". Також результати дисертаційної роботи використовуються при виконанні дипломних магістерських робіт спеціальностей 151 "Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології" та 273 "Залізничний транспорт" (ОПП "Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті (за міжнародною програмою TEMPUS)"), що підтверджується відповідними актами.

Відповідно до теми дисертації опубліковано 32 наукових праць, з яких чотирнадцять статей опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, які включені до міжнародних наукометричних баз, та шістьнадцять праць апробаційного характеру, три додаткових праці, одна з яких є патентом.

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульована мета, завдання дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення результатів дисертації, відомості про апробацію та публікації результатів досліджень.

У першому розділі проведений аналіз функціональної безпеки рейкових кіл і електромагнітної сумісності (ЕМС) систем залізничної автоматики з тяговою мережею, зокрема, з електрорухомим складом залізниць, а також розглянуто вплив електромагнітних завад від електрорухомого складу на функціональну безпеку рейкових кіл, які є основним датчиком вільності і справності колії. Відмічено, що вперше нормативний документ «Значення граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації» та методики випробування електропоїздів на ЕМС з пристроями СЦБ були розроблені в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна (науковий керівник - проф. В. І. Гаврилюк), в розробці яких автор роботи безпосере-

дньо приймав участь як виконавець. На підставі проведеного аналітичного огляду літератури в роботі сформульована мета та задачі досліджень.

У другому розділі удосконалено математичну модель апаратно програмного комплексу (АПК) для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС в рейках. Проблема раціонального вибору параметрів АПК полягає в жорстких вимогах нормативних документів щодо точності вимірювання параметрів гармонік тягового струму (ТС). Проведення раціонального вибору параметрів АПК ускладнюється великим динамічним діапазоном гармонік тягового струму (більшим ніж 90 дБ), широким діапазоном частот та протиріччями, властивими ДПФ, які обумовлюють неможливість одночасного збільшення точності визначення амплітуди гармонік і роздільної здатності в частотній області для близько розташованих гармонік, а також, неможливість одночасного досягнення високої точності локалізації гармонік в частотній і часовій області, що впливає з принципу невизначеності.

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження дозволили науково обґрунтувати вибір параметрів вимірювального комплексу, що дозволило забезпечити необхідну роздільну здатність і точність визначення параметрів гармонічних завад, а також розробити математичну модель поширення електричних завад від декількох одиниць рухомого складу в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії. Модель була реалізована у вигляді комп'ютерної програми, що дозволяє визначити необхідні параметри вимірювального комплексу для забезпечення необхідної точності і роздільної здатності спектрального аналізу. Перевірку адекватності розробленої моделі проведено шляхом порівняння результатів розрахунків з результатами вимірювання.

У третьому розділі розроблено математичну модель протікання електричних завад від ЕРС в несиметричній рейковій лінії. Необхідність в такій моделі обумовлена тим, що дослідити вплив різних чинників на ЕМС нових типів рухомого складу з рейковими колами при експлуатаційних випробуваннях практично неможливо, до того ж таке тестування є досить дорогим. Відповідно необхідність доповнення тестових випробувань дослідженням на моделі відзначено в Європей-

ському стандарті CENELEC CLC/TS 50238-2. Адекватність розробленої моделі була підтверджена шляхом порівняння результатів розрахунків коефіцієнтів асиметрії напруги в залежності від відстані до колійного трансформатора під час руху поїзду з результатами вимірювань. На основі моделювання показано, що при наближенні поїзду до дросель-трансформатора на відстань 0,85-0,5 км асиметрія напруги може збільшуватися вище 6 %.

У четвертому розділі наведено модель впливу гармонічних завад на приймач тонального рейкового кола. Адекватність моделі була експериментально перевірена шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними результатами, отриманими при реєстрації струму на вході колійного приймача при подачі на нього сигнального струму від генератора ГПУ і гармонійної завади від керованого генератора. В результаті дослідження визначено граничний струм завад на вході колійного приймача ТРК з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц відносно частоти сигнального струму, який дорівнює 0,7 мА для нормального режиму і 0,4 мА для шунтового і контрольного режимів

У п'ятому розділі розглянуто методи підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад. Концепція функціональної безпеки сучасних систем СЦБ базується на своєчасному виявленні збою або відмови системи і їх усуненню або переводу системи у безпечний стан. Тому розробка і наукове обґрунтування методів і засобів автоматичного моніторингу сигнального струму в рейкових колах є актуальною. В роботі запропоновано два методи вирішення цієї задачі, а саме метод моніторингу ТРК з використанням вейвлет перетворення і класифікатора на основі штучних нейронних мереж і метод безперервного моніторингу сигнального струму ТРК для виявлення спотворень на початкових стадіях їх виникнення з використанням адаптивної нечіткої нейронної мережі. Для вибору діагностичних ознак спотворень сигнального струму тональних рейкових кіл було використано дискретне вейвлет-пакетне перетворення струму, ентропію Шеннона енергії дискретного вейвлет-пакетного перетворення сигналу, а також куртозису сигналу. Для класифікації дефектів сигналу викорис-

тано тришарова штучну нейронну мережу з прямим зв'язком, з трьома вхідними вузлами, прихованим шаром, чотирма вихідними вузлами і нейронами сігмоїдної функції. На вхід нейронної мережі подавали значення діагностичних параметрів, виявлених при попередній комп'ютерній обробці сигнального струму ТРК. Нейронна мережа навчена з використанням алгоритму зворотного поширення помилок і методикою оптимізації Левенберга-Марквардта. Загальна середньоквадратична помилка навченої нейронної мережі становила 0,02310.

Використання для моніторингу спотворень сигнального струму класифікаторів з чіткими границями для вхідних діагностичних параметрів і жорсткими правилами класифікації дефектів не дозволяє виявити незначні спотворення на початковій стадії їх зародження і відслідковувати їх розвиток, щоби своєчасно спрогнозувати можливий перехід ТРК у граничний стан. Розробка методу моніторингу дефектів в процесі їх розвитку дозволяє перейти у подальшому до обслуговування рейкових кіл з урахуванням фактичного стану. У зв'язку з цим було досліджено ефективність використання адаптивної нечіткої нейронної мережі (АННМ) для виявлення спотворень сигнального струму ТРК і моніторингу їх розвитку. В якості діагностичних ознак спотворень сигналів ТРК були обрані три параметри, відхилення яких від заданих є причиною більшості збоїв в роботі ТРК згідно статистиці. Система АННМ складається з нейро-нечіткої моделі, яка працює за алгоритмом Такагі-Сугено. Проведені дослідження в цілому підтвердили адекватність адаптивної нечіткої нейронної мережі і ефективність використання запропонованого методу моніторингу зародження і розвитку дефектів сигнального струму ТРК за допомогою АННМ.

Ключові слова: залізничний транспорт, залізнична автоматика, рейкові кола, електромагнітна сумісність, функціональна безпека.

ABSTRACT

Meleshko VV Improving the functional safety of rail circuits in the conditions of operation of new types of rolling stock. - Qualifying scientific work, manuscript copyright.

The dissertation for obtaining a scientific degree of a Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), specialty 05.22.20 – operation and repair of vehicles. – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

In the dissertation work the research of electromagnetic influence of rolling stock on rail circuits is carried out and methods of increase of functional safety of rail circuits are developed.

The scientific novelty of the dissertation is to solve the scientific and practical problem of improving the functional safety of rail circuits in the operation of new types of rolling stock by ensuring their electromagnetic compatibility.

For the first time:

- developed a mathematical model of the propagation of electrical noise from several units of EMF in a longitudinally inhomogeneous asymmetric rail line, which allows to determine the degree of influence of noise on the rail circuits;

- developed a method of improving the functional safety of rail circuits, based on the use of wavelet analysis of signal current and classifier based on artificial neural networks, which allows to detect excessive noise and distortion of signal current and prevent dangerous failures of broadcasters;

- developed a method to increase the functional safety of broadcasting by monitoring the signal current using an adaptive fuzzy neural network, which allows to detect and control the development of rail circuit defects, starting from their origin, resulting in timely prevention of system transition to the limit state transition to maintenance of broadcasting stations taking into account their actual condition.

Improved:

- mathematical model of hardware and software complex for measuring electrical interference from EMF in rails, which differs from existing ones in that it takes into account the mutual influence of system components, which allows to scientifically substantiate the choice of complex parameters to ensure the required dynamic range, accuracy and resolution amplitude, frequency and duration of electrical interference;

- mathematical model of the influence of harmonic interference on the track receiver of the tonal rail circuit, which differs from the existing ones in that it takes into account the amplitude, frequency and phase of traction current harmonics, which allows to determine the limiting parameters of electrical interference, exceeding which can cause failure in normal and control modes of operation.

The validity and reliability of the results obtained in the dissertation is confirmed by a systematic approach to solving the problem, the correct use of modern mathematical apparatus, the absence of contradictions with the basic provisions of the theory of electric circuits, as well as the coincidence of experimental results.

The practical significance of the obtained results is that the program and method of control of electromagnetic interference in the rail line, as well as tables with the value of the limiting current, frequency range and nature of interference from electrical equipment of electric locomotives on the operation of rail circuits and automatic locomotive signaling in the distance of signaling and communication, which is confirmed by the relevant act.

Mathematical model and method of control of electromagnetic interference in the rail line, as well as tables with values of limiting current, frequency range and nature of interference from electrical equipment of electric locomotives on the operation of rail circuits and automatic locomotive signaling are used in teaching the discipline "Digital signal processing in railway automation systems"; The method of monitoring the signal current of tone rail circuits using a classifier based on artificial neural networks is used in teaching the discipline "Technical specifications of interoperability for control systems. European Rail Traffic Management System (ERTMS)". Also, the results of the dissertation are used in the master's thesis specialties 151 "Automation and computer-integrated technologies" and 273 "Railway transport" (OPP "Interoperability and safety in railway transport (according to the international program TEMPUS)"), which is confirmed by the relevant acts.

According to the dissertation topic, 32 scientific works were published, of which fourteen articles were published in professional scientific journals approved by the Min-

istry of Education and Science of Ukraine, which are included in international scientometric databases, and sixteen approbation works, three additional works, one of which is a patent.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the purpose, objectives of the study, outlines the scientific novelty, the practical significance of the results of the dissertation, information about testing and publication of research results.

The first section analyzes the functional safety of rail circuits and electromagnetic compatibility (EMC) of railway automation systems with traction network, in particular, with the electric rolling stock of railways, and also considers the impact of electromagnetic interference from electric rolling stock on the functional safety of rail circuits. Safety and serviceability of the track. It is noted that for the first time the normative document "Value of limiting current, frequency range and nature of interference from electrical equipment of electric locomotives on the operation of rail circuits and automatic locomotive signaling" and test methods for electric trains on EMC with SCB devices were developed at Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. Academician V. Lazaryan (supervisor - Prof. V. I. Havryliuk), in the development of which the author of the work directly participated as a performer. On the basis of the conducted analytical review of the literature the purpose and tasks of researches are formulated in work.

In the second section, the mathematical model of the hardware-software complex (APC) for measuring electromagnetic interference from EMF in rails is improved. The problem of rational choice of parameters of agro-industrial complex consists in strict requirements of regulatory documents concerning accuracy of measurement of parameters of harmonics of traction current (TS). Rational selection of agro-industrial parameters is complicated by a large dynamic range of traction current harmonics (greater than 90 dB), a wide range of frequencies and contradictions inherent in DFT, which make it impossible to simultaneously increase the accuracy of harmonic amplitude and resolution in the frequency domain for close harmonics the impossibility of simultaneously

achieving high accuracy of harmonic localization in the frequency and time domains, which follows from the uncertainty principle.

Theoretical and experimental studies allowed to scientifically substantiating the choice of parameters of the measuring complex, which allowed to provide the necessary resolution and accuracy of determining the parameters of harmonic interference, as well as to develop a mathematical model of electrical interference from several units of rolling stock in longitudinally inhomogeneous asymmetric line. The model was implemented in the form of a computer program that allows you to determine the necessary parameters of the measuring system to ensure the required accuracy and resolution of spectral analysis. The adequacy of the developed model was checked by comparing the results of calculations with the measurement results.

In the third section, a mathematical model of electrical interference from EMF in an asymmetric rail line is developed. The need for such a model is due to the fact that to investigate the influence of various factors on the EMC of new types of rolling stock with rail wheels during operational tests is almost impossible, in addition, such testing is quite expensive. Accordingly, the need to supplement the test with research on the model is noted in the European standard CENELEC CLC / TS 50238-2. The adequacy of the developed model was confirmed by comparing the results of calculations of voltage asymmetry coefficients depending on the distance to the track transformer during train movement with the measurement results. Based on the simulation, it is shown that when the train approaches the choke-transformer at a distance of 0.85-0.5 km, the voltage asymmetry can increase above 6%.

The fourth section presents a model of the effect of harmonic interference on the receiver of the tonal rail circuit. The adequacy of the model was experimentally verified by comparing the simulation results with the experimental results obtained by registering the current at the input of the track receiver when applying to it the signal current from the GPU generator and the harmonic noise from the controlled generator. As a result of research the limiting current of disturbances at an input of the track receiver of TRK with frequency in a band $\pm (0..0,5)$ Hz concerning frequency of a signal current

which is equal 0,7 mA for a normal mode and 0,4 mA for shunt and control modes is defined.

The fifth section considers methods for improving the functional safety of rail circuits under the influence of electromagnetic interference. The concept of functional safety of modern SCB systems is based on the timely detection of failure or failure of the system and their elimination or transfer of the system to a safe state. Therefore, the development and scientific substantiation of methods and means of automatic monitoring of signal current in rail circuits is relevant. The paper proposes two methods for solving this problem, namely the method of monitoring TRC using wavelet transform and classifier based on artificial neural networks and the method of continuous monitoring of signal current of TRC to detect distortions in the initial stages of their occurrence using adaptive fuzzy neural network. Discrete wavelet-packet current conversion, Shannon entropy of energy of discrete wavelet-packet signal conversion, and signal courtesy were used to select diagnostic signs of signal current distortions of tonal rail circuits. A three-layer artificial neural network with direct communication, with three input nodes, a hidden layer, four output nodes and neurons of sigmoid function was used to classify signal defects. The input of the neural network was fed the values of diagnostic parameters detected during the preliminary computer processing of the signal current of the TRC. The neural network is trained using the backpropagation algorithm and the Levenberg-Marquardt optimization technique. The total root mean square error of the trained neural network was 0.02310.

The use of signal current distortion monitors with clear boundaries for input diagnostic parameters and strict rules for defect classification does not allow to detect minor distortions at the initial stage of their origin and monitor their development to predict the possible transition of TRC to the limit state. The development of a method for monitoring defects in the process of their development allows to move further to the maintenance of rail circuits, taking into account the actual condition. In this regard, the effectiveness of the use of the adaptive fuzzy neural network (ANNM) to detect distortions of the signal current of TRCs and monitor their development was investigated. As diag-

nostic signs of distortions of signals of TRK three parameters which deviations from the set are the reason of the majority of failures in work of TRK according to statistics were chosen. The ANNM system consists of a neuro-fuzzy model, which works according to the algorithm. timely predict the possible transition of broadcasters to the limit state. The development of a method for monitoring defects in the process of their development allows to move further to the maintenance of rail circuits, taking into account the actual condition. In this regard, the effectiveness of the use of the adaptive fuzzy neural network (ANNM) to detect distortions of the signal current of TRCs and monitor their development was investigated. As diagnostic signs of distortions of signals of TRK three parameters which deviations from the set are the reason of the majority of failures in work of TRK according to statistics were chosen. The ANNM system consists of a neuro-fuzzy model that works on the Takagi-Sugeno algorithm. The performed researches as a whole confirmed adequacy of an adaptive fuzzy neural network and efficiency of use of the offered method of monitoring of origin and development of defects of a signal current of TRK by means of ANNM.

Key words: railway transport, railway automation, rail circuits, electromagnetic compatibility, functional safety.

Список публікацій здобувача

Публікації у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Мелешко В. В. Организация обслуживания и ремонта устройств и систем железнодорожной автоматики, построенных на базе программно-аппаратных средств. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2008. №. 4. С. 34-37.
2. Havryliuk V. I., Meleshko V. V. The comparative analysis of main calculation methods of matrix elements' impedance of 1520 mm rail track gauge in audio frequency range. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2014. № 7. С. 44-51.
3. Havryliuk V. I., Meleshko V. V. Electrical impedance of traction rails at audio frequency range. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. №. 2. С. 31-36.
4. Гаврилюк В. И., Щека В. И., Мелешко В. В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 7-15.
5. Сердюк Т. М. , Мелешко В. В., Гаврилюк В. І. Метод моделювання системи тягового електропостачання. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2015. №. 10. С. 35-43.
6. Маловічко, В. В., Рыбалка, Р. В., Маловічко, Н. В., Мелешко, В. В. Вибір об'єктів діагностування та контролю електричної централізації з урахуванням впливу відмов на рух поїздів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2012. №. 3. С. 45-48.
7. Havryliuk V. I., Voznyak O. M., Meleshko V. V. Improving the positioning accuracy of train on the approach section to the railway crossing. *Наука та*

- прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2016. №. 1 (61). С. 9–18.*
8. Мелешко В. В.. Технічний контроль систем числового кодового автоблокування. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2017. №. 13. С. 81-87.*
 9. Гаврилюк В. И, Мелешко В. В. Обоснование уровней электромагнитного влияния тягового тока на рельсовые цепи. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2017. № 14. С. 19-26.*
 10. Гаврилюк В. І, Мелешко В. В. Моделювання розповсюдження гармонічних завад від електрорухомого складу у несиметричній рейковій лінії. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2018. №. 15. С. 15-26.*
 11. Havryliuk V. I., Meleshko V. V. Comparative analysis of experimental and calculation methods for determination of the traction current harmonics distribution in rails. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2018. № 16. С. 11-16.*
 12. В. І. Гаврилюк , В. В. Мелешко. Вибір параметрів перетворення Фур'є для спектрального аналізу тягового струму. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2019. №. 17. С. 11-19.*
 13. В. И. Гаврилюк, В. В. Мелешко Рациональный выбор параметров аппаратно-програмного комплекса для спектрального анализа тягового тока. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2019. №. 17. С. 20-29.*
 14. В. В. Мелешко Диференційний струм гармонічних завад в рейковій лінії від електрорухомого складу при нормативних значеннях коефіцієнта асиметрії. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2019. №. 17. С. 42-47.*

Праці апробаційного характеру

15. Мелешко В. В., Гаврилюк В. І. Ймовірнісна модель впливу тягового струму на рейкові кола. *Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*: тези V Міжнар. науково-практичн. конф., 14-17 лютого 2012, пгт. Чинадієво. – Д.: ДІТ, 2012. С. 51-53.
16. Мелешко В. В. Анализ специфических требований к разработке магистральных светофоров железнодорожного транспорта на светодиодах. *Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*: тези V Міжнар. науково-практичн. конф., 15-19 лютого 2011, пгт. Чинадієво. – Д.: ДІТ, 2012. С. 58-59.
17. Гаврилюк В. І., Мелешко В. В. Електромагнітна сумісність рухомого складу з системами сигналізації і зв'язу як складова безпеки руху поїздів. *Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд*: Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції імені доктора технічних наук Сокола Е. М. (Львів, 2015, вересень). С. 40-41.
18. Havryliuk V. I., Zavgorodnij O. V., Meleshko V. V. Tests of modern types of the rolling stocks on electromagnetic compatibility with railway signalization systems. *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті*: Тези ІХ Міжнар. науково-практичн. конф. (Дніпропетровськ, 16-17 грудня 2015). – Д.: ДІТ, 2015. С. 15.
19. Гаврилюк В. И., Василишин Д. А., Мелешко В. В., Возняк О. М. Повышение безопасности движения на железнодорожных переездах путем организации дополнительного контроля параметров движения поезда. *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті*: Тези ІХ Міжнар. науково-практичн. конф. (Дніпропетровськ, 16-17 грудня 2015). – Д.: ДІТ, 2015. С. 18.

20. Гаврилюк В. И., Мелешко В. В. Стратегии технического обслуживания систем железнодорожной автоматики. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2015 р.) – Д.: ДНУЗТ. С. 207-209.
21. Havryliuk V. I., Zavgorodnij O. V., Meleshko V. V. Testing of modern types of the rolling stock on electro-magnetic compatibility with railway signalization systems. *Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*: тези VII Міжнар. науково-практичної конф., 16-19 лютого 2016 р., с. Розлуч. – Д.: ДПТ, 2016. С. 24
22. Гаврилюк В. И., Щека В. И., Мелешко В. В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи. *Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*: тези VII Міжнар. науково-практичної конф., 16-19 лютого 2016 р., с. Розлуч. – Д.: ДПТ, 2016. С. 25.
23. Гаврилюк В. И. Мелешко В. В. Випробування нових типів рухомого складу на електромагнітну сумісність з системами сигналізації і зв'язку. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: Тези 76 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2016 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2016. С. 150-152
24. Гаврилюк В.И., Мелешко В. В. Контроль механических параметров нейтрального реле железнодорожной автоматики на основе вейвлет-анализа. *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті*: Тези X Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 2016). С. 22-23.
25. Meleshko V. V. Distribution of the traction current harmonics in rails. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Тези доповідей (24-25.10. 2019 р. м. Харків). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 2019. № 4 (додаток). С. 79-80.
26. Meleshko V. V., Havryliuk V. I. Determination of traction current harmonics parameters by FFT. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транс-*

- порті*. Тези доповідей (24-25.10. 2019 р. м. Харків). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 2019. № 4 (додаток). С. 80-81.
27. Havryliuk V., Leferink F., Serdiuk T., Meleshko V. The accuracy of traction current harmonics parameters determination by windowed FFT. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 79 Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 16-17 травня 2019 р.)*. Д.: ДНУЗТ, 2019. С. 218-219.
28. Meleshko V., Havryliuk V. The measurement of traction current harmonics parameters by short time Fourier transform. *Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 11-12 грудня 2019 р.)*. – Д.: ДПТ, 2019. С. 45.
29. Гаврилюк В. І., Мелешко В. В. Вибір параметрів апаратно-програмної системи Для спектрального аналізу тягового струму. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 80 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2020 р.)* – Д.: ДНУЗТ, 2020. С. 121-122.
30. Мелешко В. В. Методика визначення граничного рівня електромагнітних завад у рейкових колах струму. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 80 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2020 р.)* – Д.: ДНУЗТ, 2020. С. 123.

Додаткові праці

31. Гаврилюк В., Маловічко В., Мелешко В. Дистанційне діагностування стрілочних переводів в умовах експлуатації. *Українські залізниці*, 2015. № 7–8 (25–26). С. 44-47.
32. Маловічко В. В., Рыбалка, Р. В., Маловичко, Н. В., Мелешко, В. В. Визначення пріоритетів вибору об'єктів діагностування та контролю електричної централізації з урахуванням затримок поїздів // *Автоматика, телемеханіка, зв'язок. Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2012. № 31. С. 57-61.

33. Пат. 80217 Україна, МПК В61L 25/06 (2006.01). Спосіб діагностування колійного приймача тональних рейкових кіл. Гаврилюк В. І., Мелешко В. В.; Буряк С. Ю.; Святченко О. О.; Брусник І. Ю.: власник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – и 2009 12596; заявл. 04.12.2009 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 12.

ЗМІСТ

ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ	32
1.1. Загальні питання електромагнітної сумісності на залізничному транспорті	32
1.2. Вплив електромагнітних завад тягового струму на рейкові кола	36
1.3. Електрорухомий складу як джерело гармонік тягового струму	42
1.4. Особливості функціонування асинхронного тягового приводу	45
1.5. Захист комунікаційних ліній від індуктивного впливу тягового струму змінного струму	51
1.6. Екрануючий провід був запропонований для зменшення від індуктивного впливу тягового електропостачання змінного струму на лінії зв'язку	53
1.7. Висновки, постановка мети і задач досліджень	54
РОЗДІЛ 2.. НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВІД ЕРС	56
2.1. Загальне формулювання завдання	56
2.2. Апаратно-програмний комплекс для вимірювання гармонійних завад в тяговому струмі	59
2.3. Похибки АПК при вимірювання параметрів гармонік	60
2.4. Математична модель апаратно-програмного комплексу	63

2.4.1. Забезпечення роздільної здатності АПК за амплітудою завад.....	63
2.4.2. Забезпечення роздільної здатності за частотою і тривалістю завад.....	70
2.5. Вибір параметрів і характеристик елементів АПК на підставі розробленої моделі.....	71
2.5.1. Вибір типу АЦП за частотою дискретизації.....	71
2.5.2. Вибір АЦП за динамічним діапазоном вимірювання.....	73
2.5.3. Вибір параметрів спектрального аналізу тягового струму.....	74
2.6. Дослідження динамічних властивостей АЦП на комп'ютерній моделі.....	78
2.7. Перевірка адекватності математичної моделі.....	82
2.8. Методи підвищення точності визначення параметрів завад.....	86
2.9. Висновки за розділом.....	88
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОТІКАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАВАД В НЕСИМЕТРИЧНІЙ РЕЙКОВІЙ ЛІНІЇ.....	
3.1. Загальна постановка задачі дослідження.....	90
3.2. Загальна структура тягової мережі дільниці залізниці.....	92
3.3. Основні припущення моделі. Врахування повздовжньої неоднорідності тягової мережі.....	94
3.4. Модель структурно-однорідних сегментів тягової мережі.....	96
3.4.1. Еквівалентна схема структурно однорідної дільниці рейкової лінії.....	96

3.4.2. Представлення в моделі електрообладнання електропоїзда і дросель-трансформаторів	101
3.5. Спрощена модель розподілу гармонік тягового струму в електрично-несиметричній рейковій лінії.....	103
3.6. Результати моделювання.....	112
3.7. Перевірка адекватності розробленої моделі	115
3.8. Висновки за розділом	116
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ГАРМОНІЧНИХ ЗАВАД НА ПРИЙМАЧ ТОНАЛЬНОГО РЕЙКОВОГО КОЛА.....	117
4.1. Загальні положення.....	117
4.2. Модель розповсюдження завад в рейковому колі	120
4.3. Визначення сумарного струму на вході колійного приймача	123
4.4. Аналіз завадостійкості тональних рейкових кіл.....	124
4.4.1. Моделювання струму на вході КП ТРК у нормальному режимі	124
4.4.2. Моделювання струму на вході КП ТРК у шунтовому і контрольному режимах.....	128
4.5. Висновки	130
РОЗДІЛ 5 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД	131
5.1. Загальна постановка задачі	131
5.2. Розробка методу моніторингу ТРК з використанням вейвлет перетворення і класифікатора на основі штучних нейронних мереж	132
5.2.1. Характеристика дефектів сигнального струму ТРК	132

5.2.2. Характеристика дефектів сигнального струму ТРК	136
5.2.3. Опис сигналів ТРК.....	136
5.3. Результати дослідження	138
5.3.1. Вейвлет розкладання сигнального струму ТРК	138
5.3.2. Обрання діагностичних ознак	140
5.4. Класифікація дефектів сигнального струму ТРК з використанням штучної нейронної мережі	147
5.5. Розробка методу моніторингу зародження і розвитку дефектів сигнального струму ТРК за допомогою адаптивної нечіткої нейронної мережі	148
5.5.1. Вибір діагностичних параметрів для адаптивної нечіткої нейронної мережі	149
5.5.2. Основні положення адаптивної нечіткої нейромережевої системи	150
5.5.3. Структура адаптивної системи нейро-нечіткого висновку	151
5.5.4. Вибір даних для навчання і тестування системи.....	152
5.5.5. Навчання АННМ.....	154
5.6. Висновки.....	156
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	160
Додаток.....	189

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АЛС – автоматична локомотивна сигналізація;
- АННМ - адаптивна нечітка нейронна мережа;
- АПК – апаратно-програмний комплекс;
- АТП – асинхронний тяговий привід;
- АТД – асинхронний тяговий двигун;
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
- ВП – вейвлет перетворення;
- ГПУ – генератор колійний універсальний (тип генератора);
- ДВПІ – дискретне вейвлет пакетне перетворення;
- ДПФ – дискретне перетворення Фур'є;
- ЕМС – електромагнітна сумісність;
- ЕМЗ – електромагнітні завади;
- ЕРС – електрорухомий склад;
- е.р.с. –електрорушійна сила;
- КП – колійний приймач;
- КПФ – короткочасне перетворення Фур'є;
- МЗР – молодший зачущий розряд;
- РЛ – рейкова лінія;
- РК – рейкове коло;
- РС – рухомий склад;

СЗАТ – системи залізничної автоматики і телемеханіки;

СЦБ – сигналізація, централізація, блокування;

СТЕП – система тягового електропостачання;

ТМ – тягова мережа;

ТП – тягова підстанція;

ТС – тяговий струм;

ТРК – тональне рейкове коло;

ШНМ - штучна нейронна мережа;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

ВСТУП

Актуальність роботи. Нові типи двосистемних електропоїздів з асинхронним тяговим приводом, що почали впроваджуватися в Україні в останнє десятиріччя, є джерелом потужних електромагнітних завад в широкому діапазоні частот, які здатні викликати збої в роботі рейкових кіл (РК) і автоматичної локомотивної сигналізації (АЛСН) і, відповідно, приводити до небезпечних для руху поїздів ситуацій. Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впровадження і експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з рейковими колами є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з пріоритетним напрямком розвитку залізничної галузі, який визначений у стратегії розвитку залізничного транспорту України до 2020 року, а також пов'язана з НДР "Розробка та наукове обґрунтування технічних рішень по підвищенню безпеки руху поїздів на швидкісних магістралях шляхом автоматизації контролю та діагностування рейкових кіл" (номер державної реєстрації 0108U003066) в якій дисертант є співавтором звіту з НДР.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з РК.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз існуючих методів та засобів забезпечення функціональної безпеки рейкових кіл при впровадженні та експлуатації нових типів рухомого складу з асинхронним тяговим приводом з урахуванням впливу на них електромагнітних завад від ЕРС;
- розробити математичну модель АПК для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС в рейках, що дозволяє провести вибір параметрів апаратних і програмних компонентів комплексу для забезпечення необхідного динамічного діапазону, точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад;

- удосконалити математичну модель АПК для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС в рейках з урахуванням взаємодії всіх його компоненти, що дозволить науково обґрунтувати рекомендації щодо вибору параметрів АПК для забезпечення необхідної точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад;
- розробити математичну модель протікання електричних завад від декількох одиниць ЕРС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії, яка дозволить визначити ступінь впливу завад на рейкові кола;
- удосконалити математичну модель впливу гармонічних завад на колійний приймач ТРК з урахуванням амплітуди, частоти і фазового зсуву гармонік ТС відносно частоти сигнального струму для визначення параметрів електричних завад, які можуть привести до збою в роботі РК в нормальному, шунтовому та контрольному режимах роботи;
- розробити та науково обґрунтувати метод підвищення функціональної безпеки, який базується на використанні вейвлет-аналізу сигнального струму на вході колійного приймача ТРК та класифікатора на основі штучних нейронних мереж, що дозволить виявити наднормовані електричні завади та спотворення сигнального струму і своєчасно попередити виникнення небезпечної ситуації;
- розробити, науково обґрунтувати і дослідити ефективність методу підвищення функціональної безпеки тональних рейкових кіл, який базується на використанні адаптивної нечіткої нейронної мережі (АННМ) для контролю параметрів струму в ТРК, що дозволить своєчасно виявити спотворення сигнального струму на початковому етапі їх виникнення та провадити моніторинг їх розвитку і, як наслідок, прогнозувати час виникнення небезпечної відмови та перейти у подальшому до обслуговування ТРК з урахуванням їх фактичного стану.

Об’єкт дослідження – електромагнітні процеси в рейкових колах та тяговій мережі, обумовлені функціонуванням нових типів рухомого складу і їх вплив на функціональну безпеку рейкових кіл.

Предмет дослідження – методи оцінки і забезпечення електромагнітної сумісності рейкових кіл з електрорухомим складом з асинхронним тяговим приводом.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених у дисертації задач застосовано наступні методи: з метою розробки математичної моделі апаратно-програмного комплексу для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС та наукового обґрунтування раціонального вибору параметрів комплексу методи теоретичних основ електротехніки, теорії вимірювань, цифрової обробки сигналів; для розробки математичної моделі протікання електричних завад від декількох одиниць ЕРС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії та для розробки математичної моделі впливу гармонічних завад на приймач ТРК – методи теорії електричних кіл, теорії матриць, комп’ютерного моделювання; для розробки та наукового обґрунтування методів підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад від ЕРС – цифрову обробку сигналів, теорію дискретного вейвлет-пакетного перетворення (ДВПП), ентропію Шеннона енергії вейвлет-перетворення, штучні нейронні мережі, адаптивні нечіткі нейронні мережі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні науково-практичного завдання з розробки та наукового обґрунтування методів підвищення функціональної безпеки рейкових кіл (РК) в умовах експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності.

Вперше:

- розроблено математичну модель протікання електричних завад від декількох одиниць ЕРС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії, яка дозволяє визначити ступінь впливу завад на рейкові кола;

- розроблено та науково обґрунтовано метод підвищення функціональної безпеки ТРК, який базується на використанні вейвлет аналізу сигнального струму на вході колійного приймача ТРК та класифікатора на основі штучних нейронних мереж, що дозволяє виявити електричні завади та спотворення сигнального струму і своєчасно попередити виникнення небезпечної ситуації;
- розроблено, науково обґрунтовано і досліджено ефективність методу підвищення функціональної безпеки ТРК, який базується на використанні АННМ для контролю параметрів струму в ТРК, що дозволяє своєчасно виявити спотворення сигнального струму на початковому етапі їх виникнення та проводити моніторинг їх розвитку і, як наслідок, прогнозувати час виникнення небезпечної відмови та перейти, у подальшому, до обслуговування ТРК з урахуванням їх фактичного стану.

Удосконалено:

- математичну модель АПК для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС в рейках, яка відрізняється від існуючих тим, що розглядає всі компоненти системи з урахуванням їх взаємодії, що дозволяє провести вибір параметрів апаратних і програмних компонентів комплексу для забезпечення необхідного динамічного діапазону, точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад;
- математичну модель впливу гармонічних завад на колійний приймач ТРК, яка відрізняється від існуючих тим, що розглядає амплітуду, частоту і фазовий зсув гармонік ТС відносно частоти сигнального струму, що дозволило визначити параметри електричних завад, які можуть привести до збою в роботі РК в нормальному, шунтовому та контрольному режимах роботи.

Обґрунтованість та достовірність результатів, отриманих у дисертації, підтверджується системним підходом до вирішення поставленої задачі, коректним використанням сучасного математичного апарату та задовільним збігом результатів моделювання з результатами експериментальних вимірювань.

Практичне значення одержаних результатів визначається наступним.

Програма та методика контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також таблиці зі значенням граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації прийнято до використання у дистанції сигналізації та зв'язку, що підтверджується відповідним актом.

Математична модель та метод контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також таблиці зі значеннями граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації використовуються при викладанні дисципліни "Цифрова обробка сигналів в системах залізничної автоматики"; метод моніторингу сигнального струму тональних рейкових кіл з використанням класифікатора на основі штучних нейронних мереж використовується при викладанні дисципліни "Технічні специфікації інтероперабельності для контрольно-управляючих систем. Європейська система управління залізничними перевезеннями (ERTMS)". Також результати дисертаційної роботи використовуються при виконанні дипломних магістерських робіт спеціальностей 151 "Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології" та 273 "Залізничний транспорт" (ОПП "Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті (за міжнародною програмою TEMPUS)"), що підтверджується відповідним актом.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, наведених в дисертаційній роботі, отримані автором особисто або безпосередньо за його участю.

В роботах, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належать наступне: порівняльний аналіз і математичні вирази для матриці імпедансів рейок колії 1520 мм в тональному діапазоні частот [1], [4]; визначені пріоритети вибору об'єктів діагностування електричної централізації [2], [3]; створення математичної моделі рейкових кіл і тягової мережі та результати моделювання розповсюдження електромагнітних завад від ЕРС [5], [6], [9], [10]; обґрунтування рівнів електромагніт-

ного впливу тягового струму на рейкові кола [8]; математична модель і методи раціонального вибору параметрів АПК та параметрів перетворення Фур'є для спектрального аналізу тягового струму [11], [12].

Роботи [7] та [13] написані без співавторів, самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися і були схвалені на: 75-й міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" (2015 р., Дніпропетровськ), на VII міжнародній науково-практичній конференції "Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті" (2016 р., с. Розлуч); на X Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (м. Дніпро, 14-15 грудня 2016 р.), на 79-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 16-17 травня 2019 р.).

В повному обсязі дисертація доповідалась і була схвалена на міжкафедральному науковому семінарі кафедр "Автоматика та телекомунікації", "Автоматизований електропривід", "Електропостачання залізниць", "Електронні обчислювальні машини", "Комп'ютерні інтегровані технології", "Локомотиви", "Прикладна математика", "Станції та вузли", "Управління експлуатаційною роботою" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна 04.02.2020 р.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 21 наукова праця: 13 – у наукових журналах і збірниках наукових праць, затверджених ВАК України за фахом 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту, 1 патент на винахід, 8 – у матеріалах і тезах конференцій та симпозіумів.

Структура й обсяг дисертації. Повний обсяг викладено на 189 сторінках і включає 126 сторінок тексту. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (164 найменування) на 17 сторінках, 5 додатків на 36 сторінках, ілюстрована 63 рисунками та 10 таблицями.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Загальні питання електромагнітної сумісності на залізничному транспорті

У відповідності до визначення Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) під електромагнітною сумісністю (ЕМС) розуміється здатність електротехнічного обладнання (приладу, апарата, пристрою) задовільно працювати із заданою якістю в заданому електромагнітному середовищі і не утворювати неприпустимого електромагнітного впливу на оточуюче середовище, а також на інше технічне обладнання. В Україні технічний регламенту з електромагнітної сумісності обладнання затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 29.08.2009, № 785.

Електрифіковані залізниці є потужним просторово розподіленим джерелом електромагнітних завад [1-5]. В цілому, джерела електромагнітних завад на залізничному транспорті можна поділити на зовнішні і внутрішні. До основних зовнішніх джерел електромагнітних завад відносять високовольтні лінії електропередачі, системи зовнішнього електропостачання до тягових підстанцій, системи радіозв'язку, а також джерела природного походження (електричні розряди, блискавка) та ін.

До внутрішніх джерел відносять електро- та радіотехнічне обладнання залізниць, але найбільш потужними джерелом завад на електрифікованих залізницях є системи і пристрої тягового електропостачання, а саме: тягові підстанції, тягова мережа а також електрорухомий склад [4-6].

Електромагнітному впливу від тягового електропостачання підлягають рейкові кола, повітряні і кабельні лінії телеуправління і телекомунікації, а також радіозв'язок (рис. 1.1.)

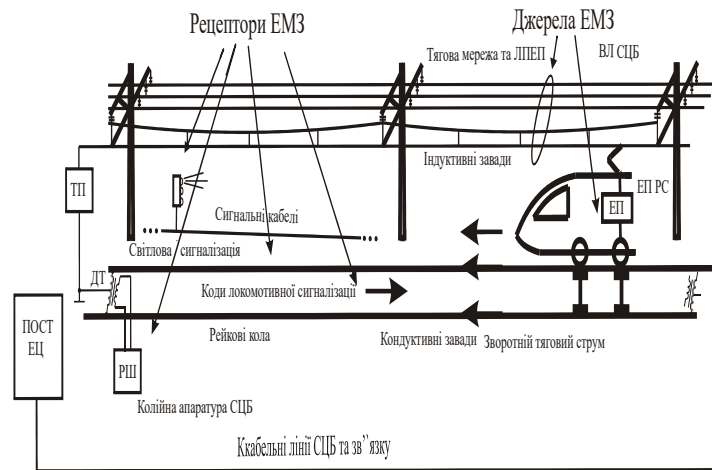


Рисунок 1.1 - Схематичне представлення джерел і рецепторів ЕМЗ на електрифікованих залізницях

Дослідженням електромагнітної сумісності рейкових кіл і систем тягового електропостачання займалися такі вчені як Аркатов В. С. [10, 11], Бабаєв М.М. [135, 235], Бадер М. П. [4], Беляков И. В. [13-15], Бестемьянов, П. Ф. [32], Бойнік А. Б. [231-233], Брылеев А. М. [7-9], Бочков К. А. [16,17], Бялонь А. [18], Гавзов Д.В. [42], Гаврилюк В. І. [20-21], Доманський В.Т. [234], Ермоленко Д. В. [25-28], Котельников А. В. [6, 29, 30], Косарев А. Б. [31], Котляренко Н. Ф. [12], Кравцов, Ю. А. [30-35, 65-70], Марквардт К.Г. [2, 3], Наумов А.В. [36], Павлов И. В. [37], Сиченко В.Г. [19, 22, 121, 135], Соколов Ю. В. [12], Шаманов В.И. [38-40] та інші.

Поняття електромагнітної сумісності як у загальному сенсі, так і зокрема для залізничного транспорту, є достатньо широким. При аналізі ЕМС для залізничного транспорту розглядається такі види впливу:

- кондуктивний вплив на рейкові кола (в діапазоні частот від 0 до 104 Гц) та на металеві оболонки кабелю, трубопроводи і інші металеві конструкції, що з'єднані з рейками безпосередньо або через провідність землі;
- індуктивний вплив на повітряні та кабельні лінії зв'язку (в діапазоні частот від 50 до 3450 Гц);
- електромагнітний вплив через радіо завади на частотах технологічного радіозв'язку і передачі даних в діапазоні частот від 30 кГц до 1 ГГц;
- електростатичний вплив.

Слід зауважити, що всі ці різновиди впливів є проявом дії електромагнітного поля.

Дослідження впливу електричних завад від тягових підстанцій і електричного рухомого складу (ЕРС) на рейкові кола (РК) та методи захисту РК від завад описані в багатьох фундаментальних роботах [4-12]. Існуючі публікації з електромагнітної сумісності (ЕМС) системи тягового електропостачання з рейковими колами розглядають майже всі аспекти цієї проблеми [12-24, 30-40, 46, 47, 56, 65-70, 88-114].

Історично проблема електромагнітної сумісності тягового електропостачання з лініями сигналізації та зв'язку виникла на початку електрифікації залізниць на постійному і, особливо суттєві проблеми винили при електрифікації на змінному струмі (у 60-70-х роках минулого століття) [1-4]. Проблема забезпечення ЕМС на залізничному транспорті була в цілому успішно вирішена в процесі розробки і проектування систем тягового електропостачання [1-4]. Висока функціональна безпека рейкових кіл при цьому була досягнута як за рахунок технічних рішень [7, 8], так і внаслідок впровадження організаційних методів та засобів, що включають планово-попереджувальне обслуговування рейкових кіл, порядок проведення яких регламентовано галузевими інструкціями [41].

Технічні рішення стосуються забезпеченням високої завадостійкості колійних приймачів рейкових кіл шляхом використання захисних фільтрів на вході колійних приймачів [7-12], що запобігають проходженню на вхід колійного приймача гармонійних завад з частотами, які відрізняються від частот сигнального струму, а також високою селективністю колійних приймачів, в яких вихідний сигнал, що характеризує стан рейкового кола, формується за двома селективними признаками а саме: за несучою частотою сигналу і частотою його модуляції (ТРК), або за частотою і фазою сигналу (ФЧРК), або за частотою сигналу і кодовими комбінаціями (кодові РК). При відповідності селективних ознак вимогам, рішення про стан рейкового кола формується в колійному приймачі за третім параметром. а саме, за рівнем сигнального струму на вході приймача [7].

Для тяги змінного струму частоту сигнального струму рейкових кіл вибирають відмінною від частоти 50 Гц та частот кратних 50 Гц, а саме $(50 \cdot n)$ Гц, де $n = 6, 12$, що можуть виникнути в тяговій мережі постійного струму внаслідок роботи випрямлячів на тягових підстанціях і не недостатньої фільтрації випрямленого струму [4].

Організаційні засоби регламентовані галузевими інструкціями, що передбачають обов'язкове випробування нових систем сигналізації та зв'язку і нових типів рухомого складу на електромагнітну сумісність перед вводом їх в експлуатацію, а також періодичним планово-попереджувальним обслуговуванням систем сигналізації, централізації, блокування (СЦБ) [41].

Таким чином, для традиційних систем СЦБ і електрорухомого складу проблема впливу гармонік тягового струму на рейкові кола і автоматичну сигналізацію були успішно вирішені в процесі експлуатації залізниць, про що свідчать статистичні данні з яких видно, що збої пристроїв СЦБ під впливом ЕМ завод за кількістю є незначними.

Збої АЛСН від ЕМЗ виникають, головним чином, внаслідок намагніченості рейок, застарілої або неправильно відрегульованої апаратури, внаслідок намагнічення дросель-трансформаторів тяговим струмом. Але ці збої не пов'язані з впливом гармонік тягового струму і не є предметом дослідження дисертації.

Нова хвиля інтересу до проблеми ЕМС з боку науковців, конструкторів і експлуатаційного персоналу виникла у зв'язку із вводом в експлуатацію нових типів високошвидкісних поїздів з асинхронним тяговим приводом і електронними перетворювачами електричної енергії, які генерують потужні електромагнітні завади в широкому діапазоні частот [25-28, 32-35, 45-47, 59, 65-72, 115-133]. В Україні були введені в експлуатацію на початку 2000-х років локомотиви з асинхронним тяговим приводом типу ДС-3. Особливо проблема електромагнітної сумісності нових типів ЕРС з рейковими колами набула актуальності у 2012 році у

зв'язку з впровадженням нових типів двосистемних електропоїздів подвійного електроживлення типу "Хюндай" і "Шкода".

Слід зауважити що на час випробувань локомотивів ДС-3 в Україні не було затверджених галузевих норм, що визначають допустимі рівні електромагнітних завад в рейкових колах від рухомого складу, а також методики випробування.

Відповідний нормативний документ «Значення граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації», затверджений 22.05.2006 першим заступником генерального директора Укрзалізниці, та методики випробування електропоїздів на ЕМС з пристроями СЦБ були розроблені в Дніпропетровському національному університеті ім. академіка В. Лазаряна (науковий керівник робіт проф. В. І. Гаврилюк), в розробки яких здобувач приймав участь як виконавець.

1.2. Вплив електромагнітних завад тягового струму на рейкові кола

За характером впливу тягового струму на рейкові кола розрізняють заважаючий і небезпечний впливи [7, 8, 10, 12]. Заважаючим є вплив при якому рейкове коло реєструє хибну зайнятість або несправність ($f_n = 0$). Небезпечним є вплив при якому зайняте або несправне рейкове коло показує хибну вільність і справність ($f_n = 1$). До небезпечного впливу електромагнітних завад (ЕМЗ) на рейкові кола відносять також такі, при яких може виникнути пошкодження пристроїв РК внаслідок пробоя ізоляції або перегріву, що може призвести до ураження електричним струмом технічного персоналу.

Залізниці України обладнані великою кількістю різного роду рейкових кіл [1-4, 65, 66] (табл 1.1). Дослідження на ЕМС та аналіз впливу на них електромаг-

нітних завад необхідно провадити з урахуванням конкретного типу рейкового кола, схеми каналізації тягового струму та іншими чинниками [65, 66].

Таблиця 1.1.

Типи рейкових кіл, що експлуатуються на залізницях України

Тип рейкового кола		Тип колійного приймача	Максимальна довжина, м
На ділянках з електротягою постійного струму	Перегонні кодові РК частотою 50 Гц (К50)	ИМВШ- 110, ИРВ-110, ИВГ, ИВГ-М	2600
	Станційні двониткові фазочутливі РК частотою 50 Гц (Ф50)	ДСШ-12	1500
	Станційні двониткові фазочутливі РК частотою 25 Гц (Ф25)	ДСШ-13, ДСШ-13А, ДСШ-15	1200
	Станційні одониткові фазочутливі РК частотою 50 Гц (Оф50)	ДСШ-12	500
	Станційні одониткові фазочутливі РК частотою 25 Гц (ОФ25)	ДСШ-13	500
	Станційні одониткові нефазочутливі РК частотою 50 Гц (050).	АНВШ2, НМВШ2	900
	Тональні РК ТРК-3	ПП1,	1000
На ділянках з електротягою змінного струму	Перегонні кодові РК частотою 25 Гц (К25)	ИРВ-110, ИВГ-М	2600
	Станційні двониткові фазочутливі РК частотою 25 Гц (Ф25)	ДСШ-13, ДСШ-13А, ДСШ-15	1200
	Станційні одониткові фазочутливі РК частотою 25 Гц (ОФ25)	ДСШ-13	500
	Тональні РК ТРК-3	ПП1,	1000

Експлуатаційні параметри рейкових кіл наведені в табл. 1.2 [10, 11, 65, 66].

Таблиця 1.2.

Експлуатаційні параметри рейкових кіл

Вид електротяги	Тип РК	Δf , Гц	$I_{спр}$, А	$I_{відп}$, А	$I_{експл}$, А	l , м
Постійний струм 3 кВ	К50	20	1,5	0,60	1,8	2600
	Ф50	8	1,2	0,65	1,6	1500
	Ф25	8	1,6	0,96	2,3	1200
	0050	8	1,1	0,60	1,5	500
	ОФ25	8	0,57	0,35	0,8	500
	050	20	1,6	0,48	1,7	900
Змінний струм 25 кВ. 50 Гц	К25	20	1,25	0,45	1,5	2600
	Ф25	8	0,85	0,50	1,2	1200
	ОФ25	8	0,57	0,35	0,8	500
Довільний	ТРЦ-3	24	0,100	0,080	0,115	1000
	ТРЦ-4	75	0,060	0,048	0,065	300

В таблиці використано наступні умовні позначення:

Δf – робоча полоса частот;

$I_{спр}$, $I_{відп}$, – відповідно, струм спрацьовування і надійного відпускання якоря (сектора) реле;

$I_{експл}$ - мінімально допустимий струм в рейках на приймальному кінці РК в умовах експлуатації;

l - максимальна довжина РК.

Допустимі значення струму завад в рейках на приймальному кінці рейкового кола наведені в табл. 1.3 [65, 66].

Таблиця 1.3.

Допустимі значення струму завад в рейковому колі на приймальному кінці

Вид електротяги	Тип РК	Полоса частот. Гц	I_3 , А
Постійний струм 3 кВ	К50	40-60	0,300
	Ф50	46-54	0,106
	Ф25	21-29	0,178
	ОФ30	46-54	0,090
	ОФ25	21-29	0,078
	050	40-60	0,080
Змінний струм 25 кВ. 50 Гц	К25	15-35	0,250
	Ф25	21-29	0,092
	0Ф25	21-29	0,078
Довільний	ТРЦ-3	408-432; 468-492; 568-592; 708-732; 768-792	0,021

Заважаючому впливу підлягають кодові РК частотою 25 і 50 Гц, а також тотальні рейкові кола (ТРК). Небезпечному впливу підлягають фазочутливі РК частотою 25 і 50 Гц з реле ДСШ, котре може спрацювати і замкнути фронтний контакт, якщо на колійному елементі рівень, частота і фаза гармонік тягового струму мають відповідні значення. В такому випадку можливе загоряння дозволяючого сигналу світлофору.

Методи аналізу і синтезу рейкових кіл, формули розрахунку електричних параметрів РК для всіх режимів роботи наведені у багатьох фундаментальних монографіях та підручниках [7-12].

Результати досліджень і методи розрахунку протікання тягового струму в рейковій лінії, вплив тягового струму на рейкові кола, повітряні і кабельні лінії автоматики та зв'язку і методи їх захисту від електромагнітних завад наведені у багатьох монографіях, підручниках [1-9, 65, 66], стандартах [48-51], галузевих інструкціях [41] та у багатьох наукових публікаціях [25-28, 32-35, 45-47, 59, 65-72, 115-133].

Існуючі публікації з електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з рейковими колами розглядають майже всі аспекти цієї проблеми.

Для забезпечення безпечної роботи рейкових кіл під впливом електромагнітних завад від електрорухомого складу, передбачено контроль емісії завад від ЕРС на частотах, що відповідають частотам сигнального струму РК і АЛСН, і перевірка його на відповідність встановлених нормам [48-51]. Проте норми завадостійкості рейкових кіл, що напряду пов'язані з допустимими рівнями завадостійкості колійних приймачів взагалі відсутні [67, 68]

В [65-66, 68-70] на основі експериментальних вимірювань визначено рівні одиночних гармонік, що порушують функціонування фазочутливих реле ДСШ-13А, ДСШ-13, ДСШ-16, ДСШ-15 (на частоті 25 Гц) і ДСШ-12 (на частоті 50 Гц). В роботі наведені рівні завадостійкості колійних реле. Гармоніки в діапазоні частот від 21 до 29 Гц можуть впливати на роботу реле ДСШ-13. Рівень завадостійкості для реле ДСШ-13 на частоті 25 Гц складає $U_{II} = 6,0$ В для нормального режиму (НР) $U_{IIIK} = 4,0$ В для шунтового і контрольного режиму (ШР і КР). На роботу реле ДСШ-12 можуть впливати також гармоніки з частотами від 46 до 54 Гц. Рівень завадостійкості для реле ДСШ-12 на частоті 50 Гц складає $U_{II} = 5,7$ В для нормального режиму $U_{IIIK} = 4,0$ В для шунтового і контрольного режиму.

Дослідження завадостійкості колійних приймачів тональних рейкових кіл (ТРК) шляхом подавання у фізичну модель рейкових кіл сигнального струму ТРК і електричних завад, що були синтезовані комп'ютерною програмою або тягового струму, що був зареєстрований в процесі випробувань нових типів рухомого складу, описані в [65-70, 106]. В результаті досліджень отримано значення допустимого рівня гармонійних завад для колійних приймачів, які були випробувані в роботі, а саме ПП1–8/8 и ПП1–8/12 на рівні 12 дБ, а для ПП1–9/8 на рівні 17 дБ, тобто на рівні 0,42 мА [65-70].

Нормативне граничне значення струму на вході колійного приймача ТРК типу ПП1 в нормальному режимі визначено на рівні 0,55 мА шляхом множення нормативного значення струму в рейковій лінії (0,35 мА) на коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця ТРК, що дорівнює $0,12 \cdot 0,5/38 = 1,58 \cdot 10^{-3}$ [32-35, 65-70].

Така оцінка є обґрунтованою для максимально допустимого рівня гармонійних завад на вході колійного приймача в нормальному режимі при найбільш несприятливих умовах, а саме для максимального коефіцієнту передачі сигналу в апаратурі релейного кінця.

Для аналізу впливу завад в конкретній рейковій лінії необхідно розраховувати коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця РК з урахуванням параметрів рейкового кола.

Для забезпечення електромагнітної сумісності ТРК з тяговим струмом при максимальній розрахунковій кількості поїздів в фідерній зоні, що допускається за ГОСТом, і при рівні гармонік від кожного електровозу 0,35 А, завадостійкість приймача ТРК в нормальному режимі, а саме, максимальний струм завади, що не приводить до збоїв в роботі ТРК, має бути не менше 0,7 мА [35].

Завадостійкість ТРК в шунтовому и контрольному режимах роботи дорівнює 0,4 мА при $K_{вн} = 0,58$ і 0,83 мА при $K_{вн} = 0,483$ [35, 66].

Незважаючи на достатньо велику кількість досліджень впливу електричних завад в зворотній тяговій мережі на роботу рейкових кіл, на сьогоднішній час не було розроблено достатньо повної математичної і комп'ютерної моделі розповсюдження електромагнітних завад в рейковій лінії від ЕРС до колійного приймача і вплив завад на колійний приймач рейкових кіл, що враховує ряд конкретних параметрів, а саме: тип і параметри РК, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати ЕРС, спектральний склад зворотного тягового струму, що був зареєстрований при випробуваннях ЕРС, відстань між тяговими підстанціями, відстань від підстанцій до колійного приймача та інші параметри.

Розробка такої моделі має практичне значення і вона може бути використана як при обробці результатів тестування нових типів рухомого складу для прийняття рішення про відповідність ЕРС вимогам нормативних документів, а також і на етапі експлуатації при визначенні причин збоїв в роботі РК. Модель є корисною

також на етапі розробки та проектування нових систем електрорухомого складу та систем сигналізації і зв'язку.

1.3. Електрорухомий складу як джерело гармонік тягового струму

Головним носієм завад в рейкових лініях є зворотний тяговий струм. Завади в тяговому струмі генеруються:

- електрорухомим складом;
- тяговою підстанцією;
- зовнішніми джерелами.

Значення і гармонійний склад тягового струму визначається режимом роботи тягового двигуна, комутаційним обладнанням тягового приводу [4, 32-35, 65-70, 72, 106].

Електрорухомий склад при електротязі постійного струму з тяговими колекторними двигунами постійного струму живиться випрямленим струмом від тягової підстанції, що містить основні гармоніки, частоти яких визначаються типом випрямляча. В напрузі на виході 12-ти пульсового випрямляча присутні тільки гармоніки з частотами, кратними 600 Гц ($12 \cdot k \cdot 50$ Гц), тобто (600, 1200, 1800 і т. д.) Гц [4]. Внаслідок несиметрії лінійних напруги вентильних обмоток трансформатора можуть виникнути гармоніки, порядок яких визначається виразом $n = 6 \cdot k \cdot 50$ Гц з частотами (300, 600, 900, ...) Гц. Для зменшення напруги гармонік 300, 600, 1500 Гц, які є невластивими для 12-ти пульсової схеми випрямлення, на практиці підбирають необхідну кількість витків вентильної обмотки тягових трансформаторів таким чином, щоби не симетрія їх лінійних напруги не перевищувала 0,2 %. В реальних трансформаторах ТРДП-12300/10Ж для 12-ти пульсових випрямлячів з послідовним з'єднанням мостів, не симетрія лінійних напруги вентильних обмоток складає всього 0,074 % і її впливом можна знехтувати [146, 148-150]. Не синусоїдальність живлячої напруги, яка обумовлена наявністю в її складі вищих гармонік, може привести до появи в випрямленій напрузі гармонік порядку

$n = 6 \cdot k \cdot 50$ Гц з непарним k (300, 900, 1500, ...) Гц. Амплітудне значення гармонік в випрямленому струмі зменшується зі збільшенням порядку гармоніки.

Для згладжування цих гармонік на тягових підстанціях використовують пасивні фільтри [4, 145-150], які містять низку резонансних ланцюгів (з конденсаторами і котушками індуктивності), з'єднаних зіркою або трикутником.

Покращені показники 12-ти пульсових випрямлячів дозволяють використовувати одноланкові аперіодичні, резонансно-аперіодичні фільтри [4, 145-150], фільтри з замикаючим контуром [4, 146] або взагалі не використовувати фільтри. В останні часи розробляються і впроваджуються активні електричні фільтри [4, 146–152].

Захист рейкових кіл від гармонійних завад постійного тягового струму було забезпечено при їх розробці вибором сигнальних частот рейкових кіл, які не збігаються з частотами гармонік випрямленої напруги. Досвід експлуатації рейкових кіл показує, що при правильно відрегульованих рейкових колах, при контролі і підтриманні асиметрії рейкових ліній в межах нормативні значень і при відповідності АЧХ вхідних фільтрах РК і АЛСН нормам, – збоїв в роботі РК і АЛСН, викликаних гармоніками тягового струму, не спостерігається. Найбільш розповсюдженою причиною збоїв АЛСН є намагніченість кінців рейок, дефекти кодових трансмітерів і неправильно відрегульована апаратура локомотивних пристроїв АЛСН, але ці проблеми не є предметом дослідження дисертаційної роботи.

Електромагнітні завади обумовлені комутаційними процесами на пантографі при струмозніманні та в колекторно-щітковому вузлі тягових машин електровозу також не впливають суттєво на роботу рейкових кіл, оскільки ці комутаційні процеси згладжуються (одфільтровуються) внаслідок значної індуктивності обмоток тягових двигунів і практично не попадають до рейкової лінії.

При зростанні тягового струму внаслідок збільшення вантажоперевезень на дільницях з тяговою мережею, що проектувалася на менш потужні тягові струми, виникають збої в роботі рейкових кіл внаслідок насичення колійних тра-

нсформаторів, але ця проблема також не є предметом дослідження дисертаційної роботи.

Електровози змінного струму з колекторними двигунами постійного струму оснащені 2-х пульсовими випрямлячами, що встановлені безпосередньо на електровозах. Так випрямлячі з 6-ти пульсовою схемою випрямленням віддають в тягову мережу тяговий струм з частотами, кратними 50 Гц (300, 600, 900 Гц і т.д.) [153-158], які також не впливають на роботу колійних приймачів РК.

Основу інвентарного парку Укрзалізниці становлять локомотиви, які виготовлені в період з 1966 по 1975 роки і на даний час є морально і фізично зношеними і не відповідають сучасним вимогам експлуатації. Середній знос парку електровозів складає більше ніж 90 % [159].

В 2002 році на залізницях України були введені в експлуатацію вантажопасажирські електровози змінного струму з асинхронним тяговим приводом, а з 2012 року на залізницях експлуатуються 10 електропоїздів HRCS2 "Хюндай" та 2 електропоїзди EJ675 "Шкода". В 2014 році були введені в експлуатацію ще 2 електропоїзди «Тарпан» виробництва КВСЗ. Ці поїзди є двосистемними і використовують асинхронний тяговий електропривод, який має переваги в порівнянні з колекторним електроприводом [154-158].

ЕРС з асинхронним тяговим приводом (АТП) та автономними інверторами напруги (АІН) є новим поколінням, що широко використовується у світі впродовж останніх десятиріч. Перевагами електрорухомого складу з АІН та АТП у порівнянні з електроприводом постійного струму є простота в експлуатації і відносно невисока вартість асинхронних тягових двигунів (АТД). До того ж нові типи ЕРС є багатосистемними, що дозволяє функціонувати на залізницях з різним родом тягового струму і значеннями напруги на різних ділянках.

За результатами вимірювань і комп'ютерного моделювання, проведеними автором роботи, встановлено що при знаходженні двох і більше електровозів з асинхронним тяговим приводом в межах однієї фідерної зони, в рейковій лінії можуть виникати завади, які перевищують допустимий безпечний рівень, що мо-

же привести до збою в роботі пристроїв сигналізації. Тому проблема забезпечення електромагнітної сумісності ЕРС нового покоління, що вводиться в експлуатацію на залізницях України, вимагає проведення досліджень з цієї проблеми для наукового обґрунтування методів підтримки високої функціональної безпеки рейкових кіл при масовому впровадженні ЕРС з АТД та АІН.

1.4. Особливості функціонування асинхронного тягового приводу

Асинхронний тяговий привод складається з наступних основних елементів: тягового трансформатора (ТТ), мережевого фільтру, чотирьох квадрантного перетворювача електроенергії (4qS), ланки постійної напруги (ЛПН), автономного інвертору напруги (АІН), асинхронного тягового двигуна (АТД) та система керування [154-158] (рис. 1.3).

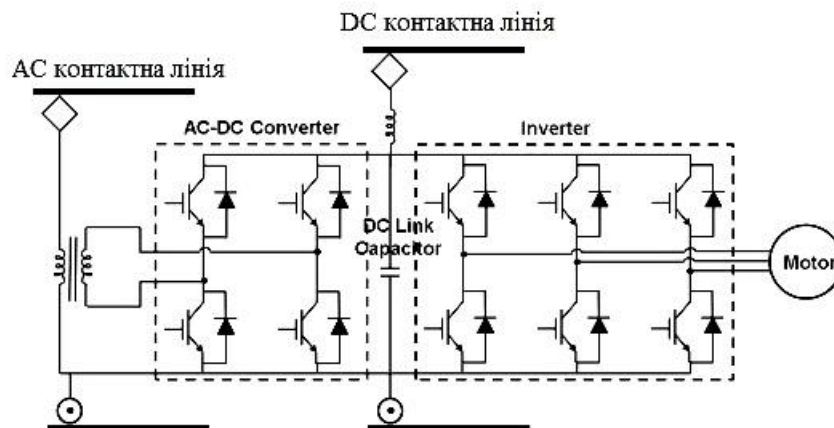


Рисунок 1.2 - Загальна структура побудови схеми силових кіл ЕРС з АТП

Чотирьох квадрантний регулятор виконується за схемою керованого випрямляча з IGBT транзисторами в якості керованих ключів, що мають переваги перед тиристорами. Автономний інвертор перетворює постійну напругу з ЛПН на трифазну змінну напругу. Частота трифазної напруги визначає швидкість обертання асинхронного двигуна [154-158].

При живленні від контактної мережі змінного струму напруга подається на тяговий трансформатор. При живленні від мережі постійного струму можлива реалізація, коли напруга подається безпосередньо на чотириквADRANTНИЙ перетворювач або до ланки постійної напруги.

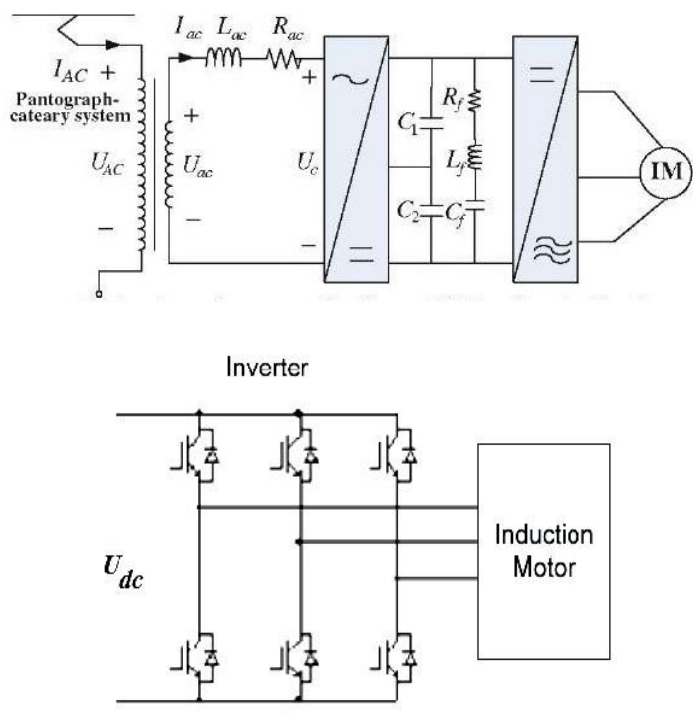


Рисунок 1.3 - Структурна схема силового кола електропоїзда (а) і АІН (b)

У інверторі з ШІМ (рис. 1.3(b)) для регулювання вихідної напруги змінюють співвідношення між інтервалами підключення виводів двигуна до джерела живлення протягом одного періоду вихідної напруги і, тим самим, змінюють глибину регулювання вихідної напруги, яку характеризує коефіцієнт регулювання K_p [153-158].

Діюче значення першої гармоніки фазної напруги дорівнює [153-158]

$$U_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d K_p. \quad (1.1)$$

Відповідно середній струм на вході інвертора з ШІМ

$$I_d = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_d} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_1 \cos \varphi_1 K_p. \quad (1.2)$$

Коефіцієнт регулювання K_p змінюється від нуля до одиниці. У процесі регулювання частота комутацій ключових елементів (транзисторів) однієї фази дорівнює $f_{кф} = n_k f_1$, де n_k – кратність частоти комутацій.

Період вихідної напруги T_1 розбивається на N рівних інтервалів (в розглянутому прикладі на рис. 2.4 $N = 9$). Розгортаючий сигнал трикутної форми U_p має частоту $f_n = Nf_1$.

$$F(t) = B \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(\omega_T t + \frac{\pi}{2} \right) \right]; \quad (1.3)$$

Модулюючий синусоїдальний сигнал U_m має частоту першої гармоніки вихідної напруги інвертора f_1

$$F_M(t) = A \sin \omega_N t. \quad (1.4)$$

Відношення амплітуд сигналів $U_m/U_p = \mu$ називають глибиною модуляції. При регулюванні вихідної напруги μ змінюється від 0 до 1. тому кратність комутацій n_k в інвертори з синусоїдальної ШІМ дорівнює N .

Моменти комутації інвертора відповідають точкам перетину на графіку (рис. 1.4) сигналів U_m и U_p , відповідно сигнали на включення ключового елемента (транзистора VT1) визначаються виразом

$$s_1 = \text{comp} [F_M(t) - F_T(t)], \quad (1.5)$$

де $\text{comp}(X)$ – функція порівняння (компаратор):

$$\text{comp}(X) = \begin{cases} 1 \text{ при } X > 0 \\ 0 \text{ при } X \leq 0 \end{cases}, \quad (1.6)$$

де S_1 – логічна змінна, що визначає стан ключового елемента, а саме, – $S_1 = 1$ – транзистор включений, $S_1 = 0$ – транзистор вимкнений).

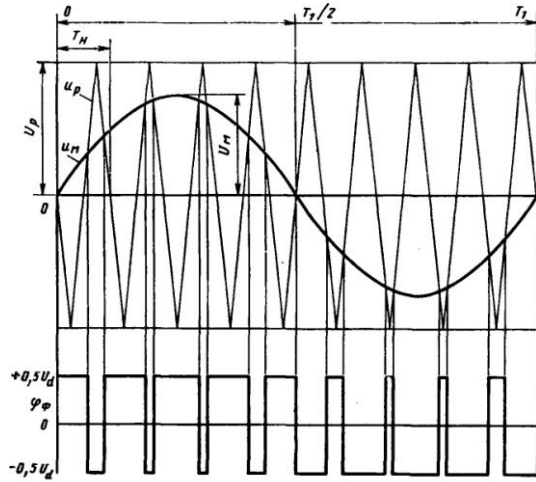


Рисунок 1.4 - Діаграми модулюючої і розгортаючої напруги ($N = 9$)

Графіки потенціалів трьох фаз – $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ при $N = 9$ наведені на рис. 1.5.

При розкладанні кривої напруги інвертора в ряд Фур'є поряд з основною гармонікою, яка має частоту модулюючого сигналу f_1 , присутні гармоніки з комбінаційними частотами $|(mf_n + nf_1)|$, де $n = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$ і $m = 1; 2; 3; \dots$. Амплітуди напруги гармонік залежать від кратності комутацій n_k і від коефіцієнта регулювання K_p .

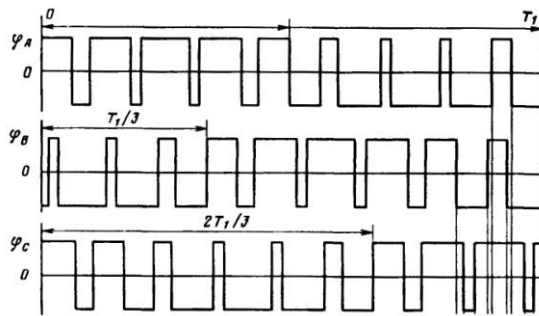


Рисунок 1.5 - Графіки потенціалів інвертора ($N=9$)

Проблеми ЕМС на залізничному транспорті необхідно вирішувати в межах відкритого європейського ринку залізничних перевезень. Така постановка задачі обумовлена в перспективі організації вільного приїзду поїздів через державні ко-

рдони країн Євросоюзу з різними системами сигналізації та зв'язку, тягового електропостачання та типами електрорухомого складу.

Нові типи ЕРС мають пройти перед введенням в експлуатацію приймальним випробуванням відповідно до нормативних документів, які обов'язково містять випробування на ЕМС [65, 66, 106]. До недавнього часу випробування на ЕМС в Україні провадили відповідно до нормативних документів НБ ЖТ ЦТ 04-98 "Електровози. Норми безпеки", НБ ЖТ ЦТ 03-98 "Електропоїзди. Норми безпеки", а радіозавади контролювали відповідно до ГОСТ 29205-91 "Радіозавади індустриальні від електротранспорту".

У 2004 році у ЄС була прийнята Директива 2004/108/ЄС "Electromagnetic compatibility directive (EMC)", що сформулювала вимоги до ЕМС продукції для залізничного транспорту. Ця директива є обов'язковою для виробників і дистриб'юторів продукції. Нова директива на електромагнітну сумісність 2014/30/EU була розроблена 18.04 2014 [128, 131].

Таким чином, розробку програм і методик випробування нових типів ЕРС необхідно провадити орієнтуючись на національні системи, але з урахуванням нормативних документів ЄС, що пов'язано з перспективами розширення кооперації українських залізниць на шляху інтеграції у європейські залізниці.

Стандарт EN 50121 (2006) складається з п'яти частин [48-57] і призначений для забезпечення ЕМС продукції залізничного транспорту відповідно до вимог Директиви з ЕМС. Перша частина стандарту (EN 50121-1: 2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 1: General) [48] вводить в проблему, надає огляд структуру і зміст інших частин стандарту EN50121, визначає критерії функціонування залізниці і розглядає процес досягнення ЕМС між залізничною інфраструктурою та поїздом.

Частина 2 стандарту (EN 50121-2 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world) [49] розглядає взаємодію між залізницею і навколишнім середовищем, встановлює

граничні значення електромагнітних завад, включаючи електричні тягові підстанції та надає методи вимірювання завад.

Частина 3 стандарту складається з двох підрозділів [50, 51].

Підрозділ 3-1 (EN 50121-3-1 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-1: Rolling stock - Train and complete vehicle) конкретизує вимоги до параметрів електромагнітних завад і значення завадозахищеності для рухомого складу, а також наводить методи їх вимірювання.

Підрозділ 3-2 стандарту (EN 50121-3-2 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock - Apparatus) приводить значення максимально допустимих рівнів завад, критерії завадозахищеності для апаратури ЕРС в діапазоні частот від 0 до 400 ГГц.

Частина 4 стандарту (EN 50121-4 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus) [52] визначає норми з ЕМС для сигнальної та телекомунікаційну апаратуру, а також методи вимірювань ЕМ завад.

Частина 5 стандарту (EN 50121-5 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus) [56] визначає норми з ЕМС для систем, що використовуються в залізничних пристроях електропостачання. Наведені граничні значення електромагнітної емісії [56].

Слід зазначити, що Європейськими нормами відмічено значна розбіжність в технічному оснащенні європейських залізниць, в яких застосовується близько тридцяти різних систем управління поїздів декілька видів систем електропостачання, різні стандарти на залізничну колію та інше [128, 131]. В такій ситуації загальні норми, що декларуються європейськими стандартами мають бути застосовані з урахуванням національних особливостей залізниць кожної країни. Системи управління рухом поїздів та тягового електропостачання суттєво відрізняються від Європейських.

Стандарт CENELEC - EN 50238-1 [57] наводить загальні положення з EMC рухомого складу і систем управління рухом поїздів. Визначені основні положення про тестування ЕРС і відмічена необхідність враховувати специфіку національних систем сигналізації. Методи вимірювання завад відповідно до CENELEC - CLC / TS 50238-2 [55] наведено на рис. 1.6. Стандарт зазначає, що для колійних датчиків і рейкових кіл з іншими параметрами і конструкцією необхідно застосовувати національні норми та галузеві інструкції.

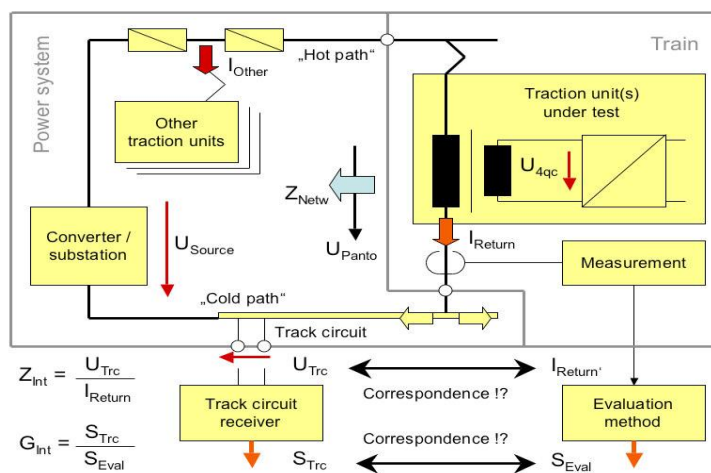


Рисунок 1.6 - Схематичне пояснення методу вимірювання завад згідно TS 50238-2

1.5. Захист комунікаційних ліній від індуктивного впливу тягового струму змінного струму

Різні аспекти захисту комунікаційних ліній від індуктивного впливу тягового струму змінного струму достатньо повно розглянуто в літературі [1, 5, 6, 30, 37, 56]. Методи захисту комунікаційних ліній від індуктивного впливу розділяють на пасивні та активні. До активних систем захисту відносять відсмоктуючі трансформатори, екрануючий провід. Ці системи використовуються для захисту повітряних і кабельних ліній різноманітного призначення від індуктивного впливу тягової мережі змінного струму, головним чином від основної гармоніки частотою 50 Гц, а також від інших потужних гармонік в тональному діапазоні частот. Викори-

стання їх для захисту рейкових кіл є неефективним. Перехід на кабельні телекомунікаційні лінії з металевою захисною оболонкою, а у подальшому на оптоволоконні лінії автоматики і телекомунікації привели до того, що ці системи не проектується для нових систем.

В Європейських країнах для каналізації зворотного тягового струму використовують окремий фідер, що кріпиться на опорах контактної мережі і зменшує індуктивний вплив контактної мережі на телекомунікаційні лінії. На високошвидкісних магістралях використовують систему електропостачання типу "два проводирейка", що також суттєво зменшує індуктивний вплив електрифікованих залізниць на лінії комунікації.

Розглянемо коротко системи активного захисту ліній комунікації від індуктивного впливу тягового електропостачання змінного струму.

Відсмоктувачі трансформатори (ВТ). Первинну обмотку ВТ включають у розрив контактної мережі, а вторинну – у розрив зворотного проводу, з'єднаного з рейками, або підключають послідовно до рейок в районі ізолюючих стиків рис. 1.7 [6, 29, 30, 37].

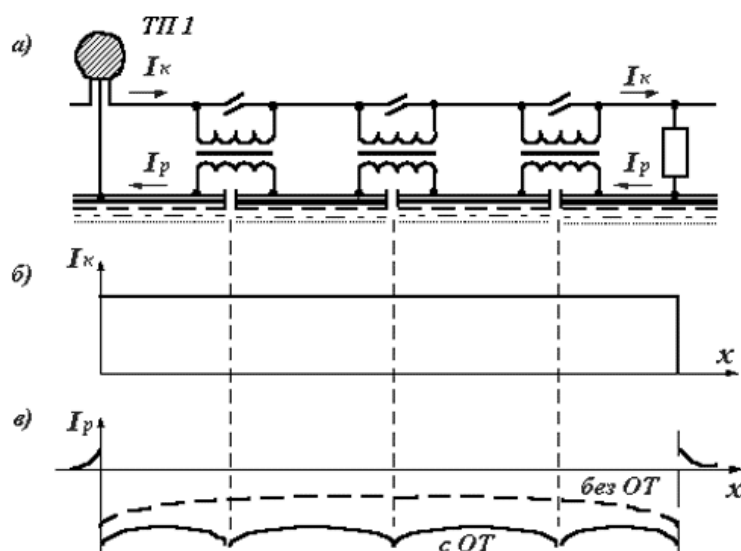


Рисунок 1.7 - Схема включення відсмоктувачів трансформаторів Схема включення ВТ без зворотного проводу (а) та діаграми струмів в проводах системи (б)

Як видно з діаграми струмів при включенні ВТ зворотний струм в рейках значно зростає, чим і досягається ефект ослаблення індуктивного впливу тягової мережі. Але збільшення тягового струму в рейках веде до збільшення гармонік в рейкових колах і, відповідно, до збільшення тягового струму в дросель-трансформаторах, що збільшує ймовірність збоїв в роботі рейкових кіл. До того ж обладнання ділянки системою з ВТ потребує - 1 т/км кольорових металів [6, 29, 30].

1.6. Екрануючий провід був запропонований для зменшення від індуктивно-го впливу тягового електропостачання змінного струму на лінії зв'язку

В роботах [122, 123] було запропоновано використання активного екрануючого проводу для захисту рейкових кіл колії з електротягою постійного струму від електромагнітного впливу колії з електротягою змінного струму при зближенні і паралельному проходженні двох колій з різним родом тягового струму. Для підвищення ефективності захисту рейкових кіл був запропонований новий спосіб і пристрій з екрануючим проводом (названий активним екрануючим проводом), який відрізняється від існуючих тим, що значення струм гармонік в екрануючому проводі регулюється в залежності від струму гармонік в рейках колії [122]. В роботах [123] було підтверджено ефективність запропонованого способу математичним моделюванням. Пізніше ці результати були повторені і підтверджені в роботах [126, 127]. Але слід зауважити, що такий метод більш придатний для захисту ліній зв'язку, оскільки в них індуктуються однаковий струм гармонік по всій довжині. Тональні рейкові кола на перегоні мають довжину від 200 м до 1000 м, причому частота в суміжних рейкових колах є різною і та частота, що була заважаючою для одного рейкового кола є основною частотою сигнального струму для іншого. Тому варіювання рівнів струму з різними частотами через певні проміжки по довжині одного і того ж проводу є малопродатним для практичного викорис-

тання. До того ж це може бути фактором додаткового ризику появи збоїв рейкових кіл внаслідок збоїв в роботі компенсуючого пристрою. Використання активного екрануючого проводу для компенсації завад в коліях з одним родом тягового струму не має практичного інтересу.

1.7. Висновки, постановка мети і задач досліджень

З аналітичного огляду літератури зроблено висновок, що нові типи двосистемних електропоїздів з асинхронним тяговим приводом, що почали впроваджуватися в Україні в останнє десятиріччя, є джерелом потужних електромагнітних завад в широкому діапазоні частот, які здатні викликати збої в роботі рейкових кіл (РК) і автоматичної локомотивної сигналізації (АЛСН) і приводити до небезпечних для руху поїздів ситуацій. Таким чином завдання з підвищення функціональної безпеки РК шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з новими типами рухомого складу є актуальним.

На підставі проведеного аналізу була сформульована мета і задачі досліджень.

Метою дисертаційної роботи є підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з РК.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів та засобів забезпечення функціональної безпеки рейкових кіл при впровадженні та експлуатації нових типів рухомого складу з асинхронним тяговим приводом з урахуванням впливу на них електромагнітних завад від ЕРС;
- розробити математичну модель АПК для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС в рейках, що дозволяє провести вибір параметрів апаратних і програмних компонентів комплексу для забезпечення необхідного динаміч-

ного діапазону, точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад;

- удосконалити математичну модель АПК для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС в рейках з урахуванням взаємодії всіх його компоненти, що дозволить науково обґрунтувати рекомендації щодо вибору параметрів АПК для забезпечення необхідної точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад;
- розробити математичну модель протікання електричних завад від декількох одиниць ЕРС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії, яка дозволить визначити ступінь впливу завад на рейкові кола;
- удосконалити математичну модель впливу гармонічних завад на колійний приймач ТРК з урахуванням амплітуди, частоти і фазового зсуву гармонік ТС відносно частоти сигнального струму для визначення параметрів електричних завад, які можуть привести до збою в роботі РК в нормальному, шунтовому та контрольному режимах роботи;
- розробити та науково обґрунтувати метод підвищення функціональної безпеки, який базується на використанні вейвлет-аналізу сигнального струму на вході колійного приймача ТРК та класифікатора на основі штучних нейронних мереж, що дозволить виявити наднормовані електричні завади та спотворення сигнального струму і своєчасно попередити виникнення небезпечної ситуації;
- розробити, науково обґрунтувати і дослідити ефективність методу підвищення функціональної безпеки тональних рейкових кіл, який базується на використанні адаптивної нечіткої нейронної мережі (АННМ) для контролю параметрів струму в ТРК, що дозволить своєчасно виявити спотворення сигнального струму на початковому етапі їх виникнення та провадити моніторинг їх розвитку і, як наслідок, прогнозувати час виникнення небезпечної відмови та перейти у подальшому до обслуговуванню ТРК з урахуванням їх фактичного стану.

РОЗДІЛ 2.

НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВІД ЕРС

2.1. Загальне формулювання завдання

Як зазначено у літературному огляді електромагнітні завади різної природи здатні викликати збої в роботі рейкових кіл [1-5], зокрема небезпечні збої, які можуть призвести до виникнення аварійної ситуації. Це пред'являє суворі вимоги [18-22, 32-35] до точності вимірювання параметрів електричних завад в рейкових колах, а саме, рівня завад, їх частоти.

Граничні рівні електричних завад і їх максимально допустиме значення тривалості у смугах частот, що відповідають робочим частотам рейкових кіл, визначені нормативними документами [48-55, 65, 66, 97, 98, 130, 133]. Значення тривалості завад з визначеними в нормативних документах частотами не можуть бути більшими, ніж 0,3 с для кодових рейкових кіл і 0,6 с для тональних рейкових кіл []. Згідно до Європейського стандарту [66] спектральний аналіз тягового струму пропонується провадити за допомогою дискретного перетворення Фур'є з використанням віконних функцій (у більшості випадків за допомогою функції Ханна) або, використовуючи смуговий фільтр з вікном певної довжини [66].

Зазначені параметри електромагнітних завад у тяговому струмі (ТС) в діапазонах частот, визначених нормативними документами, вимірюють шляхом подавання сигналу, пропорційного тяговому струму, після перетворення його у цифровий код до банку паралельно з'єднаних фільтрів зі смугами пропускання пропускання, що відповідають смугам приймачів рейкових кіл. Параметри завад вимірюють на виході смугових фільтрів. Іншим способом вимірювання параметрів завад є спосіб, що базується на використанні швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [90-92, 97, 98]. Очевидно обидва ці способи накладають певну похибку на результати вимірювання. При використанні смугових фільтрів необхідно визначити не-

обхідні амплітудно-частотні характеристики фільтрів, оскільки середньоквадратичні значення напруги на виході фільтру визначається СКЗ і спектральним складом вхідного сигналу, а також шириною смуги пропускання фільтру. Європейські нормативні документи визначають параметри смугових фільтрів [55], але обумовлюють, що застосування норм має провадитися з урахуванням особливостей національних систем сигналізації. Тому вибір параметрів смугових фільтрів для вимірювання в рейкових колах, що використовуються на українських залізницях, потребує додаткових досліджень, наукового обґрунтування і затвердження в національних галузевих нормативах.

Відповідно при вимірюваннях рівня електромагнітних завад в рейкових колах найбільше поширення набуло використання спектрального аналізу з використанням перетворення Фур'є. Тяговий струм є неперіодичним і нестационарним у широкому розумінні цього поняття, тому для спектрального аналізу правильним є використання короткочасного перетворення Фур'є (КЧПФ) [76, 80, 81, 87].

Очевидно, що загальна похибка вимірювань визначається похибками всіх ланок вимірювальної системи. Технічні параметри і характеристики АЦП наведені у технічних специфікаціях виробника та описані у значній кількості робіт [76-79]. Але необхідно зауважити, що параметри, які характеризують АЦП, можуть по різному трактуватися у технічних специфікаціях різних виробників.

АЦП є тільки одним ланцюгом у вимірювальному апаратно-програмному комплексі і вирішення проблеми раціонального вибору параметрів АПК потребує проведення досліджень і аналізу з урахуванням параметрів всіх елементів комплексу в їх взаємозв'язку, а також з урахуванням вимог і обмежень, що накладають нормативні документи.

До того ж вимоги для забезпечення раціонального вибору параметрів вимірювального комплексу з точки зору точності вимірювання, є дещо взаємно суперечливими, наприклад, підвищення точності визначення тривалості завади супроводжується зменшенням точності визначення частоти гармоніки. Тому задачу за-

безпечення заданої точності спектрального аналізу необхідно вирішувати в комплексі.

В [66], спираючись на наведені в європейському стандарті [55] методи обробки записів змінної складової тягового струму, провели аналіз експериментальних результатів, отриманих в експлуатаційних умовах під час руху електропоїзду "Сапсан". Аналіз складових тягового струму проведено у робочій смузі рейкових кіл типу ТРК-3 шляхом використання дискретного перетворення Фур'є з вікном Ханна з перекриванням 75 %. В результаті аналізу було визначено СКЗ одиночної гармоніки тривалістю 0,6 с, яка може привести до збою в роботі тональних рейкових кіл. Встановлено, що співвідношення між експериментальним значенням СКЗ електромагнітної завади, визначеним на основі ДПФ, і нормативним значенням еквівалентного синусоїдального сигналу залежить від характеристики завади.

Детального аналізу щодо вибору параметрів апаратної і програмної частини вимірювального комплексу для забезпечення необхідної точності визначення параметрів гармонік тягового струму, яка відповідає вимогам галузевих нормативних документів по забезпеченню електромагнітної сумісності тягового струму з пристроями сигналізації і зв'язку, зокрема з рейковими колами, в літературі немає.

В той же час раціональний вибір параметрів вимірювальної системи має базуватися на специфічних особливостях конкретної системи, у випадку, що розглядається, – на особливостях систем сигналізації і електрорухомого складу, що має бути випробуваним.

Тому метою поставленої в цьому розділі задачі є наукове обґрунтування раціонального вибору параметрів і характеристик структурних елементів апаратно-програмного комплексу (АПК) для вимірювання параметрів гармонік тягового струму за критеріями забезпечення необхідної точності і роздільної здатності амплітуди, частоти і тривалості гармонік, значення яких визначені у відповідності до вимог із забезпечення електромагнітної сумісності тягового струму з лініями сигналізації та зв'язку (зокрема з рейковими колами).

Для цього розглянуто критерії вибору параметрів АПК і вплив параметрів та характеристики АЦП на точність визначення параметрів гармонік. Також розглянуто точність і роздільну здатність у часовій і частотній області спектрального аналізу тягового струму на основі швидкого перетворення Фур'є.

2.2. Апаратно-програмний комплекс для вимірювання гармонійних завад в тяговому струмі

Апаратно-програмний комплекс (АПК) для вимірювання гармонійних завад в тяговому струмі [99, 100] складається з первинного безконтактного перетворювача тягового струму у напругу (Π), пристрою узгодження (УП), аналогового антиалазінгового фільтру (АФ), аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і програмного комплексу (в нашому випадку ноутбука), який виконує швидке перетворення Фур'є з представленням спектру ТС у табличному або графічному вигляді (рис. 2.1). В якості первинного перетворювача використовується котушка Роговського або датчик струму на основі ефекту Холла [99]. Частота зрізу НЧ антиалазінгового фільтру вибирається з урахуванням частоти Найквіста і теореми Котельникова [75, 81].

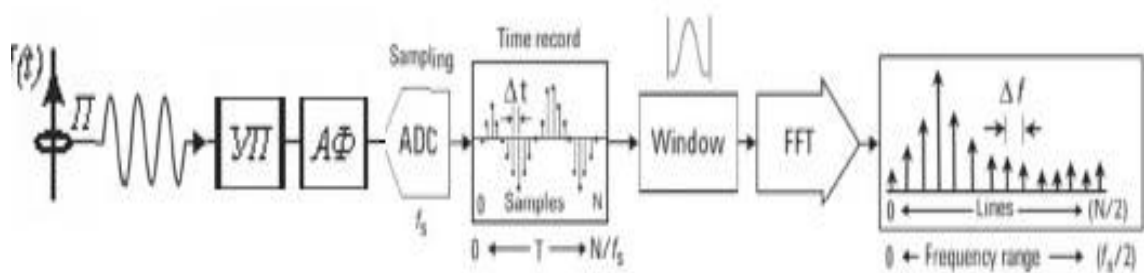


Рисунок 2.1 - Загальна структурна схема АПК для спектрального аналізу тягового струму [99]

Параметри і характеристики АПК мають задовольняти певним вимогам, що визначаються параметрами тягового струму, а також вимогам нормативних документів щодо точності визначення значення струму, частоти (частотних інтервалів) і тривалості гармонійних завад.

Технічні параметри і характеристики АЦП наведені у технічних специфікаціях виробника та описані у значній кількості робіт [76-79]. Слід зазначити, що параметри, що характеризують точність АЦП, можуть по різному трактуватися у технічних специфікаціях різних виробників. АЦП є тільки одним ланцюгом у вимірювальному апаратно-програмному комплексі і вирішення проблеми раціонального вибору параметрів АПК потребує проведення досліджень і аналізу з урахуванням впливу параметрів всіх елементів комплексу в їх взаємозв'язку, а також з урахуванням вимог і обмежень, що накладають нормативні документи.

Програмна частина комплексу призначена для виконання спектрального аналізу з використанням короткочасне перетворення Фур'є (КЧПФ). Короткочасне перетворення Фур'є широко описано в літературі [75, 80, 81]. Вибір типу віконної функції, її параметрів, як і параметрів КЧПФ залежить від конкретного застосування спектрального аналізу.

Згідно з вимогами нормативних документів при випробуванні електрорухомого складу на електромагнітне сумісність з рейковими колами необхідно вимірювати середнє-квадратичне значення (СКЗ) гармонійних завад на певних частотах (або в певних частотних смугах), що відповідають частотам роботи пристроїв СЦБ, а також вимірювати тривалість цих завад. Очевидно коректність визначення відповідності ЕРС вимогам нормативних документів з ЕМС рухомого складу з пристроями сигналізації та зв'язку залежить від точності одночасного визначення трьох параметрів електромагнітних завад, а саме: рівня, частоти і тривалості всіх завад з частотами, що зазначені у нормативах. Враховуючи, що тяговий струм є нестационарним у широкому сенсі, акуратне вимірювання цих параметрів є нетривіальною задачею.

2.3. Похибки АПК при вимірювання параметрів гармонік

Загальна відносна похибка АПК δ_{total} , за умовою, що похибки від підсистем комплексу є незалежними між собою і носять випадковий характер, може бути

визначена як СКЗ від відносних похибок δ_i що виникають в окремих ланках пристрою

$$\delta_{total} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2} . \quad (2.1)$$

Питання оптимізації аналогового інтерфейсу інформаційно-вимірювальних систем достатньо повно проаналізовано у [82]. В даному розділі розглянуто похибки, що виникають внаслідок аналогово-цифрового перетворення.

Основні інструментальні похибки АЦП розглянуто у багатьох публікаціях [76-79], і ці похибки обумовлені тим, що статичні і динамічні параметри перетворювача не є ідеальними.

Статичні параметри обумовлюють чотири типи похибок, що виникають внаслідок зсуву нуля, зміни коефіцієнта підсилення, а також інтегральної та диференціальної нелінійності.

Похибка зсуву нуля обумовлена паралельним зміщенням реальної характеристики АЦП вздовж осі абсцис і визначається дійсним значенням вхідної напруги в точці характеристики перетворення з віссю, що відповідає номінальному нульовому значенню цієї напруги. Абсолютна та відносна приведена похибка зміщення нуля визначається як [76-79]

$$\varepsilon_{OE} = U_{IN0_1} - \frac{U_{LSB}}{2} ; \quad (2.2)$$

$$\delta_{FSR} = \frac{\varepsilon_{OE}}{U_{FSR}} \cdot 100\% . \quad (2.3)$$

Похибкою повної шкали є відносна різниця між реальним і ідеальним значеннями повної шкали ε_{FSR} при відсутності зсуву нуля, і відносна похибка повної шкали визначається як 76-79

$$\delta_{FSR} = \frac{\varepsilon_{FSR}}{U_{FSR}} \cdot 100\% . \quad (2.4)$$

Похибки повної шкали та зсуву нуля можуть бути зменшені підстроюванням аналогової частини схеми, або корекцією обчислювального алгоритму цифрової частини пристрою [76-79].

Похибка коефіцієнта перетворення АЦП є мультиплікативною похибкою і характеризується відхиленням реального коефіцієнта перетворення АЦП від номінального.

Нелінійність АЦП визначається як максимальне відхилення реальної характеристики залежності вихідного коду АЦП від вхідної напруги. Нелінійність зазвичай визначається у відносних одиницях, або у долях від молодшого значущого розряду LSB.

Диференціальна нелінійність АЦП в даній точці характеристики є різниця між значенням кроку перетворення в даній точці і середнім значенням кроку перетворення. В специфікаціях на АЦП значення диференціальної нелінійності надається у долях від молодшого значущого розряду LSB або процентах від повної шкали.

Похибки квантування є наслідком обмеженої розрядності АЦП. Цей недолік не може бути усунений для жодного типу аналого-цифрового перетворювання.

Абсолютна величина помилки квантування кожного відліку знаходиться в межах від нуля до половини МЗР. Як правило, амплітуда вхідного сигналу значно більша, ніж МЗР. В цьому випадку помилка квантування не корельовано з сигналом і має рівномірний розподіл [76-79].

Сигнал похибки квантування від вхідного лінійного сигналу апроксимується сигналом пилкоподібної форми з максимальним розмахом q , і його середньоква-

дратичне значення дорівнює $\frac{q}{\sqrt{12}}$

Апертурна похибка обумовлена нерівномірністю (флуктуацією) вибірки відліків внаслідок тремтіння фронту синхросигналу (clock jitter). Апертурна похибка відносно невелика на низьких частотах, але на великих частотах вона може

суттєво вплинути на результат. Апертурною похибкою можна знехтувати, якщо її значення менше в порівнянні з похибкою квантування.

2.4. Математична модель апаратно-програмного комплексу.

2.4.1. Забезпечення роздільної здатності АПК за амплітудою завад.

Для вирішення цього завдання наукового обґрунтування вибору параметрів апаратної та програмної частини комплексу з метою підвищення точності вимірювання амплітуди, частоти та тривалості електричних завад в діапазонах частот, зазначених у нормативній документації було розроблено математичну модель апаратно-програмного комплексу [99, 100].

Граничні умови для математичної моделі АПК.

Проблема раціонального вибору параметрів АПК полягає в жорстких вимогах нормативних документів щодо точності вимірювання параметрів гармонік тягового струму. У відповідності з цими вимогами складено граничні умови для математичної моделі АПК в такому вигляді:

- відношення сигналу до шуму і динамічний діапазон АПК за вхідним сигналом має забезпечувати вимірювання тягового струму і його гармонік в інтервалі, що найменше, від 10 мА до 360 А (для тяги змінного струму);
- відносна похибка визначення рівня завад в смугах частот роботи рейкових кіл має бути не більше 2,5 %;
- частотний діапазон АПК має бути від 0 до $f_{\max} = 6000$ Гц;
- роздільна здатність за частотою має бути не менше ± 1 Гц для частотного діапазону від 19 до 31 Гц; ± 6 Гц для частотних діапазонів ТРЦ-3; та ± 19 Гц для частотних діапазонів ТРЦ-4;
- роздільна здатність за тривалістю завади має бути не більше 0,3 с для кодових і фазочутливих РК, і не більше 0,6 с для ТРК.

- Завдання раціонального вибору параметрів АПК ускладнюється великим динамічним діапазоном гармонік тягового струму (більше ніж 91 дБ), значним частотним діапазоном гармонік та неможливістю розділення гармонік з близькими частотами внаслідок розмивання спектру ТС і неможливістю досягнення необхідної точності за частотою і тривалістю гармоніки одночасно внаслідок принципу невизначеності. Слід зазначити, що визначення параметрів підсистем АПК для спектрального аналізу ТС з урахуванням взаємного впливу апаратних і програмних компонентів комплексу раніше не вирішувалося.

Приймаючи, що вхідний перетворювач тягового струму (П) і антиайлазінговий фільтр (АФ) вимірювального комплексу (рис. 2.1), вибрані таким чином, що в межах від нульового до максимального значення тягового струму їх передаточна характеристика є лінійною, динамічний діапазон АПК визначається значною мірою динамічним діапазоном АЦП.

Відповідно задача забезпечення необхідного динамічного діапазону АПК зводиться до задачі правильного вибору розрядності АЦП з урахуванням впливу ШПФ.

Динамічний діапазон АЦП дорівнює відношенню найбільшого неспотвореного сигналу в каналі до мінімального сигналу, що можна розрізнити. Цей сигнал для більшості випадків дорівнює рівню, обумовленому шумом АЦП. Шум АЦП може бути різної природи, але найбільш значущим для ідеального перетворювача є шум квантування.

Динамічний діапазон тягового струму визначається як відношення СКЗ основної (найбільшої) гармоніки тягового струму частотою f_1 ($I_{f_1 \max}$) до СКЗ найменшої гармоніки тягового струму частотою f_2 ($I_{f_2 \max}$) [99]

$$D_{TC} = 20 \lg \left(\frac{I_{f_1 \max}}{I_{f_2 \min}} \right) \quad (2.5)$$

Але динамічний діапазон апаратно програмного комплексу має бути більшим ніж динамічний діапазон тягового струму D_{TC} для забезпечення нормальної роботи вимірювального комплексу при можливих тимчасових комутаційних збільшеннях тягового струму, а також для врахування додаткових факторів, непередбачених розрахунковими формулами, а саме [99]:

$$D_{АПК} \geq D_{TC} + D_{ЗАП} + D_{PЗ} + D_{ДОД} \quad (\text{дБ}), \quad (2.6)$$

де $D_{ЗАП}$ враховує запас АЦП за вхідною напругою для захисту від можливих перенапруг при підвищенні тягового струму в K_0 раз внаслідок комутаційних процесів

$$D_0 = 20 \lg(K_0) \cdot \text{де } K_0 = I_{0\max} / I_0. \quad (2.7)$$

Максимальна вхідна напруга на вході АЦП, яка відповідає максимальному тяговому струму, має бути не більшою ніж напруга повної шкали U_{FSR} .

Так для $K_0=1,2$, – $D_{ЗАП} \approx 1,58$. $D_{PЗ}$ в (2.6) – доданок, що має забезпечити необхідну роздільну здатність АПК $U_{PЗ}$ значення якого у децибелах визначається виразом $D_{PЗ} = 20 \lg(U_{\min} / U_{PЗ})$. $D_{ДОД}$ в (2.6) враховує додаткові непередбачені при розрахунках фактори. На практиці рекомендовано брати це значення на рівні $D_{ДОД} \approx (0,5..1) \text{ дБ}$ [78].

Приймаючи, що вхідний перетворювач тягового струму (П) і антиалайзінговий фільтр (АФ) вимірювального комплексу (рис. 2.1), вибрані таким чином, що в межах від нульового до максимального значення тягового струму їх передаточна характеристика є лінійною, динамічний діапазон АПК визначається на першому етапі динамічним діапазоном АЦП.

Відповідно задача забезпечення необхідного динамічного діапазону АПК зводиться до задачі правильного вибору розрядності АЦП з урахуванням впливу ШПФ.

Роздільна здатність АЦП обумовлена теоретичним числом станів ($2N$), котрі АЦП може розрізнити, де N – розрядність (кількість біт) аналогово-цифрового пе-

ретворювача. Роздільна здатність характеризує потенційні можливості АЦП з точки зору досяжної точності. Так, 12-розрядний АЦП має роздільну здатність $1/4096$, або $0,0245\%$ від повної шкали або $72,2$ дБ. Роздільній здатності відповідає крок квантування або напруга молодшого значущого розряду (LSB), який для двійкових кодів перетворення дорівнює

$$U_{LSB} = \frac{U_{FSR}}{2^N}, \quad (2.8)$$

де U_{FSR} - напруга повної шкали АЦП. Похибка ідеального АЦП, обумовлена похибкою квантування, дорівнює $U_{LSB} / 2$.

Абсолютне значення помилки квантування кожного відліку знаходиться в межах від нуля до половини МЗР.

Максимально допустимі за умовами безпечного функціонування рейкових кіл рівні (СКЗ) гармонік тягового струму наведені у табл. 2.1.

АЦП має забезпечити перетворення гармоніки з мінімальною напругою U_{min} на вході АЦП з заданою абсолютною похибкою ΔU_{min} , яка відповідає нормативній документації (табл. 2.1). Відносна похибка вимірювання для гармоніки з мінімальною напругою дорівнює

$$\delta_{АЦП-f} = \frac{\Delta U_{min}}{U_{min}}. \quad (2.9)$$

В якості U_{min} в (2.8) необхідно брати значення максимально допустиме значення, що відповідає значенню мінімальної гармоніки, а саме $U_{min} = 0,2$ для частот ТРК-3 (табл. 2.1).

Таблиця 2.1.

Максимально допустимі рівні (СКЗ) гармонік тягового струму [102, 107, 112]

Тип електропостачання	Частотний інтервал, Гц	Частота, Гц	Максимальне СКЗ струму, А
DC, 3 kV	19-21	25	11,6
	21-29		1,0
	29-31		11,6
	40-46	50	5,0
	46-54		1,3
	54-60		5,0
	4507—4583	4545	0,2
	5517—5593	5555	0,2
AC 50 Hz, 25 kV	15-21	25	4,1
	21-29		1,0
	29-35		4,1
	65-85	75	4,1
	4462-4538	4500	0,2
	5462-5538	5500	0,2
DC, 3 kV and AC 50 Hz, 25 kV	167-184	175	0,4
	408-432	420	0,35
	468-492	480	0,35
	568-592	580	0,35
	708-732	720	0,35
	768-792	780	0,35
	4962-5038	5000	0,2

З урахуванням прийнятого припущення, що перетворювач струму і фільтр є лінійними в заданому динамічному діапазоні можна записати відповідно до (2.7)

$$K_0 = \frac{U_{FSR}}{U_0}. \quad (2.10)$$

Для забезпечення вимірювань напруги на вході АЦП з абсолютною похибкою ΔU_f для частоти, що відповідає мінімальній гармоніці, значення похибки квантування $U_{LSB} / 2$ має бути не більше ніж ΔU_f

$$U_{LSB} / 2 \leq \Delta U_f. \quad (2.11)$$

Відповідно динамічний діапазон АЦП для забезпечення необхідної точності має бути

$$D_{\text{АЦП}} = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{FSR}}}{U_{\text{LSB}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{FSR}}}{2 \Delta U_f} \right). \quad (2.12)$$

З урахуванням (2.5) - (2.9), (2.12) можна записати вираз для динамічного діапазону АЦП для забезпечення необхідної відносної похибки перетворювача для визначення гармоніки з мінімальною амплітудою

$$D_{\text{АЦП}} \geq D_{\text{ТС}} + D_{\text{ЗАП}} + D_{\delta} + D_{\text{ДОД}} \quad (\text{дБ}), \quad (2.13)$$

де

$$D_{\delta} = 20 \lg \left(\frac{1}{2 \delta_{\text{АЦП}}} \right) \quad (2.14)$$

враховує вимогу забезпечення відносної похибки вимірювання не більше ніж $\delta_{\text{АЦП}}$.

Динамічний діапазон АЦП дорівнює відношенню найбільшого неспотвореного сигналу в каналі до мінімального сигналу, що можна розрізнити. Цей сигнал для більшості випадків дорівнює рівню, обумовленому шумом АЦП. Шум АЦП може бути різної природи, але найбільш значущим для ідеального перетворювача є шум квантування.

Відношення сигналу до шуму SNR визначається як відношення потужності сигналу до потужності шуму

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{U_{\text{Signal}}^2}{U_{\text{Noise}}^2} \right) \quad (\text{дБ}). \quad (2.15)$$

Значення $SNR_{\text{АПК}}$ визначається всіма елементами АПК, але воно не може бути меншим за шум квантування АЦП.

Шум квантування обумовлений зміною вихідної напруги АЦП у вигляді пилоподібної ламаної лінії, що має відхилення від вхідної в бік менших і більших значень з максимальною амплітудою U_{LSB} .

Середнє-квадратичне значення відхилення дорівнює $U_{LSB} / \sqrt{12}$. Відповідно, відношення сигналу до шуму, що обумовлений квантуванням АЦП, визначається як [77, 78]

$$SNR_{ADC} = 6,02 \cdot N + 1,76 \text{ (дБ)}, \quad (2.16)$$

де N – розрядність АЦП.

При використанні фільтру, що зменшує полосу частот вхідного сигналу до розміру BW , відношення сигналу до шуму збільшується

$$SNR = 6,02N + 1,76 + 10 \lg \frac{F_s}{2BW} \text{ (дБ)}.$$

При використанні віконного перетворення Фур'є на $SNR_{АПК}$ також впливає число відліків N_w (довжина віконної функції) [77, 78]

$$SNR_{АПК} = SNR_{ADC} + PG = SNR_{ADC} + 10 \lg \left(\frac{N_w}{2} \right). \quad (2.17)$$

Спектральний аналіз тягового струму з віконним перетворення Фур'є проводиться відповідно до формули

$$X_m(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)w(n-mR)e^{-j\omega n}, \quad (2.18)$$

де $w(n)$ – віконна функція довжиною N_w .

Кількість точок віконної функції швидкого перетворення Фур'є дорівнює

$$N_w = 2 \cdot T_w \cdot f_{\max} \cdot K_{f \text{ Запаса}}. \quad (2.19)$$

В такому випадку мінімальна необхідна розрядність АЦП для забезпечення необхідного відношення сигналу до шуму дорівнює

$$N = \text{ceil} \left[\left(SNR_{FFT} - 10 \lg \left(\frac{N_w}{2} \right) \right) / 6,02 \right], \quad (2.20)$$

де ceil – операнд округлення до більшого цілого числа. Проведений аналіз дозволяє визначити необхідну розрядність АЦП на рівні 16 біт і, навіть, 14 біт при правильному виборі ширини вікна N_w .

Таким чином, для конкретної задачі спектрального аналізу, відповідно до наведеного математичного опису, визначається необхідний динамічний діапазон АЦП за формулою (2.13), з якої визначається розрядність АЦП (2.20). Для визначеної розрядності N за формулою (2.17) розраховується відношення "сигнал-шум" при M -точковому швидкому перетворенні Фур'є. Після цього можна знайти ефективне число біт АЦП [78]

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76}{6,02}. \quad (2.21)$$

2.4.2. Забезпечення роздільної здатності за частотою і тривалістю завад.

Тривалість відрізка дискретної функції з числом відліків N_S визначається як [81, 83]

$$\Delta t = N_S / SR, \quad (2.22)$$

де SR є частотою вибірки. Частота дискретизації АЦП вибирається за умови

$$F_s = 2 \cdot f_{\max} \cdot K_{f_{ЗАП}}; \quad (2.23)$$

де $f_{\max} = 5555$ Гц для ТРЦ-4; де $K_{f_{ЗАП}} \geq 4..5$ [99, 100].

Виходячи з властивостей ШПФ можна записати

$$\Delta f = SR / N_{Bin} = SR / N_S. \quad (2.24)$$

Таким чином добуток $\Delta f \Delta t$ має обмежене за рівнем значення, і одночасне збільшення роздільної здатності перетворення Фур'є за частотою і часом не можливо, оскільки ці параметри є взаємно суперечливими, а саме, підвищення роздільної здатності у часовій області веде до зменшення її у частотній області і навпаки. Тому завдання прийнятної значення роздільної здатності за частотою і у часі потребує компромісу між ними.

Для короткочасного перетворення Фур'є (КЧПФ) з віконною функцією $w(t)$ роздільна здатність ШПФ у часі Δt визначається як [57]

$$\Delta t^2 = \frac{\int t^2 |w(t)|^2 dt}{\int |w(t)|^2 dt}. \quad (2.25)$$

Аналогічно, роздільна здатність ШПФ за частотою Δf визначається як [86]

$$\Delta f^2 = \frac{\int f^2 |W(f)|^2 df}{\int |W(f)|^2 df}, \quad (2.26)$$

де $W(f)$ – образ віконної функції $w(t)$ у частотній області.

Частотна роздільна здатність Δf_w для конкретної віконної функції залежить в першу чергу від ширини основного пелюстка віконної функції B_w

$$\Delta f_w = B_w SR / N_w, \quad (2.27)$$

де B_w ширина головного пелюстка віконної функції з числом відліків N_w .

Дві гармоніки можуть бути розділені у спектрі, якщо різниця їх частот Δf є більшою ніж роздільна здатність віконного ШПФ у частотній області Δf_w ($\Delta f > \Delta f_w$) [100].

2.5. Вибір параметрів і характеристик елементів АПК на підставі розробленої моделі

Наведена математична модель (1)-(11) із сформульованими граничними умовами дозволяє провести вибір параметрів АПК для забезпечення необхідного динамічного діапазону і роздільної здатності за частотою і у часі. Модель була реалізована у вигляді комп'ютерної програми [99, 100]. Нижче розглянуто запропонований метод вибору параметрів АПК

2.5.1. Вибір типу АЦП за частотою дискретизації

При виборі АЦП керуються його параметрами, головними з яких, з точки зору практичного застосування, є частота дискретизації, розрядність АЦП, розді-

льна здатність, діапазон вхідної напруги, похибки квантування, нелінійність, апертурна похибка (джитер) та інші [99].

Необхідна частота дискретизації АЦП визначається його конкретним застосуванням, а саме частотою Найквіста сигналу, що досліджується, і не може бути, відповідно до теореми Котельнікова, меншою ніж двократна частота сигналу. Для тягового струму максимальна частота гармоніки, яку потрібно контролювати відповідно до нормативних документів, дорівнює 5555 Гц. В результаті значеннями частоти дискретизації має бути обрано з певним запасом на рівні 25 кГц і вище для забезпечення роздільної здатності за частотою.

Користуючись графіком розподілу типів АЦП в залежності від розрядності і частоти дискретизації (рис. 2.2) можна зробити висновок, що для забезпечення потрібної частоти дискретизації придатними є два типи АЦП: послідовного наближення і сігма-дельта АЦП. Їх розрядність, в залежності від частоти модуляції, лежить в межах 10-16 біт для послідовного типу АЦП і 16 до 20 біт для сігма-дельта АЦП. В роботі дослідження проведені для АЦП послідовного наближення з розрядністю 10-16 біт [99].

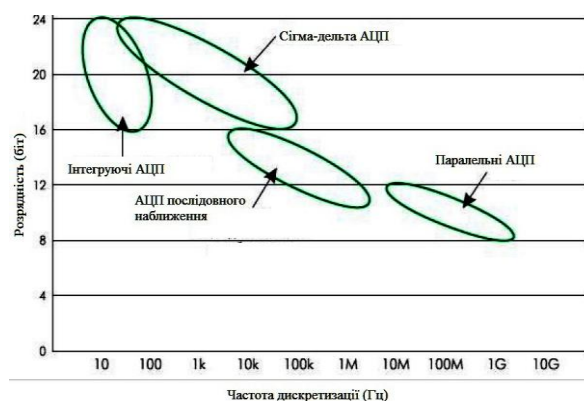


Рисунок 2.2 - Розподіл типів АЦП в залежності від розрядності і частоти дискретизації

АЦП послідовного наближення перетворює аналоговий сигнал в цифровий за N кроків, де N - розрядність АЦП. На кожному кроці визначається по одному

біту цифрового значення, починаючи від СЗР (старшого значущого розряду) і закінчуючи МЗР (молодшим значущім розрядом).

АЦП послідовного наближення мають одночасно високу швидкість і хорошу роздільну здатність. Однак, якщо в схемі не використовується пристрій зберігання вибірки, похибка може дещо збільшитися.

2.5.2. Вибір АЦП за динамічним діапазоном вимірювання

Динамічний діапазон тягового струму визначається відповідно до (2.5). Найбільші значення динамічного діапазону мають місце для змінного тягового струму, тому в роботі розглядається саме такий вид струму, але вибір його для розгляду обумовлений тим, що для нього складніше виконати вимоги нормативних документів і, очевидно, такий вибір не обмежує загальний характер висновків дослідження.

Розраховані значення динамічного діапазону при значеннях основної гармоніки тягового струму I_0 200 А і 300 А за умови що вимірюється тільки одна гармоніка, що має частоту в інтервалі 21-29 Гц або ТРЦ-3 (408–432, 468-492, 568-592, 708-732, 768-792 Гц) або ТРЦ-4 (4462-4538, 4962-5038, 5462-5538), і максимально-допустимий за нормативними документами рівень, наведені у табл. 2.2 [99].

Таблиця 2.2.

Значення динамічного діапазону для максимально-допустимих рівнів гармонійних завад

Діапазони частот, Гц	I_0 , А	Діапазони частот, Гц		
		21-29 Гц	Діапазони ТРЦ 3	Діапазони ТРЦ 4
DR_{TC} , дБ	200	46.0	55.1	60,0
	300	49.5	58.7	63.5

Оскільки при тестуванні нових типів рухомого складу необхідно визначати рівні всіх гармонік на всіх частотах роботи рейкових кіл, при виборі АЦП необхідно керуватися максимальним значенням динамічного діапазону, а саме 63.5 дБ.

Динамічний діапазон АЦП, розрахований згідно (2.18) для забезпечення відносної похибки 2,5 % дорівнює 91,6 дБ.

2.5.3. Вибір параметрів спектрального аналізу тягового струму

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) дискретної функції (послідовності відліків $x(n)$) визначається як [75, 80, 81]

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-j \frac{2\pi kn}{N}\right), \quad (2.28)$$

де N число відліків функції $x(n)$.

Короткочасне перетворення Фур'є (КЧПФ) визначається формулою [80, 81]

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) w(n - mR) e^{-j\omega n},$$

де $w(n)$ є віконною функцією довжиною M , $X_m(\omega)$ – образ функції $x(n)$ у частотній області, отриманий швидким перетворенням Фур'є добутку функції $x(n)$ і віконної функції $w(n)$, центрованої у моменті часу mR ; де R є довжиною стрибка (зсуву) вікна.

Віконні функції використовують для зменшення розмивання спектру при виконанні перетворення Фур'є. Правильний вибір типу віконної функції та її параметрів залежить від конкретної задачі. Тому нижче надано короткий огляд віконних функцій. За останні кілька десятиліть було запропоновано велику кількість різних типів віконних функцій. До основних параметрів віконної функції, які необхідно враховувати при її виборі, відносять [75, 81, 83-87] максимальний рівень бічних пелюстків по відношенню до головного γ_{\max} , ROR - швидкість зменшення бічних пелюстків з частотою; ΔF_0 - нормована ширина головного пелюстка

АЧХ на нульовому рівні; $\Delta F_{3\text{дБ}}$ - нормована ширина головного пелюстка АЧХ на рівні -3 дБ; $\Delta F_{6\text{дБ}}$ - нормована ширина головного пелюстка АЧХ на рівні -6 дБ; ENBW - еквівалентна ширина полоси шуму; β - коефіцієнт послаблення амплітуди спектру при ШПФ. Параметри деяких віконних функцій наведено у табл. 2.3, а на рис. 2.5 наведено приклади частотних залежностей деяких віконних функцій, що набули широкого використання.

Таблиця 2.3.

Параметри віконних функцій

Назва вікна	γ_{max} , дБ	ROR (дБ/октава)	ΔF_0	$\Delta F_{3\text{дБ}}$	$\Delta F_{6\text{дБ}}$	ENBW	β , дБ
Прямокутне (rectangle)	-13	-6	2	0,88	1.21	1	0
Барлетта (Bartlett)	-26,5	-12	4	1,3	1.78	1.33	6.02
Ханна (Hann)	-31,5	-18	4	1,44	2.00	1.5	6.02
Хаммінга (Hamming)	-42	-6	4	1,3	1.81	1.36	6.02
Блекмана (Blackman)	-58	-18	6	1,7	2.3	1.73	7.54
Блекмана — Харріса (4-term Blackman-Harris)	-92		8	1,9	2.72	2.0	8,91
3 плоскою верхівкою (Flat top window)	-44		10	2,04	3.56	5.76	0

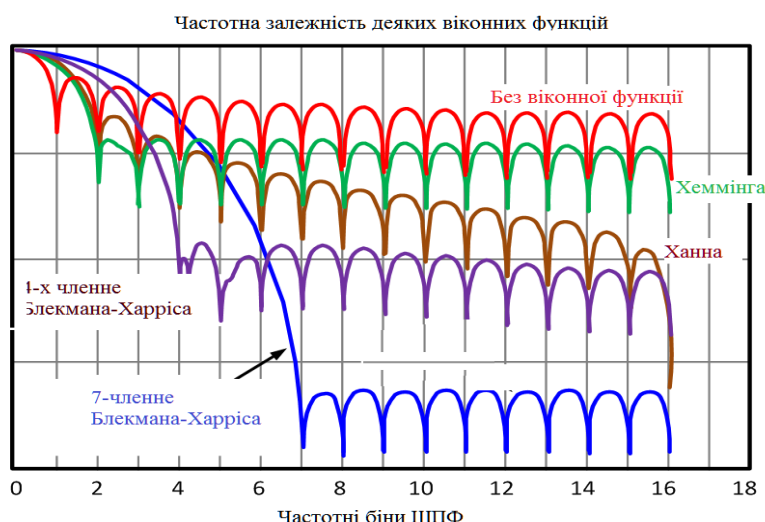


Рисунок 2.3 - Приклад частотних залежностей віконних функцій

Для спектрального аналізу тягового струму значення динамічного діапазону віконної функції має бути не менше ніж 84 дБ, висока точність і роздільна здатність за амплітудою, а також за частотою, яка визначається межами частотних інтервалів гармонік тягового струму, що наведені у нормативній документації (наприклад, інтервали від 19 до 21, від 21 до 29, від 29 до 31 Гц).

Роздільна здатність у тривалості дії завад з частотами, визначеними у нормативах, має бути не більше 0.3 с для кодових і фазочутливих РК і не більше 0,6 с для ТРК [66, 100]. Динамічний діапазон віконної функції визначається як відношення амплітуди головного пелюстка до амплітуди першого бічного пелюстка в частотній області. Це значення має бути більшим, ніж динамічний діапазон тягового струму.

З наведених у табл. 2.3 віконних функцій необхідне значення динамічного діапазону, яке забезпечує необхідну роздільну здатність за амплітудою, має віконна функція Блекмана-Харріса.

Функції Ханна і Хаммінга можуть бути використані для спектрального аналізу тягового струму при обмежених його значеннях (не більше 200 А).

Кожна віконна функція спотворює амплітудне значення і енергію гармонійних складових тягового струму. Для компенсації впливу віконної функції на результати аналізу необхідно використовувати коефіцієнти корекції, значення якого залежать від типу віконної функції і наведені у табл. 2.3.

Прямокутне вікно (або рівномірне вікно), яке має одиничне амплітудне значення по всій довжині його часової залежності, було обрано для порівняння з результатами інших вікон. Головний пелюсток прямокутного вікна є вузьким, тому вікно може використовуватися для спектрального аналізу ТС з високою роздільною здатністю у частотному діапазоні, але бічні пелюстки мають велику амплітуду в порівнянні до основного вікна і зменшуються з частотою дуже повільно. Перший бічний пелюсток нижча основного лише на 13 дБ, а інші бічні пелюстки спадають приблизно на 6 дБ на октаву [75, 81, 83-87]. Помилки визначення амплітуди сигналу при використанні прямокутного вікна може бути до 36 %.

Віконну функцію Ханна (або Ханнінга) часто використовують для аналізу функцій із задалегідь невідомими параметрами, оскільки вона має помірну роздільну здатність за амплітудою та у часовій і частотній області. Найвищий бічний пелюсток віконної функції Ханна на 32 дБ нижче від основного пелюстка. Решта бічних пелюстків спадає приблизно як 6 дБ/октава. Відносна похибка визначення амплітуди спектру з використанням ШПФ з віконною функцією Ханна досягає 16 % [75, 81, 83-87].

Вікно Хаммінга має найнижчий можливий рівень бічного пелюстка серед усіх вікон, що базуються на основі трьохчлених функцій Діріхле. Найвищий бічний пелюсток на 42 дБ нижче від основного. Швидкість зменшення решти бічних пелюстків складає приблизно як 6 дБ/октава.

Вікно Блекмана використовує п'ятичленну функцію Діріхле і тим самим ще більше знижуючи рівень бічного пелюстка. Вікно Блекмана забезпечує хороше ослаблення бокового пелюстка на рівні 58 дБ, бічні пелюстки зменшуються приблизно як 18 дБ на октаву. Тому вікно Блекмана слід вибирати, якщо сигнал містить значні завади поблизу частот, що вимірюються. З іншого боку, ширина головного пелюстка у вікна Блекмана є більшою, ніж у вікна Хаммінга, тому, якщо спектральна роздільна здатність є вирішальною, найкращим вибором було б вікно Хаммінга. Підсумовуючи можна сказати, що при виборі віконної функції необхідно враховувати тривалість дії гармоніки.

Якщо точність амплітуди одного компонента більш важлива за точне визначення частоти, краще вибирати вікно з широким головним пелюстком. Якщо спектр сигналу є досить рівним або широкосмуговим, раціонально використовувати прямокутне вікно. Вікно Ханна задовольняє потреби у 95% випадків. Вікно з плоскою верхівкою має хорошу амплітудну точність, але має незадовільну роздільну здатність у частотній області та велике розтікання спектру. Якісні характеристики деяких вікон, що розглядаються у роботі наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Якісні характеристики вікон

Тип вікна	Точність визначення амплітуди	Точність визначення частоти	Розтікання спектру
Прямокутне	Погана	Найкраща	Значне
Ханна	Хороша	Хороша	Незначна
Хаммінга	Хороша	Хороша	Незначна
Блекмана	Хороша	Хороша	Найкраща
З плоскою верхівкою	Найкраща	Погана	Незначна

2.6. Дослідження динамічних властивостей АЦП на комп'ютерній моделі

Дослідження впливу параметрів АЦП на його динамічні властивості було проведено на моделі з використанням синтезованого тестового змінного струму частотою 50 Гц при таких граничних умовах для вхідних параметрів моделі [99, 105, 110-113, 135]:

- частотний діапазон – від 0 до $f_{\max} = 5555$ Гц;
- динамічний діапазон вхідного сигналу – не менше 83 дБ;
- відносна похибка визначення рівня завад в смугах частот роботи рейкових кіл – не більше 5 %;
- роздільна здатність за частотою – не менше ± 3 Гц для частотного діапазону від 19 до 31 Гц; ± 12 Гц для частот ТРЦ-3; ± 38 Гц для частот ТРЦ-4;
- роздільна здатність за тривалістю завади $\Delta t \leq 0,3$ с – для кодових і фазочутливих РК, і $\Delta t \leq 0,6$ с для ТРК.

Діюче значення напруги тестового струму вибирали пропорційно діючому значенню тягового струму на рівні 200 А. Діючі значення гармонійних завад в

складі тестового струму з частотами 25, 420, 480, 580, 720, 780, 4545, 5000 і 5555 Гц задавали відповідно до максимально-допустимих значень струму гармонійних завад за умовами безпечного функціонування пристроїв залізничної сигналізації та зв'язку (табл. 2.1).

Напруга, що використана в комп'ютерній моделі, є аналогом напруги після перетворювача струму у вимірювальному апаратно-програмному комплексі. Коефіцієнт запасу АЦП по вхідній напрузі $K_{зАП}$ брали на рівні 1.2. Частоту дискретизації АЦП прийняли на рівні 20480 Гц. Швидке перетворення Фур'є цифрового сигналу провадили з використанням прямокутного вікна довжиною $N_w = 4096$ відліків сигналу. Число точок при швидкому перетворенні Фур'є M вибирали також як 4096. Для зменшення розмивання спектру і з метою підвищення точності визначення амплітуди гармонік, параметри ШПФ вибирали таким чином, щоби витримувалося умова когерентності для основної гармоніки спектру.

В спектрі тестового струму для ідеального АЦП розрядністю 10, 12, 14, 16 біт (рис. 2.3) рівень шуму визначається шумом квантування, який є зменшеним на величину $PG = 10 \lg \frac{M}{2}$. Рівень шумів для АЦП при збільшенні розрядності АЦП відповідно до ряду: 10, 12, 14, 16 біт зменшується зі значеннями (в дБ), що відповідають ряду -95,07; -107,11; -119,15; -131,19 [99].

Отримані при моделюванні значення порогу шумів при використанні АЦП з розрядністю 10 і 12 біт дозволяють визначити наявність гармонійних завад з максимально допустимими рівнями гармонік (відповідно до нормативної документації), але не забезпечують необхідну точність вимірювань. АЦП з розрядністю 14 і 16 біт забезпечують необхідну точність вимірювань при належному виборі довжини віконної функції відповідно до (2.17).

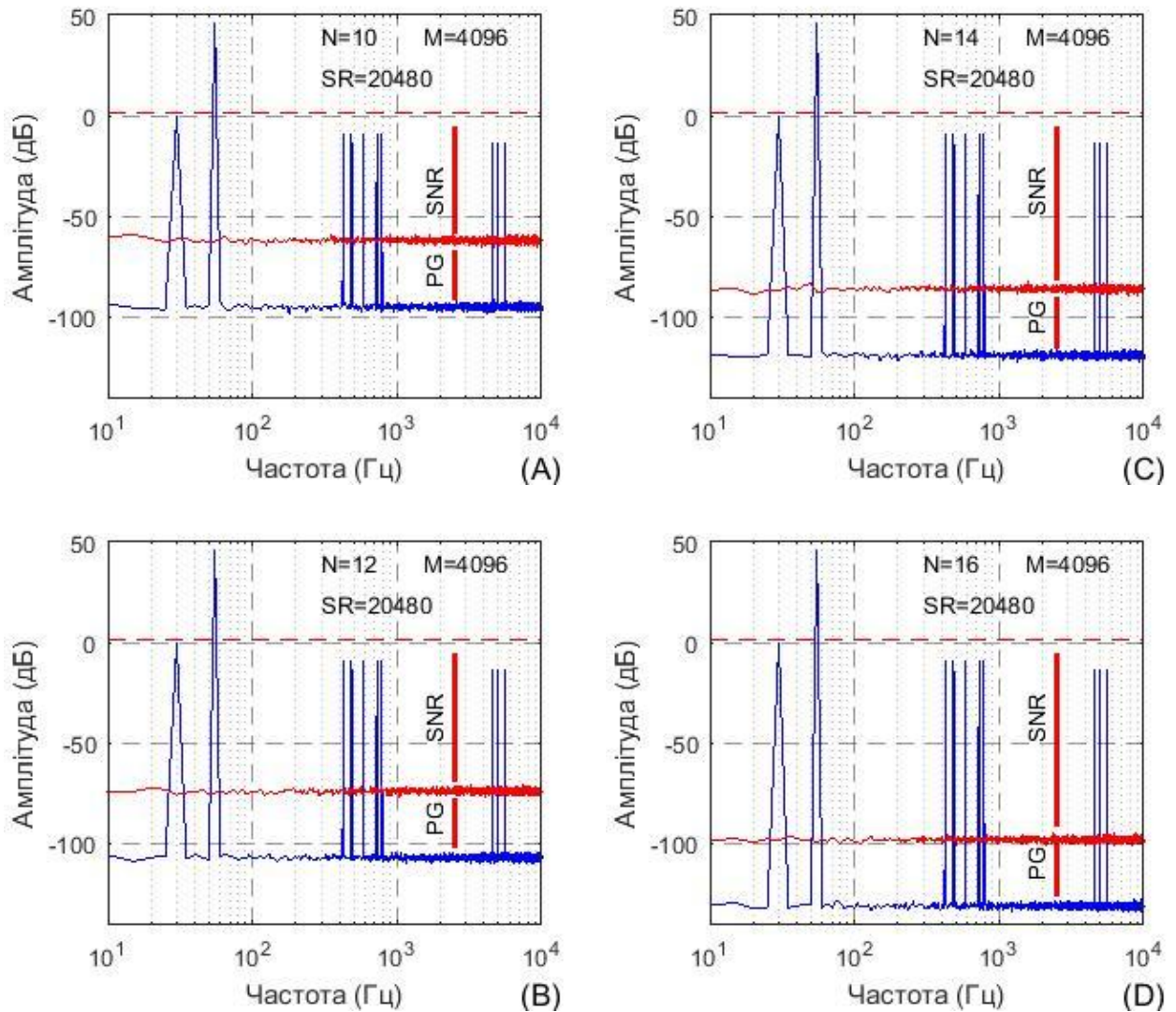


Рисунок 2.4 - Спектральний склад тестового струму при використанні АЦП розрядністю 10 (А), 12 (В), 14 (С) і 16 (D) біт.

В другому модельному експерименті досліджували залежність відношення сигналу до шуму (SNR) від числа точок ШПФ ($M = NFFT$), а також в залежності від вхідної напруги, за умови, що рівні всіх гармонійних складових залишаються на максимально допустимому рівні (згідно табл. 2.1) при зміні вхідної напруги. Тобто змінювали амплітуду основної гармоніки (частотою 50 Гц) в межах, що відповідають тяговому струму від 100 до 300 А з шагом 10 А при незмінних рівнях інших гармонік [99, 100, 105, 110-113, 135].

Число точок ШПФ при моделюванні вибирали відповідно до ряду $M = 2^m$ при $m = 6..12$.

Розраховані залежності відношення сигналу до шуму для найменших за рівнем гармонік з частотами 4545, 5000 і 5555 Гц від кількості точок при ШПФ і діючого значення тестового струму (при незмінних значеннях струму гармонійних завад) для АЦП розрядністю 10, 12, 14 і 16 біт наведено на рис. 2.4.

Рівень відношення "сигнал-шум" (SNR), розрахований для найменших за рівнем гармонійних завад із СКЗ 0,2 А і частотами 4545, 5000, і 5555 Гц зменшується із збільшенням розрядності АЦП, а також внаслідок збільшення тягового струму (при незмінних рівнях гармонійних завад) та при збільшенні числа точок перетворення Фур'є $NFFT$ від 64 до 4096, що відбувається за рахунок збільшення $PG = 10 \log(M/2)$.

З проведених досліджень видно, що відношення "сигнал-шум" для 10-ти розрядного АЦП менше ніж 21 дБ, а 12-ти розрядного АЦП менше ніж 42 дБ, що недостатньо для спектрального аналізу тягового струму. Значення SNR для 14 розрядного АЦП змінюється в межах 20..50 дБ, а 16 розрядного АЦП в межах 40..60 дБ в залежності від СКЗ тягового струму і числа точок перетворення Фур'є $NFFT$, що дає можливість провести раціональний вибір параметрів АПК для забезпечення необхідної точності вимірювання найменших гармонік.

Еквівалентне число біт АЦП $ENOB$, розраховане за (2.21) показує, що при $NFFT = 4096$ значення еквівалентного числа біт АЦП досягає значень більших 7 для розрядності $N = 14$ і 9 для розрядності [99, 100, 105, 110-113, 135]. $N = 16$.

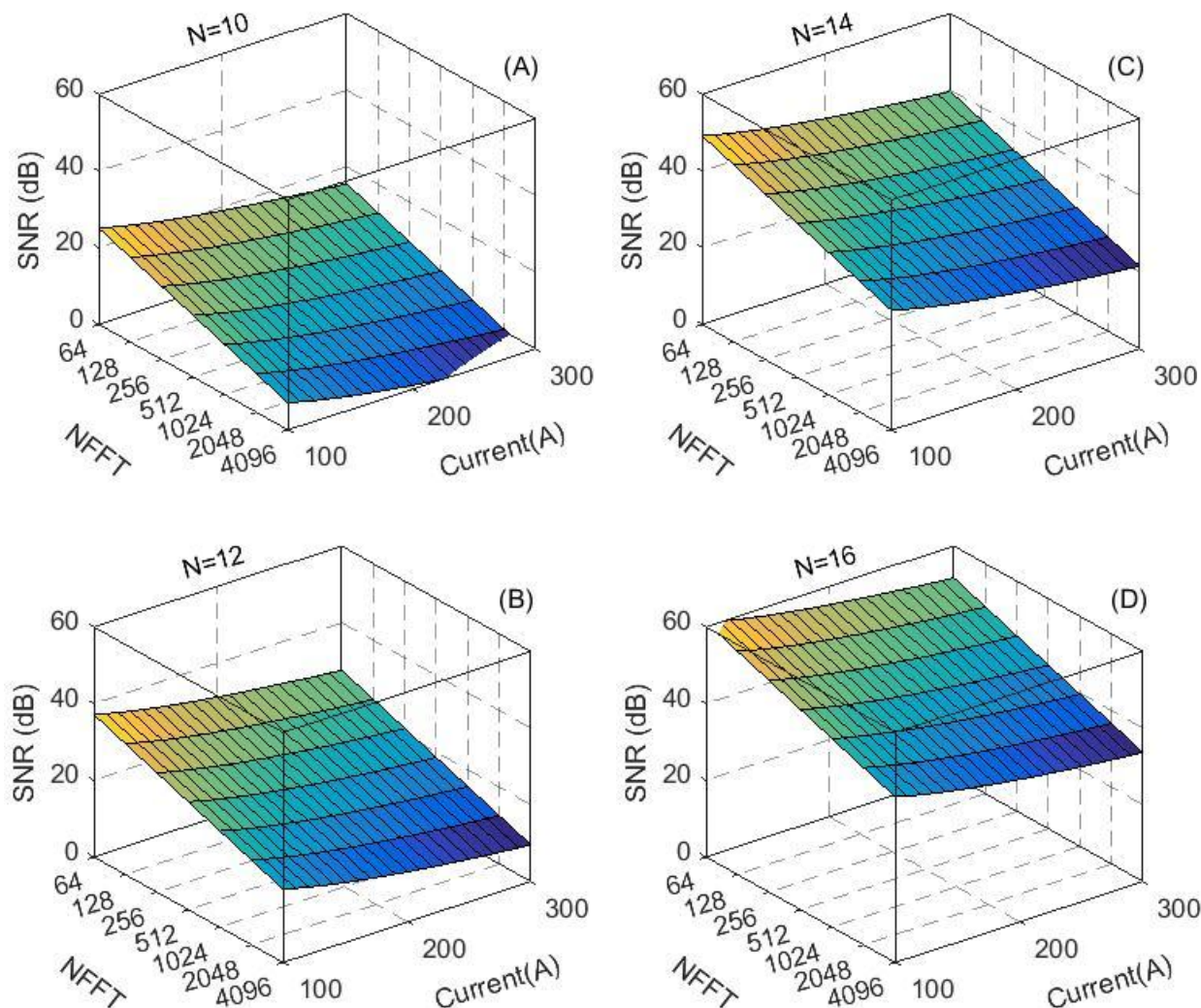


Рисунок 2.5 - Залежність відношення "сигнал-шум" від кількості точок при ШПФ і діючого значення тягового струму (при незмінних значеннях струму гармонійних завад) при використанні АЦП розрядністю 10 (А), 12 (В), 14 (С) і 16 (D) біт

2.7. Перевірка адекватності математичної моделі.

Перевірка адекватності математичної моделі та оцінку точності визначення середньоквадратичних значень струму, діапазонів частот і тривалості гармонік ТС було проведено з використанням ШПФ з чотирма типами вікон високої та серед-

ньої роздільної здатності, а саме, з вікнами Ханна, Хаммінга, Блекмана і прямокутним. Останнє взято для порівняння [99, 100, 105, 110-113, 135].

Для оцінки точності визначення середньоквадратичних значень струму, діапазонів частот і тривалості гармонік ТС з використанням ШПФ з чотирма розглянутими віконними функціями використовували синтезований тестовий сигнал з відомими параметрами, які були взяті аналогічними до реального тягового струму, що був виміряний при випробуваннях електрорухомого складу на електромагнітну сумісність з рейковими колами. В тестовому сигналі рівні гармонійних завад з частотами, що можуть впливати на роботу рейкових кіл, були взяті на рівні від 0,2 до 1,0 з кроком 0,1 від максимально допустимого рівня. Всього було використано 20 примірників тестового струму з різними комбінаціями рівнів гармонік в діапазонах частот, що відповідають табл. 2.1. Використання тестового сигналу з заданими параметрами гармонійних завад дає змогу оцінити точність спектрального аналізу тягового струму за допомогою віконного ШПФ. СКЗ струму тестового сигналу було прийнято на рівні 200 А, частота основної гармоніки взята як 50 Гц. Частота дискретизації струму була вибрана на такому рівні, щоби частота Найквіста була більшою за максимальну частоту в спектрі сигналу, а саме частота дискретизації взята як $F_s = 5 \cdot f_{\max} = 27500$ Гц. Довжина вікна була взята 32768 відліків з урахуванням вимоги нормативу, відповідно до якого максимально допустима тривалість завади в тяговому струмі з наднормованим рівнем має бути не більше ніж 0.3 с для кодових і фазочутливих РК. Для обраних параметрів розрахункова здатність ШПФ дорівнює 0.27 Гц для прямокутного вікна, 0.54 Гц для вікон Ханна і Хаммінга і 0.81 Гц для вікна Блекмана.

По результатах 20-ти досліджень визначали середнє значення відносної похибки, значення яких наведено у табл. 2.5 [99, 100, 105, 110-113, 135]..

Таблиця 2.5.

Середні відносні значення похибки визначення амплітуди
і частоти гармонік ТС

f, Гц	Середнє значення відносної похибки вимірювання струму і частоти при довжині вікна 0.3 с							
	Прямокутне вікно		Вікно Ханна		Вікно Хаммінга		Вікно Блекмана	
	$\delta f, \%$	$\delta I, \%$	$\delta f, \%$	$\delta I, \%$	$\delta f, \%$	$\delta I, \%$	$\delta f, \%$	$\delta I, \%$
18	1.75	13.3	3.75	2.3	3.65	2.1	2.15	1.8
25	2.00	12.7	3.00	2.7	3.10	2.4	2.02	1.7
32	1.58	12.3	3.58	2.3	3.58	2.2	2.21	1.8
420	0.50	8.4	1.80	2.4	1.50	2.2	1.43	1.7
480	0.51	7.6	1.81	2.6	1.81	2.3	1.77	1.6
580	0.52	6.5	1.82	2.5	1.72	2.2	1.44	1.9
720	0.54	9.4	1.84	2.3	1.77	2.2	1.45	1.8
780	0.55	9.6	1.85	2.2	1.75	2.1	1.55	1.7
4545	0.45	9.1	1.79	2.6	1.69	2.1	1.48	1.7
5000	0.49	12.2	1.79	2.7	1.69	2.1	1.41	1.7
5555	0.49	10.2	1.80	2.6	1.70	2.1	1.41	1.7

Спектри тестового сигналу, отримані в результаті віконного ШПФ з довжиною вікна 0,3 с, наведені на рис. 2.6, а з довжиною вікна 1 с – на рис. 2.7 [99, 100, 105, 110-113, 135]..

Мінімальна роздільна здатність спектрів за частотою отримана для прямокутного вікна, а максимальна – для вікна Блекмана, оскільки останній має найнижчий рівень бокового пелюстка –58 дБ.

Роздільна здатність гармонік збільшується і, відповідно, відносна похибка визначення частоти зменшується зі збільшенням частоти. Тип вікон, що використовувалися при дослідженні, впливає на роздільну здатність гармонік ТС за частотою незначно. Значення похибки визначення СКЗ струму гармонічних завад є вищими для прямокутного вікна і зменшується у ряду вікон: прямокутне, Ханна, Хаммінга, Блекмана. Похибка вимірювань пояснюються розмиванням полос та гребінцевими спотворюваннями спектру. Завдяки оберненій пропорційній залежності між роздільною здатністю у частотній та часовій області, збільшення роздільної здатності за частотою спостерігається для вікон більшої довжини. Відповід-

но до цього на другому етапі було проведено комп'ютерне дослідження точності віконного FFT для вікон довжиною 1 с.

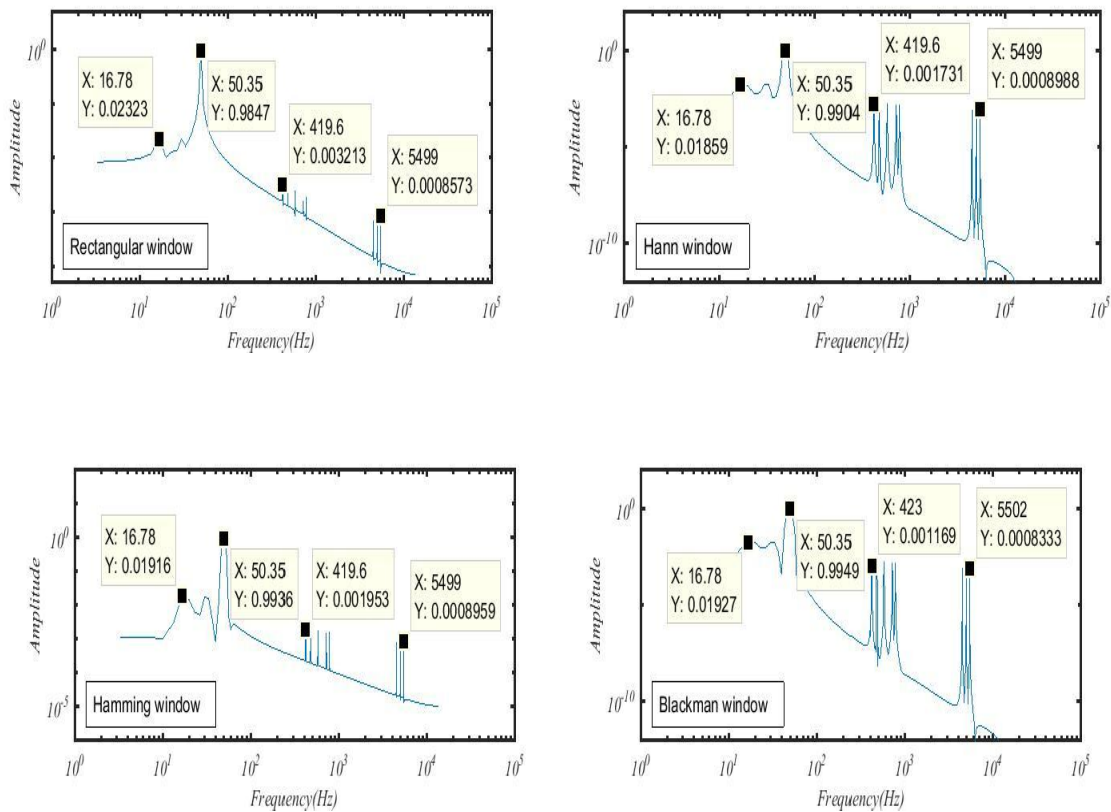


Рисунок 2.6 - Спектри сигналу для вікон: прямокутне, Ханна, Хаммінга, Блекмана довжиною 0.3 с.

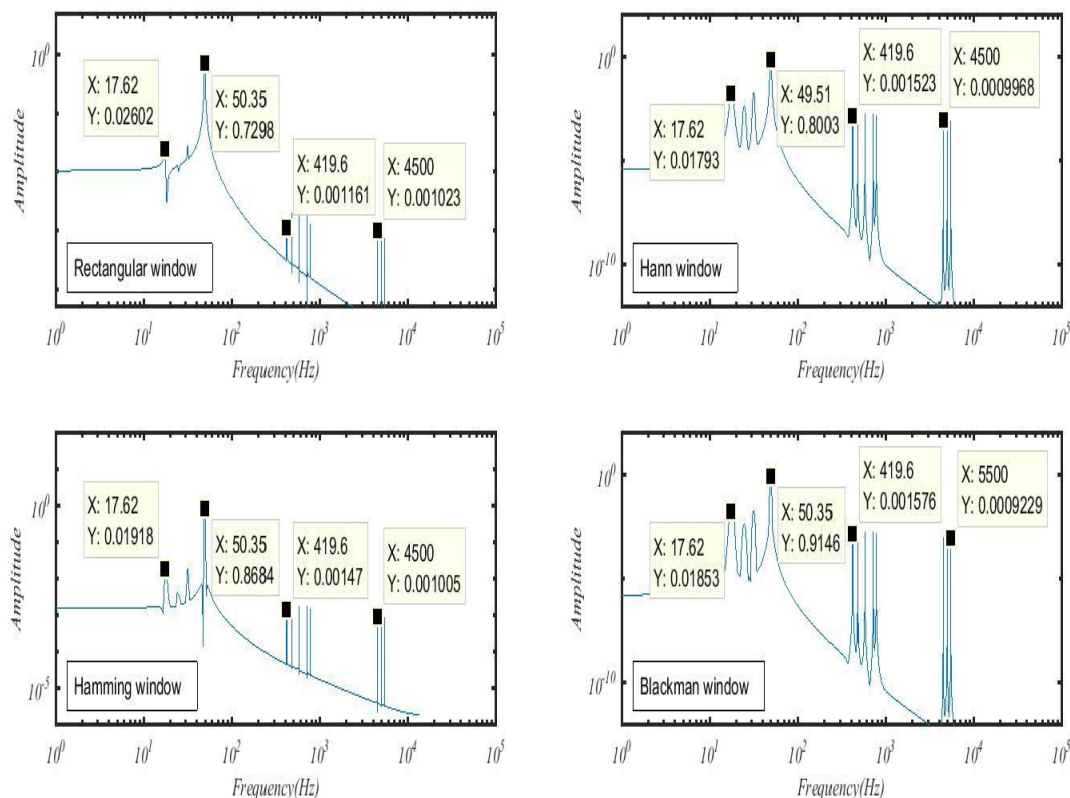


Рисунок 2.7 - Спектри сигналу для вікон: прямокутне, Ханна, Хаммінга, Блекмана довжиною 1 с.

Роздільна здатність визначення частоти гармонік ТС для вікон довжиною 1 с (рис. 2.7) є кращою ніж для вікон 0.3 с (рис. 2.6), а відносна похибка визначення струму гармонік і частот є значно нижчою, ніж для вікон довжиною 0,3 с [99, 100, 105, 110-113, 135].

2.8. Методи підвищення точності визначення параметрів завод

Вимоги до частотного розділення полос у спектрі, наведені у нормативних документах є достатньо жорсткими. Так, наприклад, для інтервалів частот від 19 до 21 Гц, від 21 до 29 Гц та від 29 до 31 Гц нормативне значення максимально допустимих рівнів гармонійних завод є, відповідно, такими: 4,1; 1; 4,1 А. Підвищення роздільної здатності близько розташованих спектральних полос можна частково досягти шляхом підвищення числа бінів ($nfft$) швидкого перетворення Фур'є.

Значення $nfft$ визначає на яке число частотних полос поділяється вікно при проведенні спектрального аналізу. Додатковим бінам, що перевищують розмір вікна ШПФ приписують нульові амплітуди, тому збільшення $nfft$ не приводить до появи додаткової інформації в спектрі. Але, підвищення числа полос збільшує, в певних межах, роздільну здатність за частотою.

Для дослідження впливу $nfft$ на роздільну здатність в діапазоні частот поблизу 25 Гц проведено комп'ютерне дослідження з тестовим сигналом, що складається з двох синусоїдальних сигналів з частотами 21 і 25 Гц і однаковими амплітудними значеннями 1 А. Частоту вибірки взято як 475 Гц. Для ШПФ використовували 2 типа віконної функції: прямокутну і Ханна (рис. 2.8). Результати дослідження підтверджують, що при збільшенні $nfft$ з 256 до 1024 при незмінних значеннях ширини вікна $M = 256$ і частоти дискретизації $SR = 475 \text{ Гц}$ роздільна здатність ШПФ збільшується [100, 105, 110-113, 135].

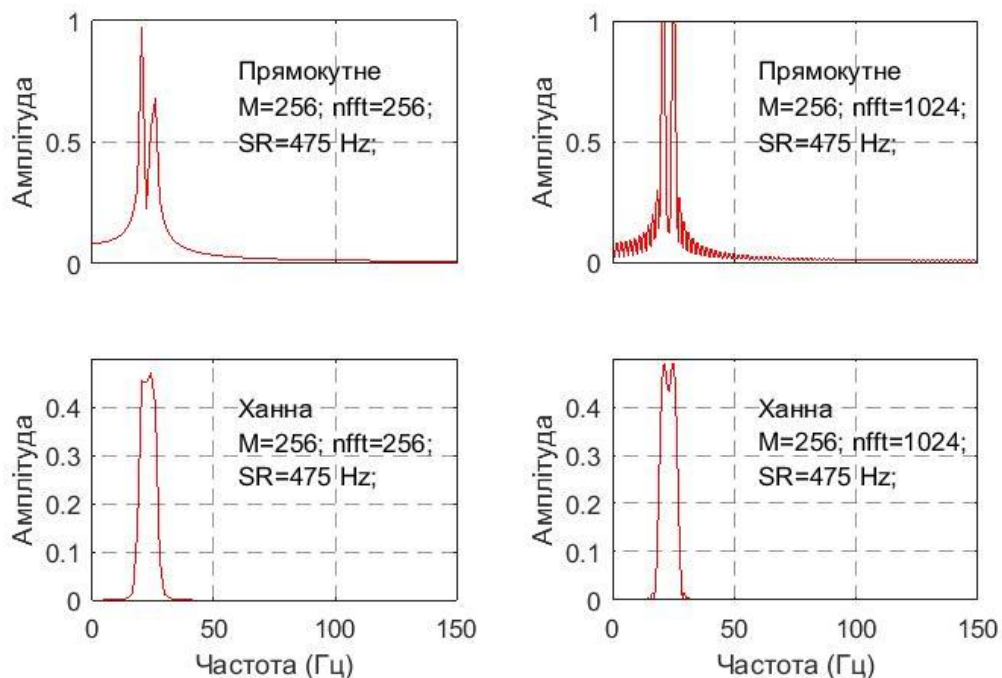


Рисунок 2.8 - Спектр тестового сигналу для прямокутного вікна і вікна Ханна при різних значеннях параметрів ШПФ.

Роздільну здатність КЧПФ у часовій області можна частково збільшити шляхом правильного вибору параметра стрибка (зсуву) вікна, в результаті чого збільшується число полос, на які поділяється сигнал у часовій області [75, 87, 100]. Кількість сегментів k , на які поділяється дискретна послідовність $x(n)$ довжиною N_x при КЧПФ визначається як

$$k = \frac{N_x - Nov}{N_w - Nov} . \quad (2.29)$$

де N_w довжина вікна у відліках, Nov довжина перекриття вікон у відліках.

Спектр тестового сигналу довжиною 0.3 с, отриманий КЧПФ з вікном Ханна і перекриттям 50 % наведений на рис. 2.9 [100, 105, 110-113, 135].

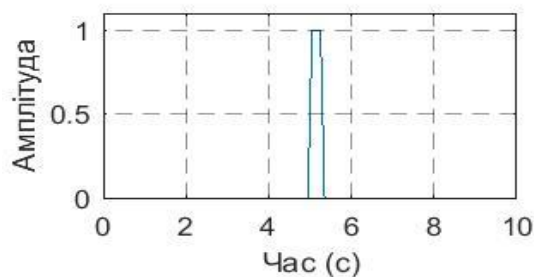


Рисунок 2.9 - Часова залежність короткочасної (тривалістю 0.3 с) завади частотою 25 Гц в складі тягового струму, отримана КЧПФ

2.9. Висновки за розділом

Розроблено математичну модель апаратно-програмного комплексу (АПК) для вимірювання електромагнітних завад від ЕРС в рейках, яка дозволила запропонувати метод вибору параметрів АПК для забезпечення необхідного динамічного діапазону, точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад. Модель була реалізована у вигляді комп'ютерної програми. Визначено, що динамічний діапазон апаратно-програмного комплексу для забезпечення відносної похибки 2,5 % при тяговому струмі 300 А має бути 91,6 дБ.

Відношення сигналу до шуму АПК з АЦП розрядністю 14 і 16 біт, при умові вибору параметрів швидкого перетворення Фур'є відповідно до запропонованих в роботі рекомендацій, складає 102 і 110 дБ, що дозволяє забезпечити роздільну здатність АПК на рівні 1 % від нормативного значення завад для діапазону частот ТРК 4. Для забезпечення необхідної точності за амплітудою гармонік необхідне використовувати віконні функції з відношенням основного пелюстка до бічних на рівні не менше, ніж 90 дБ (наприклад вікно Блекмана-Харріса). Функції Ханна і Хаммінга можуть бути використані для спектрального аналізу тягового струму при його значеннях до 200 А. При збільшенні довжини вікна (до 1 с) роздільна здатність у частотній області покращується, а відносна похибка визначення струму гармонік і їх частот є значно нижчою, ніж для вікон довжиною 0,3 с. Роздільну здатність за рівнем сигналу і за частотою можна збільшити за рахунок збільшення числа точок ШПФ, а роздільну здатність у часі - збільшенням перекриття вікон.

РОЗДІЛ 3.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОТІКАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАВАД В НЕ-СИМЕТРИЧНІЙ РЕЙКОВІЙ ЛІНІЇ

3.1. Загальна постановка задачі дослідження

Моделювання є потужним інструментом дослідження функціонування рейкових кіл, що дозволяє врахувати вплив зовнішніх і внутрішніх чинників різної природи на надійність та безпечність їх функціонування [32-35]. Умови експлуатації рейкових кіл характеризуються кліматичним впливом (значними перепадами температури, вологості), динамічними навантаженнями, потужними електромагнітними завадами, впливом невисокої якості живлячої напруги (зміни напруги, провали і т.д.), поступовою зміною параметрів структурних елементів рейкових кіл (рейкових стикових з'єднувачів, ізолюючих стиків, резисторів, конденсаторів, трансформаторів і т.д.).

Моделі розподілу тягового струму і напруги в рейках залізничних дільниць з електротягою змінного та постійного струму наведені в багатьох роботах (див., наприклад, [3, 4]). Модель для обчислення заважаючого впливу електрифікованих залізничних ліній на лінії електрозв'язку з використанням формалізму системи мультіпровідникових ліній (МПЛ) електропередачі була вперше використана в директивах ССІТТ [189]. Моделі МПЛ успішно використовувалася для визначення розподілу зворотного тягового струму в лініях електрифікованих залізниць змінного та постійного струму [20-25, 33, 81, 91-98, 10-119, 120-125, 130, 132, 133, 137, 138, 141]. Розподіл гармонік зворотного тягового струму в рейках для визначення їх впливу на рейкові кола проведено в [20, 21, 25, 97, 98, 101, 106, 107, 115-117, 130, 132, 133, 137, 138]. Результати моделювання були використані під час випробувань поїздів нового типу на ЕМС із рейковими колами [25, 102, 105-107]. Моделювання дільниці залізниці змінного струму на основі представлення її у вигляді однорідної мультіпровідної ланцюгової структури була розглянута в [106, 130, 132, 138, 190-192], протікання гармонік в тяговій мережі був проаналізовано

в [193], а моделювання розподілу гармонік тягового струму в рейках від декількох поїздів, що рухаються в межах однієї фідерної зони змінного струму розглянуто в [96-98, 101, 109, 113, 130, 132, 133, 137, 138]. Розповсюдження напруги і тягового струму в однопровідній і двопровідній рейковій лінії з урахуванням асиметрії розглянуто в [65, 97].

Таким чином розглянутий короткий огляд по моделюванню розповсюдження тягового струму в рейковій лінії можна підсумувати наступним чином.

Необхідність застосування математичної моделі розподілу напруг і струмів в рейковій мережі обумовлена наступним.

- Математична модель дозволяє проаналізувати вплив електричних завод на рейкові кола з урахуванням впливу різного роду факторів (таких як зміни опору ізоляції баласту, напруги живлення, параметрів структурних елементів ті ін.), в тому числі і при найбільш несприятливих комбінаціях різного роду факторів для кожного режимів роботи РК (нормального, шунтового, контрольного). Саме тому Європейський стандарт EN 30238 пропонує доповнювати тестові натурні вимірювання при випробуванні нових типів рухомого складу проведенням моделювання.
- Випробування ЕРС на електромагнітну сумісність проводять, як правило, з однією одиницею рухомого складу, в той час, як при експлуатації в межах однієї фідерної зони обертаються одночасно декілька електропоїздів, сумарний тяговий струм від яких може привести до збою в роботі РК.
- Похибка визначення рівня гармонік (на рівні десятих часток Ампера), частоти і тривалості завади (яка залежить від вибору віконної функції ШПФ, частоти дискретизації, довжини відрізка тягового струму) може досягати більше 10 %. Тому при виміряних під час тестових випробуваннях рівнях гармонік тягового струму, що незначно відрізняються від нормативного значення, а саме в межах $I_{норм}(1 + \delta)$, (де δ - відносна похибка методу вимірювання рівнів гармонік), заключний висновок про відповідність рівня завод

від ЕРС нормативним документам необхідно робити після проведення додаткових досліджень на фізичних і математичних моделях з оцінкою ризиків виникнення збою в роботі рейкових кіл.

- Модель може бути використана також при розробці і проектуванні нових систем СЦБ для попередньої оцінки впливу на них тягового струму.

Необхідність розробки нової моделі розповсюдження гармонік тягового струму в міжподстанційній зоні пов'язана з тим, що існуючі моделі не дозволяють враховувати конструктивні особливості реальних тягових систем, головні з яких перераховані нижче.

- Тягова мережа розглядається як однорідна по всій довжині міжподстанційної зони. Наявність проміжних станцій, блок-постів і т.д., а також локальних неоднорідностей рейкової лінії у вигляді структурних елементів рейкових кіл не враховується.
- Математичні моделі розглядають тільки один поїзд в межах міжподстанційної зони. Розширення цієї моделі на декілька поїздів з визначенням загального тягового струму в мережі як суми тягових струмів від кожного електропоїзду, без врахування інших поїздів, що пропонувалося в деяких роботах, вносить значну похибку в розрахунки, оскільки не враховує перерозподіл струмів і потенціалів в тяговій мережі внаслідок наявності декількох поїздів.
- В більшості моделей дві рейки замінюються одним еквівалентним провідником, що не дозволяє врахувати електричну асиметрію рейкової лінії.

3.2. Загальна структура тягової мережі дільниці залізниці

Тягова мережа складається з контактної мережі (контактного проводу і несучого тросу, які з'єднані струнами), і рейкової лінії, електрично-з'єднаної з землею через невеликий опір ізоляції баласту, яка виконує функції каналізації звороту

тного тягового струму [1-5]. Контактна мережа і рейкова лінія підключені до однієї або до двох тягових підстанцій.

Тягова мережа є неоднорідною по довжині, що обумовлено наявністю ділянок з розвинутою колійною структурою: роз'їздів, обгінних пунктів, станцій. Неоднорідність рейкової лінії на перегонах між станціями пов'язана з наявністю електропоїздів, дросель-трансформаторів (для рейкових кіл з ізолюючими стиками) або дросель-трансформаторів і колійних трансформаторів, підключених до рейок для безстикових рейкових кіл. Дросель-трансформатори та/або колійні трансформатори підключені до рейок на відстані від 0,3 до 2,6 км один від одного. Крім того на рейковій лінії є рейкові стикові з'єднувачі, ізолюючі стики, міжколійні перемички для каналізації тягового струму, троси заземлення металевих конструкцій, що знаходяться на певній відстані від крайньої рейки [5-12].

Наявність електропоїздів, що рухаються, робить систему нестационарною та структурою, що змінюється у часі.

Провідність між рейками і землею може варіюватися у часі та по довжині. Нормативною провідністю вважаються значення від 0,02 См/км до 1 См/км, а для тональних рейкових від 0,02 См/км до 0,8 См/км [10, 11]. Внаслідок цього тягова мережа розглядається як система з розподіленими параметрами.

Нерівність опорів двох рейок однієї колії зумовлює поздовжню електричну асиметрію, а нерівність провідностей між кожною рейкою та землею призводить до поперечної електричної асиметрії залізничної лінії. Різниця значень струму і напруги тягових гармонік у двох рейках однієї колії може призвести до збоїв в роботі рейкових кіл, якщо частоти завад знаходяться в смузі пропускання фільтрів колійних приймачів.

Структурна схема ділянки залізниці з тягою змінного струму між двома сусідніми тяговими підстанціями наведена на рис. 3.1.

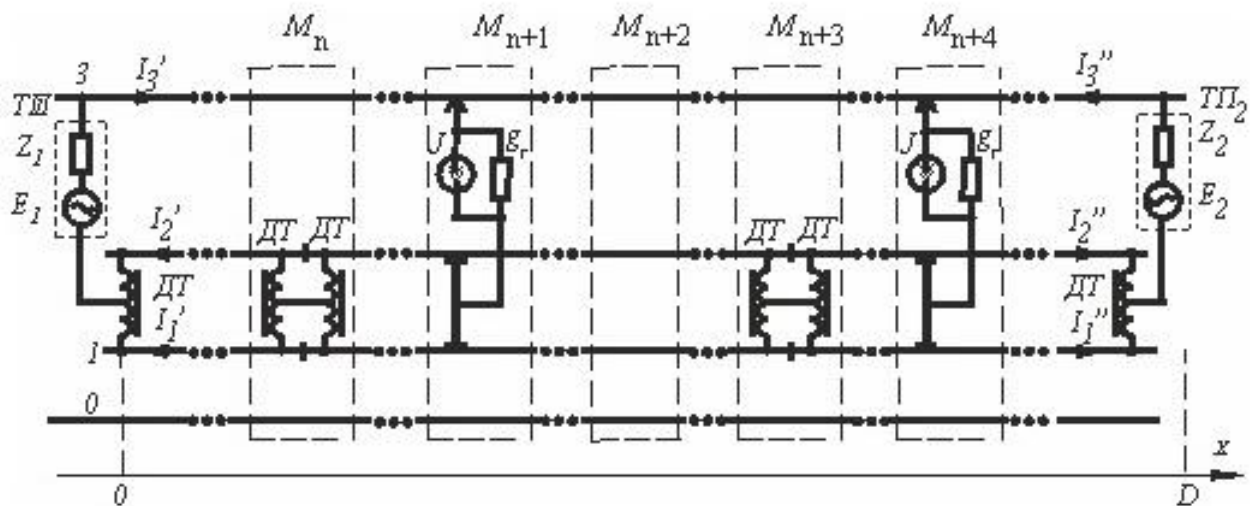


Рисунок 3.1 - Структурна схема тягової мережі

На схемі умовно позначено дві одиниці ЕРС та п'ять дросель-трансформаторів. В загальному випадку кількість поїздів може бути більшою. Миттєві координати локомотивів позначені як x_{T1} і x_{T2} .

Вихідними даними моделі є схема і конструктивні параметри залізничної колії, взаємне розташування провідників, а також електричні параметри тягової мережі, а саме, повздовжній імпеданс рейок, контактного проводу, несучого тросу, коефіцієнти взаємної індукції між ними, опір рейка-земля та інші.

Модель, що розробляється, є статичною. Тому в моделі задається миттєва схема розміщення електропоїздів в фідерній зоні і спектральний склад зворотного тягового струму, що витікає з силового обладнання поїзду в рейкову лінію. Результатами моделювання має бути залежність гармонік тягового струму від координати на рейковій лінії.

3.3. Основні припущення моделі. Врахування повздовжньої неоднорідності тягової мережі.

Для зменшення кількості ліній в моделі тягової системи контактний провід та несучий трос представлені у вигляді одного провідника з еквівалентними пара-

метрами (рис. 3.1). Це припущення широко застосовується при розрахунках контактної мережі [2, 3] і базується на тому, що ці два провідника електрично з'єднані між собою струнами, мають однаковий потенціал, а також відстань між ними набагато менше, ніж відстань від них до рейок.

Імпеданс еквівалентного провідника дорівнює [3, 97, 117, 119, 130, 132, 138]

$$Z_{KT} = \frac{Z_K Z_T - (j\omega M_{KT})^2}{Z_K + Z_T - 2j\omega M_{KT}}, \quad (3.1)$$

де $Z_K = R_K + jX_K = R_K + j\omega L_K$ – імпеданс контактного проводу при відсутності несучого тросу; $Z_T = R_T + jX_T = R_T + j\omega L_T$ – імпеданс несучого тросу при відсутності контактного проводу; M_{KT} – коефіцієнт взаємної індукції між тросом та контактним проводом, L_K , L_T – коефіцієнти самоіндукції шлейфів провід-земля, трос-земля. Несучий трос має значний провис, тому відстань до контактного проводу d_{KT} змінюється по довжині контактної мережі. В [1-3] запропоновано прийняти за значення d_{KT} на рівні $2/3$ від стріли провисання. Внаслідок спрощення система тягового електропостачання має три провідника плюс провідник, що відповідає провідності землі.

Для моделювання повздовжньо-неоднорідної тягової системи, довжина якої може сягати 40-60 км (відстань між тяговими підстанціями для тяги змінного струму) її розбивають на сегменти, в межах яких тягова мережа може вважатися повздовжньо однорідною з точністю, достатньою для вирішення практичної задачі [190-194]. В результаті неоднорідну по довжині тягову мережу представляють у вигляді послідовно з'єднаних багатополісників [97, 117, 119, 130, 132, 138, 190, 191] (в нашому випадку чотрьохполісників) (рис 3.1) і задача зводиться до визначення параметрів багатополісників.

Дільниця тягової мережі змінного струму з напругою 25 кВ зазвичай живиться з двох підстанцій, розташованих на відстані 40-60 км одна від одної. Зворотні тягові струми від рухомого складу до тягових підстанцій обернено пропорційні імпедансам тягових мереж між рухомим складом та кожною тяговою підс-

танцією. В роботі розглядається тільки одне плече тягової мережі між рухомим складом та тяговою підстанцією, що не зменшує загальних результатів моделі.

3.4. Модель структурно-однорідних сегментів тягової мережі

3.4.1. Еквівалентна схема структурно однорідної ділянки рейкової лінії

Структурно-однорідні сегменти тягової мережі при моделюванні розглядають у формалізмі багатопровідних ліній з розповсюдженими параметрами [3, 4]. Еквівалентна схема елементарного відрізка тягової мережі довжиною dx представлена на рис. 3.2 [97, 117, 119, 130, 132, 138].

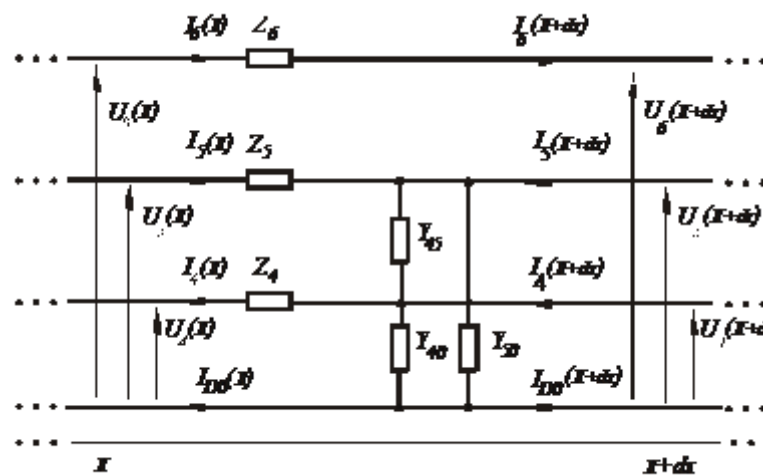


Рисунок 3.2 - Еквівалентна схема елементарного відрізка тягової мережі

Нульова лінія відповідає провідності землі, лінії 1, 2 — рейкам, лінія 3 — контактному проводу. Повздовжні імпеданси рейкових ниток і провідників контактної мережі, розраховані на одиницю довжини (н.о.д), позначені як Z_{11} , Z_{22} , Z_{33} , комплексні імпеданси взаємоіндукції (н.о.д) дорівнюють $Z_{kl} = j\omega M_{kl}$, $k \neq l$, де M_{kl} — коефіцієнт взаємоіндукції між k — та l — лініями..

Активні і ємнісні провідності між контактним проводом і рейками є незначними і ними при моделюванні можна знехтувати [7, 8]. Для діапазону частот сигнального струму, що використовується в рейкових колах, ємність між провідни-

ками дорівнює декільком пікофарад на кілометр довжини лінії і тому ємнісною складовою провідності між лініями також можна знехтувати [7, 8], внаслідок чого в моделі прийнято, що поперечні провідності між рейками на одиницю довжини рейки ($g_{12} = g_{21}$) і між рейками і землею g_{10}, g_{20} н.о.д є активними.

Напряга і струм гармонік тягового струму частотою f пов'язані відомими рівняннями [20, 21, 97, 117, 119, 130, 132, 138]

$$\frac{d\mathbf{U}_f(x)}{dx} = -\mathbf{Z}_f \mathbf{I}_f(x), \quad (3.2)$$

$$\frac{d\mathbf{I}_f(x)}{dx} = -\mathbf{G} \mathbf{U}_f(x), \quad (3.3)$$

де, $\mathbf{U}_f(x)$ –вектор напруг з частотою f на лініях в точці з координатою x відносно землі, $\mathbf{I}_f(x)$ вектор струмів гармонік частотою f в лініях в точці з координатою x .

Ці вектори складаються з трьох компонентів [20, 115, 117, 97, 117, 119, 130, 132, 138]

$$\mathbf{I}_f(x) = \begin{pmatrix} \dot{I}_{1f}(x) \\ \dot{I}_{2f}(x) \\ \dot{I}_{3f}(x) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{U}_f(x) = \begin{pmatrix} \dot{U}_{1f}(x) \\ \dot{U}_{2f}(x) \\ \dot{U}_{3f}(x) \end{pmatrix}; \quad (3.4)$$

Матриця повздовжніх імпедансів ліній (н.о.д.) \mathbf{Z}_f для гармонік з частотою f має вигляд [20, 115, 117]

$$\mathbf{Z}_f = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{f11} & \underline{Z}_{f12} & \underline{Z}_{f13} \\ \underline{Z}_{f21} & \underline{Z}_{f22} & \underline{Z}_{f23} \\ \underline{Z}_{f31} & \underline{Z}_{f32} & \underline{Z}_{f33} \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Діагональні елементи матриці імпедансів \underline{Z}_{fii} відповідають власному імпедансу (н.о.д.) i -го провіднику без врахування взаємної індуктивності з іншими провідниками. Не діагональні елементи матриці імпедансів \underline{Z}_{fij} відповідають взаємному імпедансу (н.о.д.) між i -м і j -м провідниками. Елементи матриці розра-

ховані в припущенні, що домінантна мода розповсюдження електромагнітної хвилі в провідниках системи є поперечна електромагнітна (ТЕМ) в діелектрику і поперечна магнітна (ТМ) в провідниках і що внесок інших мод є незначним [163].

Власний імпеданс i -го провідника складається з трьох компонентів [91, 92, 94, 115-117, 119, 130, 132, 138]]

$$\underline{Z}_{ii} = \underline{Z}_{Cii} + \underline{Z}_{Eii} + \underline{Z}_{Gii} \quad (3.6)$$

де \underline{Z}_{Cii} – внутрішній імпеданс провідника,

$$\underline{Z}_{Cii} = R_I + jX_I + j\omega L_{ii} \quad (3.7)$$

де R_I і jX_I – внутрішній активний і реактивний опір провідника, що враховує скін-ефект в провіднику, L_{ii} – індуктивність контуру, який утворено провідником і поверхнею землі у припущенні, що земля є ідеальним провідником;

\underline{Z}_{Eii} – зовнішній імпеданс провідника, що визначається за формулою

$$\underline{Z}_{Eii} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (3.8)$$

де h_i - висота провідника i над поверхнею землі, r_i радіус провідника;

\underline{Z}_{Gii} – імпеданс, обумовлений впливом землі [174-179], і його значення визначається виразом [174, 175]

$$\underline{Z}_{Gii} = R_{Gii} + jL_{Gii} = \omega \frac{\mu}{\pi} J_s = \omega \frac{\mu}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{je^{-2h_i\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_g}} d\lambda \quad (3.9)$$

Для практичних розрахунків достатньо точність забезпечує спрощена формула [174, 175]

$$\underline{L}_{Gii} = \left[1 + 2 \ln \frac{10^4}{\gamma R \sqrt{10\pi\omega\sigma_g}} - j \frac{\pi}{2} - j \frac{16h_i 10^{-4}}{3} \sqrt{10\pi\omega\sigma_g} \right] 10^{-4} \quad (3.10)$$

Взаємний імпеданс двох провідників i і j , паралельних поверхні землі, визначають виразом

$$\underline{Z}_{mij} = j\omega L_{ij} + \underline{Z}_{Gij}, \quad (3.11)$$

де L_{ij} – взаємна індуктивність між двома провідниками в припущенні, що земля має нескінченно велику провідність; \underline{Z}_{Gij} – імпеданс, обумовлений електричним впливом землі [174, 175]

$$\underline{Z}_{Gij} = R_{Gij} + jX_{Gij} = \omega \frac{\mu}{\pi} \underline{J}_m = \omega \frac{\mu}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{je^{-(h_i+h_j)\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_g}} \cos d_{ij}\lambda d\lambda. \quad (3.12)$$

Взаємну індуктивність між двома провідниками можна визначати за спрощеною формулою [174, 175]

$$\underline{M}_{Gij}(\omega) = \left[1 + 2 \ln \frac{10^4}{\gamma(d_{ij} - r) \sqrt{10\pi\omega\sigma_g}} - j \frac{\pi}{2} - j \frac{16(h_i + h_j)10^{-4}}{3} \sqrt{10\pi\omega\sigma_g} \right] 10^{-4} \quad (3.13)$$

де $\gamma = 1,7811$ - стала Ейлера.

Матриця поперечних провідностей між лініями дорівнює

$$\mathbf{G} = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{vmatrix}; \quad (3.14)$$

Діагональні елементи g_{11} і g_{22} матриці \mathbf{G} визначаються як [97, 130, 132, 138].

$$g_{11} = g_{10} + g_{12}, \quad (3.15)$$

$$g_{22} = g_{20} + g_{21}, \quad (3.16)$$

Граничні умови залежать від конкретного типу електроживлення тягової мережі та кількості локомотивів в межах фідерної зони. Для однобічного живлення тягової мережі з одним локомотивом у фідерній зоні та одним локомотивом на першій колії з координатою x_{E1} граничні умови є такими [97, 130, 132, 138].

Для $x = 0$

$$U_3(x=0) = U_{III}, \quad (3.17)$$

$$U_1(x=0) = U_2(x=0) = 0. \quad (3.18)$$

При двобічному живленні тягової мережі, до граничних умов (3.23)-(3.26) необхідно додати рівняння для другої підстанції з координатою $x = d_1$

Для $x = D$

$$U_3(x = D) = U_{III2}, \quad (3.19)$$

$$U_1(x = D) = U_2(x = D) = 0. \quad (3.20)$$

Для розв'язання системи матричних рівнянь (3.19), (3.20) можна формально використати підхід, який застосовується для телеграфних рівнянь двохпровідної лінії [100, 147]. Розділяючи змінні в (3.2), (3.3), одержимо систему диференціальних рівнянь другого порядку [168, 188]

$$\frac{d^2 \mathbf{U}}{dx^2} = \mathbf{ZG} \mathbf{U}, \quad (3.21)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{I}}{dx^2} = \mathbf{GZ} \mathbf{I}. \quad (3.22)$$

Рішення системи (3.21)-(3.22) є такими [97, 130, 132, 138]

$$\mathbf{U} = \exp(-\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_a + \exp(\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_b, \quad (3.23)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{Z}^{-1} \sqrt{\mathbf{ZG}} \left[\exp(-\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_a + \exp(\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_b \right] \quad (3.24)$$

де \mathbf{U}_a , \mathbf{U}_b - відповідно, вектори падаючої та відбитої хвилі напруги, що дорівнюють

$$\mathbf{U}_a = \frac{\mathbf{U}_1 + \mathbf{Z}_C \mathbf{I}_1}{2}, \quad (3.25)$$

$$\mathbf{U}_b = \frac{\mathbf{U}_1 - \mathbf{Z}_C \mathbf{I}_1}{2}, \quad (3.26)$$

де \mathbf{U}_1 , \mathbf{I}_1 - вектори напруг та струмів на вході системи, $\mathbf{Z}_C = \Gamma^{-1} \mathbf{Z}$ - матриця характеристичних (хвильових) імпедансів лінії, $\Gamma = \sqrt{\mathbf{ZG}}$ - матриця констант розповсюдження, а $\mathbf{Y}_C = \mathbf{Z}_C^{-1}$ - матриця характеристичних адмітансів системи.

З (3.23), (3.24) отримано формули для векторів струму та напруги у довільній точці рейкової лінії $x = l$ через граничні значення векторів струму та напруги на живлячому кінці лінії $x = 0$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(l) &= \exp(-\Gamma l) \frac{\mathbf{U}_1}{2} + \exp(-\Gamma l) \frac{\mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1}{2} + \exp(\Gamma l) \frac{\mathbf{U}_1}{2} - \exp(-\Gamma l) \frac{\mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1}{2} = \\ &= ch(\Gamma l) \mathbf{U}_1 - sh(\Gamma l) \mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1 \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(l) &= -\mathbf{Y}_c \left[\exp(-\Gamma l) \frac{\mathbf{U}_1}{2} + \exp(-\Gamma l) \frac{\mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1}{2} - \exp(\Gamma l) \frac{\mathbf{U}_1}{2} - \exp(-\Gamma l) \frac{\mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1}{2} \right] = \\ &= \mathbf{Y}_c sh(\Gamma l) \mathbf{U}_1 - \mathbf{Y}_c ch(\Gamma l) \mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1 \end{aligned} \quad (3.28)$$

або у матричному вигляді

$$\begin{vmatrix} \mathbf{U}_l \\ \mathbf{I}_l \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} ch(\Gamma l) & -sh(\Gamma l) \mathbf{Z}_c \\ \mathbf{Y}_c sh(\Gamma l) & -\mathbf{Y}_c ch(\Gamma l) \mathbf{Z}_c \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{I}_1 \end{vmatrix}. \quad (3.29)$$

3.4.2. Представлення в моделі електрообладнання електропоїзда і дросель-трансформаторів

Еквівалентна схема електрообладнання електропоїзда визначається виходячи з мети моделювання. Метою є визначення реакції рейкових кіл на електромагнітні завади від конкретного електропоїзду, який досліджується, або реакцію на максимально допустимі за нормативними документами рівні ЕМЗ. Відповідно, значення ЕМЗ є відомими як в першому, так і в другому випадку.

В результаті електричне обладнання електропоїзду може бути представлено на еквівалентній схемі в вигляді паралельно з'єднаних резистора і джерела струму [97, 98, 101, 102, 105-109, 115, 119, 130, 132, 133, 137, 141]. Аналітично інтерференція від електропоїзду буде представлена як вектор струму $\mathbf{J}_T = \left\{ \mathbf{j}_{hn}(f_n) \right\}$, компоненти якого відповідають гармонікам тягового струму $\mathbf{j}_{hn}(f_n)$ з частотами f_n , що інжектуються в рейки в точці знаходження електропоїзду x_l . Очевидно,

загальний струм в рейках від поїзда дорівнює сумі струмів всіх гармонік, разом з основною частотою, яка відповідає промисловій частоті (50 Гц) для тяги змінного струму.

$$\dot{J}_T = \sum_n \dot{J}_{hm}, \quad (3.30)$$

де \dot{J}_T загальний тяговий струм електропоїзда, $\dot{J}_{hm} = K_n(f_n) \dot{J}_T$ – струм гармонічної складової з частотою f_n , K_n – коефіцієнт гармоніки з частотою f_n .

Еквівалентна схема колійного трансформатора (дросель-трансформатора) представлена на рис. 3.4.

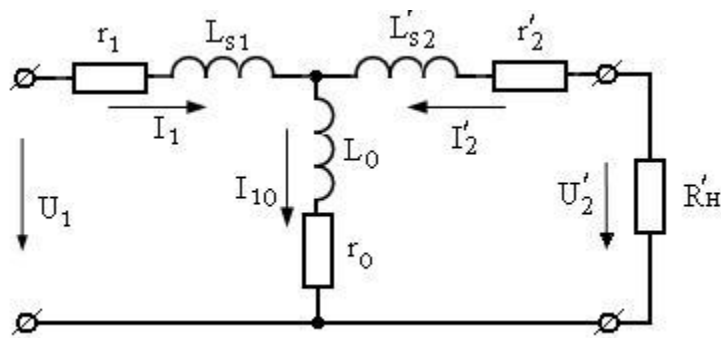


Рисунок 3.3 - Еквівалентна схема колійного трансформатора.

Прийняті наступні позначення:

r_1 , r_2 – активні опори, відповідно, первинної і вторинної обмотки трансформатора;

L_{S1} , L_{S2} – індуктивності розсіювання первинної і вторинної обмотки трансформатора;

r_0 – опір активних втрат в магнітопроводі;

L_0 – основна індуктивність первинної обмотки;

$R'_н$ – опір всієї апаратури релейного кінця рейкового кола, приведений до первинної обмотки трансформатора.

Позначення на рис. 3.4 із штрихом відповідають параметрам вторинної обмотки, приведеним до первинної

$$I_2' = I_2/n; \quad U_2' = U_2 n; \quad (3.31)$$

$$r_2' = r_2 n^2; \quad (3.32)$$

$$x_2' = x_2 n^2; \quad x_2 = 2\pi f L_{S2}. \quad (3.33)$$

Аналогічна еквівалентна схема використовується і для дросель-трансформатора.

3.5. Спрощена модель розподілу гармонік тягового струму в електрично-несиметричній рейковій лінії

Дві тягові рейки однієї колії мають поздовжню асиметрію через нерівність їхніх опорів та поперечну асиметрію через нерівність провідності між рейками та землею. Зворотний тяговий струм, що тече від осей рухомого складу до тягової підстанції, розділяється на два струми з різними значеннями у двох рейках через їх електричну асиметрію. Диференціальний тяговий струм та напруга в рейках впливають на залізничні сигнальні системи і можуть спричинити збої та відмови в роботі рейкових кіл, якщо частоти гармонік зворотного тягового струму знаходяться в смузі частот приймачів РК [8, 9].

У літературі є ряд публікацій про розподіл тягового струму в електрично-асиметричних рейках [65, 130, 132, 138]], але ці роботи розглядають тягову мережу на повздовжньо-однорідній ділянці і кінцеві формули є достатньо складними.

В даному розділі пропонується спрощена модель розподілу гармонік тягового струму в електрично-несиметричній рейковій лінії. Спрощення базується на тому, що коефіцієнт асиметрії в нормально відрегульованих рейкових колах не має перевищувати 6 % для ліній постійного струму і 4 % для ліній змінного струму [7-12]. На практиці рейкові лінії при електротязі змінного струму, відрегульовані відповідно до галузевих інструкції мають коефіцієнт $\sim 2-3$ % [41, 97].

Поздовжня неоднорідність рейок як провідників зворотного тягового струму обумовлена наявністю рейкових з'єднувачів, дросель-трансформаторів, колійних трансформаторів, підключених до рейок на певній відстані один від одного, яка залежить від типу рейкових кіл і може змінюватись від 0,3 до 2,6 км.

Поперечна електрична неоднорідність рейкової лінії обумовлена, головним чином, заземленням на крайню рейку світлофорних матч, металевих опор контактної мережі, релейних шаф та інших металевих конструкцій, що знаходяться в певній зоні біля колії [7-12].

Моделювання електрично-неоднорідних систем здійснюється представленням їх у вигляді послідовно з'єднаних багатополюсів, які відповідають однорідним лініям тягової мережі і локальним структурним неоднорідностям [97, 98, 101, 117, 119, 130, 132, 133, 137, 138, 141]. Однорідні лінії тягового електропостачання представляють на еквівалентній схемі у вигляді довгих ліній з розповсюдженими параметрами [97, 98, 101]. Але така модель є незручною та надмірною для проблеми, що розглядається, через необхідність використання для моделювання великої кількості конкретних значень параметрів всіх елементів, що входять до складу тягової мережі в міжподстанційній зоні. Окрім того, така модель, в більшості випадків, є не потрібною, оскільки при тестуванні нових типів електрорухомого складу або при пошуку причин збоїв рейкових кіл інтерес для практичного використання мають тільки рейкові кола, в яких значеннями гармонійних завад є максимальними, а такими є рейкові кола поблизу поїзду, а також поблизу місця підключення відсмоктуючого фідеру тягової підстанції до рейок. Хоча дана модель дозволяє визначити струм і напругу гармонійних завад в довільному рейковому колі між електропоїздом і тяговою підстанцією.

Дільниця тягової мережі між поїздом та електричною підстанцією представлена у вигляді еквівалентної чотирипровідної системи (рис. 3.4), у якій лінії 1 та 2 відповідають тяговим рейкам, лінія 3 відповідає еквівалентному контактному провіднику, а лінія 0 відповідає провідності землі як провідника для зворотного тягового струму. Поїзд розташований у точці з координатою $x=0$ і рухається у

напрямку осі абсцис, найближчий колійний трансформатор із вхідним імпедансом Z_T знаходиться в точці $x = d$, а тягова підстанція знаходиться в точці з координатою $x = D$. Інші колійні трансформатори або дросельні трансформатори розташовані на відстані від 0,3 до 2,6 км один від одного, залежно від типу рейкових кіл на дільниці. Наявність колійних трансформаторів робить рейки, як провідники для зворотного тягового струму, поздовжньо неоднорідними. Тягові лінії між поїздом і колійним трансформатором або між двома сусідніми трансформаторами можуть розглядатися як однорідні лінії з поздовжньо розподіленими параметрами. Елементарний відрізок розглянутої системи довжиною dx показаний на рис. 3.4. Для частотного діапазону, в якому працюють рейкові кола (до 10^4 Гц), припущення, що домінуючим способом поширення в них електромагнітної хвилі є поперечне електромагнітне (ТЕМ) у діелектрику і поперечне магнітне (ТМ) у провідниках, і що внески інших мод є незначними, є прийнятним [[97, 130, 132, 138, 163, 188].

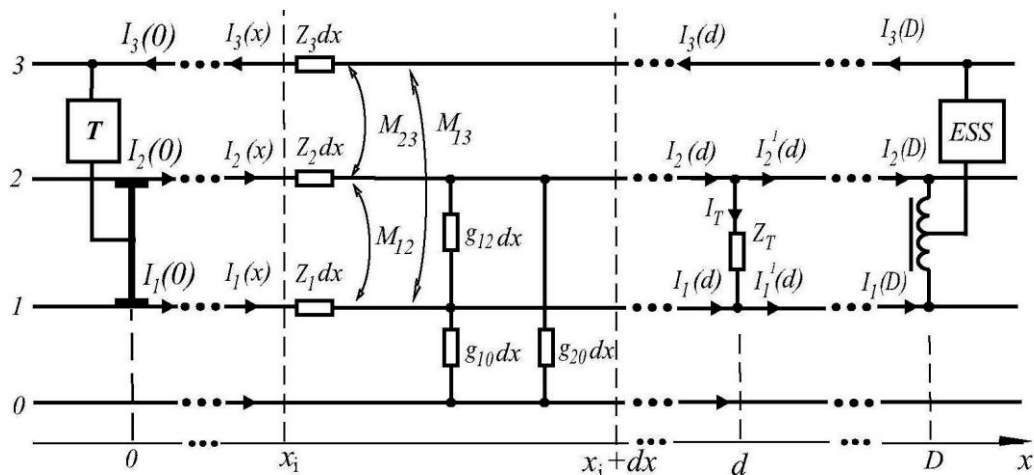


Рисунок 3.4 - Еквівалентна схема тягової мережі між поїздом та дросель-трансформатором

Тому для однорідної дільниці тягової мережі диференціальні рівняння для струмів і напруг гармонік з частотою f можна записати у відповідності до законів Кірхгофа у формі [97, 98, 101, 133, 137, 138, 141]

$$-\frac{d\dot{U}_{1f}}{dx} = \underline{Z}_{11}\dot{I}_{1f} + \underline{Z}_{12}\dot{I}_{2f} - \underline{Z}_{13}\dot{I}_{3f} \quad (3.34)$$

$$-\frac{d\dot{U}_{2f}}{dx} = \underline{Z}_{21}\dot{I}_{1f} + \underline{Z}_{22}\dot{I}_{2f} - \underline{Z}_{23}\dot{I}_{3f} \quad (3.35)$$

$$-\frac{d\dot{U}_{3f}}{dx} = \underline{Z}_{31}\dot{I}_{1f} + \underline{Z}_{32}\dot{I}_{2f} - \underline{Z}_{33}\dot{I}_{3f} \quad (3.36)$$

$$-\frac{d\dot{I}_{1f}}{dx} = g_{10}\dot{U}_{1f} + g_{12}(\dot{U}_{1f} - \dot{U}_{2f}); \quad (3.37)$$

$$-\frac{d\dot{I}_{2f}}{dx} = g_{20}\dot{U}_{2f} + g_{21}(\dot{U}_{2f} - \dot{U}_{1f}); \quad (3.38)$$

де $\underline{Z}_{ii} = R_i + j\omega L_i$ – імпеданс (н.о.д.) i -ї лінії з активним опором R_i (н.о.д.) і індуктивністю L_i (н.о.д.); $\omega = 2\pi f$ – кругова частота гармоніки; $\underline{Z}_{ij} = j\omega M_{ij}$ – взаємний імпеданс (н.о.д.), M_{ij} взаємна індуктивність (н.о.д.) між i -м і j -м провідниками ($i \neq j$); g_{i0} – провідність (н.о.д.) між i -м провідником і землею; g_{ij} – провідність (н.о.д.) між i -м і j -м провідниками. Внаслідок симетрії тягової мережі відносно площини, що проходить через контактний провід і лінію посередині між рейками, можна записати наступні рівняння

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_M \quad (3.39)$$

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32} = \underline{Z}_{MT} \quad (3.40)$$

$$g_{12} = g_{22} = g_M \quad (3.41)$$

Введемо позначення для різниці між опорами двох рейок (н.о.д.) і для різниці між провідностями (н.о.д.) "рейка-земля" для рейок

$$R_1 - R_2 = \Delta R \quad (3.42)$$

$$g_{10} - g_{20} = \Delta g \quad (3.43)$$

З урахуванням (9) і (10) можна записати

$$\underline{Z}_{11} = R_{R0} + j\omega L_{R0} + \frac{\Delta R}{2} = \underline{Z}_{R0} + \frac{\Delta R}{2} \quad (3.44)$$

$$\underline{Z}_{22} = R_{R0} + j\omega L_{R0} + \frac{\Delta R}{2} = \underline{Z}_{R0} - \frac{\Delta R}{2} \quad (3.45)$$

Коефіцієнт асиметрії опорів двох рейок \underline{K}_Z введемо для характеристики по-здовжньої асиметрії рейок, а коефіцієнт асиметрії провідності між кожною рейкою та землею \underline{K}_g введемо для характеристики поперечної асиметрії відповідно до наступних виразів [97, 98, 101, 133, 137, 138, 141]

$$\underline{K}_Z = \frac{\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_0} = \frac{\Delta Z}{\underline{Z}_0}; \quad (3.46)$$

$$\underline{K}_g = \frac{g_{10} - g_{20}}{g_0} = \frac{\Delta g}{g_0} \quad (3.47)$$

Введемо коефіцієнти асиметрії напруги \underline{K}_{Uf} і струму \underline{K}_{If} гармоніки тягового струму з частотою f відповідно до [97, 137, 141]

$$\underline{K}_{Uf} = \frac{\dot{U}_{2f} - \dot{U}_{1f}}{\dot{U}_{0f}} = \frac{\dot{U}_{df}}{\dot{U}_{0f}}; \quad (3.48)$$

$$\underline{K}_{If} = \frac{\dot{I}_{2f} - \dot{I}_{1f}}{\dot{I}_{0f}} = \frac{\dot{I}_{df}}{\dot{I}_{0f}} \quad (3.49)$$

Для спрощення моделі були зроблені деякі припущення. Зворотний тяговий струм, що тече з силових перетворювачів ЕРС розтікається через колісну пару у два майже однакових струми у двох тягових рейках. По мірі проходження струмів в рейках від поїзда до найближчого колійного трансформатора, різниця між цими струмами в двох рейках збільшується за рахунок електричної асиметрії рейок. Після проходження колійного трансформатора диференціальний тяговий струм значно зменшується, але при подальшому протіканні струмів до наступного колійного трансформатора різниця між ними знову збільшується.

У випадку малих коефіцієнтів асиметрії рейок (реальні значення для нормально відрегульованої рейкової лінії не перевищують 4 % [41]) диференціальний струм у рейках досить малий порівняно із загальним струмом у рейках. Відповід-

но до цього в роботі запропонована спрощена модель розподілу гармонік тягового струму в електрично-асиметричних рейках.

На першому етапі в моделі визначається розподіл загального струму гармонік між поїздом та тяговою підстанцією у рейках, в припущенні, що рейкова лінія електрично-симетрична. Таке спрощення не вносить значної похибки в моделюванні при невеликих коефіцієнтах асиметрії рейкової лінії і наявності дросель-трансформаторів і колійних трансформаторів, що, як вказано раніше, зменшують коефіцієнт асиметрії через певні відстані рейкової лінії. Такий підхід значно спрощує рішення диференціальних рівнянь і широко використовується для практичних розрахунків [97, 137].

На другому етапі по визначеному значенню загального струму в рейковій лінії визначають диференціальний струм і напругу на конкретних відрізках тягової мережі, що є мають інтерес для аналізу електромагнітної сумісності приймачів рейкових кіл з тяговою мережею.

Для реалізації моделі підсумуємо рівняння (3.34) з (35) і (3.37) з (3.38) з урахуванням (3.39) - (3.49), і в результаті отримуємо

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_{0f}}{dx} = -\frac{1}{2}\underline{Z}_0\dot{I}_{0f}\left(1 - \frac{\Delta R \underline{K}_{lf}}{2\underline{Z}_0}\right) + \underline{Z}_{MT}\dot{I}_{3f}; \\ \frac{d\dot{I}_{0f}}{dx} = -2g_0\dot{U}_{0f}\left(1 - \frac{\underline{K}_g \underline{K}_{uf}}{4}\right); \end{cases} \quad (3.50)$$

де введені наступні позначення: $\dot{U}_{0f} = \frac{(\dot{U}_{1f} + \dot{U}_{2f})}{2}$ – середнє значення напруги тягового гармоніка з частотою f ; $\dot{I}_{0f} = \dot{I}_{1f} + \dot{I}_{2f}$ – загальний струм гармоніки в двох рейках, $\underline{Z}_0 = (\underline{Z}_{R0} + \underline{Z}_M)$ – імпеданс рейки.

Беручи до уваги, що коефіцієнти асиметрії \underline{K}_{lf} , \underline{K}_{uf} , \underline{K}_Z , \underline{K}_g нормально відрегульованої рейкової лінії не перевищують 0,04, значення другого доданку в дужках у рівняннях (3.50) не перевищують 10^{-4} , а отже, ними можна знехтувати. Це припущення широко використовується в практичних розрахунках розподілу

загального тягового струму в рейках [97, 137]. В результаті ми переписуємо систему рівнянь (3.50) у формі

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_{0f}}{dx} = -\frac{1}{2}\underline{Z}_0\dot{I}_{0f} + \underline{Z}_{MT}\dot{I}_{3f}; \\ \frac{d\dot{I}_{0f}}{dx} = -2g_0\dot{U}_{0f}. \end{cases} \quad (3.51)$$

Диференціальні рівняння (3.51) мають відоме рішення у вигляді суми двох експоненційних функцій [163, 188]

$$\dot{U}_{0f}(x) = \underline{C}_1 e^{\gamma x} + \underline{C}_2 e^{-\gamma x} \quad (3.52)$$

$$\dot{I}_{hi}(x, f) = m\dot{I}_3 - \frac{1}{\underline{Z}_C} (\underline{C}_1 e^{\gamma x} - \underline{C}_2 e^{-\gamma x}) \quad (3.53)$$

де введені такі позначення

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 g_0}; \quad \underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{g_0}}; \quad m = 2\frac{\underline{Z}_{MT}}{\underline{Z}_0} \quad (3.54)$$

Коефіцієнти інтегрування \underline{C}_1 і \underline{C}_2 знаходимо з граничних умов

$$\dot{U}_{0f}(x=D) = \dot{U}_{III}f \quad (3.55)$$

$$\dot{I}_{0f}(x=0) = \dot{J}_f \quad (3.56)$$

де \dot{J}_f струм гармонік з частотою f , яка витікає через колісну пару поїзда в рейкову лінію, \dot{U}_{ESSf} є напруга гармоніки тягового струму частотою f на живлячому фідері тягової підстанції.

В залежності від мети досліджень, як відмічено вище, значення цього струму можна використати з результатів вимірювання тягового струму електропоїзду в реальних умовах при тестуванні або експлуатації. Якщо метою є дослідження завадостійкості реальних рейкових кіл при розрахунках струмів і напруг в РК, має бути використано максимально допустимі значення гармонік згідно нормативних документів [48-55, 96, 97, 128, 131].

Для отримання рівнянь для диференціальної напруги $\dot{U}_{df} = \dot{U}_{2f} - \dot{U}_{1f}$ та диференціального струму $\dot{I}_{df} = \dot{I}_{2f} - \dot{I}_{1f}$ гармоніки тягового струму частотою f в рейках визначені різниці рівнянь (3.34) з (3.35) і (3.37) з (3.38) з урахуванням (3.39) - (3.49)

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_{df}}{dx} = -(\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M)\dot{I}_{df} + \frac{\Delta\underline{Z}}{2}\dot{I}_{0f}; \\ \frac{d\dot{I}_{df}}{dx} = \Delta g\dot{U}_{0f} - (g_0 + 2g_M)\dot{U}_{df}. \end{cases} \quad (3.57)$$

Диференціюючи перше рівняння в системі (3.57) і підставляючи в отримане рівняння $\frac{d\dot{I}_{df}}{dx}$ з другого рівняння системи (3.57), отримаємо

$$\frac{d^2\dot{U}_d}{dx^2} - \Gamma^2\dot{U}_d = P\dot{U}_0 \quad (3.58)$$

де введені наступні позначення

$$\underline{\Gamma}^2 = (\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M)(g_0 + 2g_M) + \frac{\Delta\underline{Z}\Delta g}{4} \quad (3.59)$$

$$\underline{P} = (\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M)\Delta g + \Delta\underline{Z}g_0 \quad (3.60)$$

Рівняння (3.58) - неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку. Його рішення можна знайти як суму загального рішення однорідного диференціального рівняння і частинного рішення неоднорідного диференціального рівняння у вигляді

$$\dot{U}_{df}(x) = (\underline{A}_1 e^{\underline{\Gamma}x} + \underline{A}_2 e^{-\underline{\Gamma}x}) + \underline{Q}(\underline{C}_1 e^{\underline{\gamma}x} + \underline{C}_2 e^{-\underline{\gamma}x}) \quad (3.61)$$

Диференціюючи (3.61) і підставляючи отриманий вираз у перше рівняння системи (3.57), ми отримали вираз для диференціального струму гармоніки частоти в рейках

$$\dot{I}_{df}(x) = -\frac{\underline{\Gamma}}{(\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M)}(\underline{A}_1 e^{\underline{\Gamma}x} + \underline{A}_2 e^{-\underline{\Gamma}x}) + \underline{H}(x) \quad (3.62)$$

де

$$\underline{Q} = \frac{P}{\underline{\gamma}^2 - \underline{\Gamma}^2} \quad (3.63)$$

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M + \frac{Q\underline{\Delta Z}}{4} \quad (3.64)$$

$$\underline{H}(x) = \frac{1}{\underline{Z}_A} \left[\frac{1}{2} (\underline{Q}\underline{Z}_0 + \underline{\Delta Z}) \dot{I}_{0f}(x) - \underline{Q}\underline{Z}_{MT} \dot{I}_3 \right] \quad (3.65)$$

Константи інтегрування \underline{A}_1 і \underline{A}_2 знаходимо з граничних умов

$$\dot{U}_{df}(x=0) = 0 \quad (3.66)$$

$$\dot{U}_{df}(x=d) = \dot{I}_{0f}(x=d) \underline{Z}_F \quad (3.67)$$

де \underline{Z}_F загальний імпеданс навантаження в кінці рейкового кола, тобто в точці з координатою x , яка складається з паралельно з'єднаного вхідного опору колійного трансформатора \underline{Z}_T і вхідного опору рейок \underline{Z}_{RL} , розташованих між точками з координатами d і D

$$\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_R \underline{Z}_{RL}}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_{RL}} \quad (3.70)$$

В результаті ми отримуємо вирази для констант інтегрування у формі [97, 137].

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{\underline{\alpha} - \underline{\beta}} \left[\underline{H}(d) \underline{Z}_F - \underline{Q} \dot{U}_{0f}(d) + \underline{\beta} \underline{Q} \dot{U}_{0f}(0) \right] \quad (3.71)$$

$$\underline{A}_2 = \frac{1}{\underline{\beta} - \underline{\alpha}} \left[\underline{H}(d) \underline{Z}_F - \underline{Q} \dot{U}_{0f}(d) + \underline{\alpha} \underline{Q} \dot{U}_{0f}(0) \right] \quad (3.72)$$

де

$$\underline{\alpha} = e^{\underline{\Gamma}d} \left(1 + \frac{\underline{\Gamma} \underline{Z}_F}{\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M} \right) \quad (3.73)$$

$$\underline{\beta} = e^{-\underline{\Gamma}d} \left(1 - \frac{\underline{\Gamma} \underline{Z}_F}{\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M} \right) \quad (3.74)$$

3.6. Результати моделювання

На основі розробленої моделі проведено дослідження розподілу диференціальної напруги та струму гармонік тягового струму у рейках залежно від коефіцієнтів поздовжньої \underline{K}_z та поперечної \underline{K}_g асиметрії рейок, а також в залежності від частоти гармоніки f та відстані від поїзда [97, 137].

Диференціальна напруга \dot{U}_{df} та струм \dot{I}_{df} у рейках представлені у відносній формі як відношення їх значень до середньої напруги \dot{U}_{0f} та загального струму \dot{I}_{0f} в рейках відповідно, тобто у вигляді коефіцієнтів асиметрії напруги \underline{K}_{Uf} та струму \underline{K}_{If} , оскільки таке представлення є більш зручним для порівняльного аналізу ніж представлення диференціальних значень напруги і струму в абсолютному вигляді. Моделювання проводилося для тягового струму частотою 50 Гц.

Для моделювання використовувались такі параметри тягової системи: відстань між поїздом та тяговою підстанцією - 10 км, відстань від поїзда до найближчого колійного трансформатора - 2 км, провідність ґрунту - $5 \cdot 10^{-3}$ См/км, опір "рейка-земля" – 20 Ом/км. Дослідження проводились для гармонік тягового струму з частотами, аналогічними частотам сигнальних струмів, які використовуються в рейкових колах (25, 420, 480, 580, 720, 780 Гц) [97, 137].

Значення імпедансу рейки та взаємної індуктивності для колії 1520 мм обчислені аналогічно [97, 137]. Ці значення залежать від частоти струму. В роботі проведені результати моделювання тільки для частоти гармоніки 25 Гц. Для інших частот результати показують аналогічні залежності. Для частоти 25 Гц, були використані наступні параметри: $\underline{Z}_{R0} = (0,154 + j \cdot 0,369)$ Ом/км, $M_{12} = M_{21} = (1,427 - j \cdot 0,157)$ мГн/км, $M_{31} = M_{32} = (1,130 - j \cdot 0,157)$ мГн/км.

Коефіцієнт асиметрії \underline{K}_{If} для гармоніки частотою 25 Гц збільшується зі збільшенням відстані від поїзда до колійного трансформатора ($x = 0..2$ км), а також зі

збільшенням коефіцієнтів поздовжньої \underline{K}_Z та поперечної асиметрії \underline{K}_g рейок (рис. 3.5).

Коефіцієнти \underline{K}_{Uf} і \underline{K}_{If} збільшуються при одночасному збільшенні \underline{K}_Z і \underline{K}_g тільки в тому випадку, коли прирости ΔZ і Δg мають однаковий знак (рис. 3.6 (а)), тобто збільшення імпедансу однієї рейки ΔZ супроводжується збільшенням - електропровідності тієї ж рейки до землі Δg .

В іншому випадку, якщо ΔZ і Δg мають різні знаки, їх вплив на коефіцієнти \underline{K}_{Uf} і \underline{K}_{If} частково компенсують один одного (рис. 3.6 (б)). Залежності коефіцієнта \underline{K}_{Uf} від досліджуваних параметрів аналогічні \underline{K}_{If} - залежності, і тому вони не показані на рис. 3.6, 3.7. Коефіцієнти \underline{K}_{Uf} та \underline{K}_{If} зменшуються зі збільшенням частоти гармонік тягового струму при всіх значеннях \underline{K}_Z та \underline{K}_g в межах від 0 до 6 % (рис. 3.7), що відповідає літературним даним.

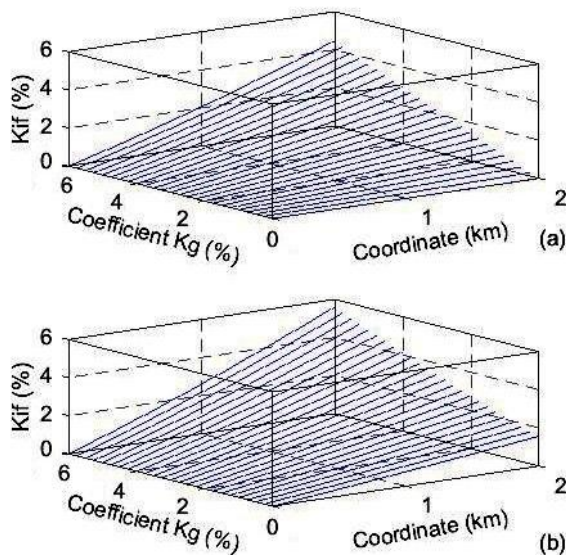


Рисунок 3.5 - Залежність коефіцієнта асиметрії \underline{K}_{If} гармоніки частотою 25 Гц у рейках від відстані від поїзда до колійного трансформатора, а також від коефіцієнта поперечної асиметрії \underline{K}_g , для значень коефіцієнта поздовжньої асиметрії: \underline{K}_z 0 (а) та 2,5% (б)

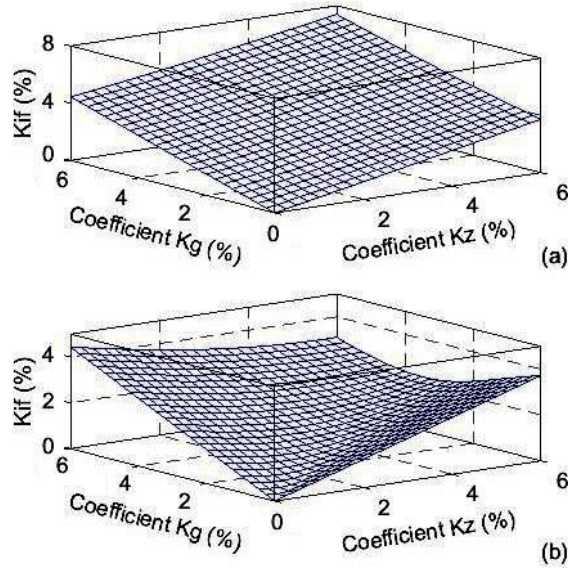


Рисунок 3.6 - Залежність коефіцієнта асиметрії K_{lf} гармоніки частотою 25 Гц у рейках від коефіцієнта поперечної асиметрії K_g та коефіцієнта повздовжньої асиметрії K_z для ΔZ і Δg одного знаку (a) та різних знаків (b)

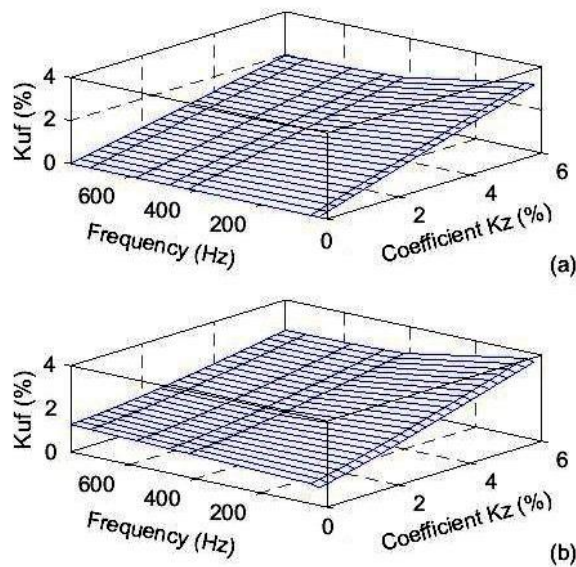


Рисунок 3.7 - Залежність коефіцієнта асиметрії K_{uf} від частоти f гармоніки тягового струму і коефіцієнта і коефіцієнта повздовжньої асиметрії K_z для значень коефіцієнта поперечної асиметрії K_g : 0 (a) і 1 % (b)

3.7. Перевірка адекватності розробленої моделі

Окремі формули і положення запропонованої моделі перевірялися в процесі розробки загальної моделі. Але адекватність всієї моделі має бути підтверджена прямим порівнянням результатів розрахунків розподілу гармонік по довжині рейкової лінії з експериментальними вимірюваннями [97, 137].

В якості експериментальних даних взято часові залежності та спектральний склад тягового струму локомотиву, що виміряні одночасно в силовому ланцюзі локомотиву та в рейковій лінії

Адекватність розробленої моделі було підтверджено вимірюваннями під час руху поїзда вздовж плоскої прямої ділянки колії зі швидкістю ~ 6 км/год з контролем незмінності тягового струму. Перед випробуваннями вимірювали коефіцієнти поздовжньої та поперечної асиметрії рейок цієї колії. Були отримані наступні результати: $\underline{K}_g \approx 0$, $\underline{K}_z \approx 2$ %. Коефіцієнт асиметрії K_{Uf} розраховувався на основі вимірюваних напруг на двох половинах обмотки дросель-трансформатора відносно його середньої точки. Напруги вимірювались у певні моменти часу відповідно до сигналу з поїзду, коли він проходив через контрольні пункти, розташовані на відстані 50 м один від одного в діапазоні від 800 до 500 м відносно колійного трансформатора.

Результати вимірювань та розрахунків коефіцієнтів асиметрії напруги залежно від відстані до колійного трансформатора наведені на рис. 3.8, а відносні значення різниці між вимірюваними та обчисленими значеннями наведені в табл. 3.1. Виміряні значення мають випадкову складову (рис. 3.8), а також систематичну помилку, яка, ймовірно, пов'язана з неточністю вимірювань коефіцієнтів \underline{K}_z і \underline{K}_g . Загалом, результати розрахунків задовільно відповідають результатам вимірювань.

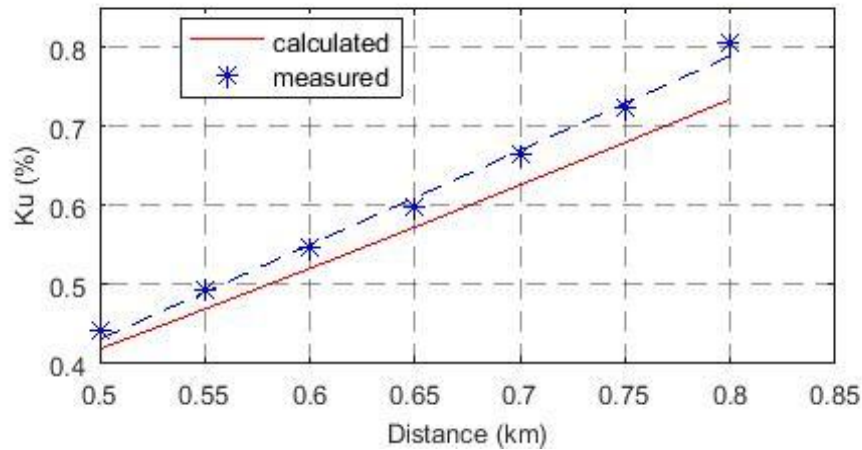


Рисунок 3.8 - Залежність коефіцієнта асиметрії напруги \underline{K}_{Uf} для гармоніки тягового струму 50 Гц в рейках від відстані від поїзда до тягового трансформатора

Таблиця 3.1

Відносна різниця між вимірюваними та обчисленими значеннями коефіцієнта асиметрії напруги \underline{K}_{Uf}

x (км)	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
\underline{K}_U (%)	5.4	5.0	5.0	4.9	6.1	6.4	9.7

3.8. Висновки за розділом

Розроблено математичну модель протікання електричних завад від декількох одиниць ЕРС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії. Адекватність моделі була підтверджена порівнянням результатів розрахунків коефіцієнтів асиметрії напруги в залежності від відстані до колійного трансформатора з результатами вимірювань. Відносні значення різниці між вимірюваними та обчисленими значеннями змінювалися від 4,9 % до 9,7 % в залежності від відстані до поїзда. За характером залежності коефіцієнту асиметрії напруги від відстані до поїзду результати розрахунків задовільно збігаються з результатами вимірювань. На основі розробленої моделі проведено дослідження розподілу диференціальної напруги та струму тягових гармонік у рейках.

РОЗДІЛ 4.

МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ГАРМОНІЧНИХ ЗАВАД НА ПРИЙМАЧ ТОНАЛЬНОГО РЕЙКОВОГО КОЛА

4.1. Загальні положення

При тестуванні нових типів електрорухомого складу в деяких режимах його роботи можливе виникнення випадків, коли в смузі пропускання фільтрів приймачів тональних рейкових кіл спостерігаються рівні гармонік тягового струму зі значеннями поблизу нормативних гранично допустимого рівнів (0,35 А) [105-107, 114, 116, 120]. Враховуючи, що похибка вимірювань в залежності від вибору апаратно-програмних компонентів вимірювальної апаратури (як показано у розділі 2 даної роботи) може досягати більше 10 %, зробити об'єктивний висновок про відповідність або не відповідність рівня гармонійних завад нормативним документам стає не можливим. З урахуванням особливостей національних систем сигналізації та зв'язку, а також умов їх експлуатації, нормативні документи пропонують доповнювати вимірювання завад від рухомого складу проведенням фізичного і математичного моделювання впливу гармонійних завад на колійні приймачі рейкових кіл [128].

Таким чином розробка комп'ютерних моделей, що дозволяють визначити параметри струму на вході колійного приймача РК в залежності від кількості, розташування, режимів роботи джерел електромагнітних завад, особливостей каналізації зворотного тягового струму в рейках, параметрів передачі сигналу РК, впливу дестабілізуючих та інших факторів має практичну значимість.

Нормування допустимого рівня впливу гармонік тягового струму від електрорухомого складу на колійний приймач безстиківого РК необхідно провадити з урахуванням перерахованих факторів [22, 88, 90, 95, 96, 106, 128].

Нові типи рухомого складу експлуатуються на дільницях одночасно із застарілими типами електровозів, до того ж різні дільниці можуть бути обладнані

різними типами рейкових кіл, що також ускладнює задачу визначення можливих збоїв в роботі рейкових кіл і автоматичної локомотивної сигналізації [38-40].

Дослідження завадостійкості колійних приймачів тональних рейкових кіл (ТРК) шляхом подавання у фізичну модель рейкових кіл сигнального струму ТРК і електричних завад, що були синтезовані комп'ютерною програмою, або безпосередньо тягового струму, що був зареєстрований в процесі випробувань нових типів рухомого складу, описані [32-35, 65-70]. В результаті досліджень отримано значення допустимого рівня гармонійних завад для колійних приймачів, які випробувалися в роботі, а саме ПП1-8/8 і ПП1-8/12 на рівні -12 дБ, а для ПП1-9/8 на рівні -17 дБ, тобто 0,42 мА [32-35, 65-70].

Нормативне граничне значення струму на вході колійного приймача ТРК типу ПП1 в нормальному режимі визначено на рівні 0,55 мА шляхом множення нормативного значення струму в рейковій лінії (0,35 мА) на коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця ТРК, що дорівнює $0,12 \cdot 0,5/38 = 1,58 \cdot 10^{-3}$ [34, 35]. Така оцінка є обґрунтованою для максимально допустимого рівня гармонійних завад на вході колійного приймача в нормальному режимі при найбільш несприятливих умовах, а саме для максимального коефіцієнту передачі сигналу в апаратурі релейного кінця.

Для аналізу впливу завад в конкретній рейковій лінії необхідно розраховувати коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця РК з урахуванням параметрів рейкового кола.

Для забезпечення електромагнітної сумісності ТРК з тяговим струмом при максимальній розрахунковій кількості поїздів в фідерній зоні і при рівні гармонік від кожного електровозу 0,35 А, завадостійкість приймача ТРК в нормальному режимі, а саме, максимальний струм завади, що не приводить до збоїв в роботі ТРК, має бути не менше 0,7 мА [34, 35, 65-70].

Завадостійкість ТРК в шунтовому и контрольному режимах роботи дорівнює 0,4 мА при $K_{вн} = 0,58$ і 0,83 мА при $K_{вн} = 0,483$ [34, 35, 65-70].

З наведеного короткого літературного огляду видно, що вплив електричних завад в зворотній тяговій мережі на рейкові кола достатньо повно досліджено в літературі. Також достатньо повно досліджено вплив імпульсних і гармонійних завад на режими роботи тональних рейкових кіл.

Але незважаючи на те, що різні аспекти проблеми ЕМС тягового електропостачання з рейковими колами широко досліджено, задача розробки математичної і комп'ютерної моделі розповсюдження електромагнітних завад в рейковій лінії від ЕРС до колійного приймача і їх впливу на колійний приймач тональних рейкових кіл, що враховує тип і конкретні параметри РК, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати ЕРС, спектральний склад зворотного тягового струму, зареєстрований при випробуваннях ЕРС, відстань між тяговими підстанціями, а також відстань від підстанцій до колійного приймача та інші параметри, в прямій постановці в літературі не описано.

Основою комп'ютерної моделі є узагальнення теоретичних і експериментальних досліджень, наведених в [7-15, 32-35, 65-70], а також досліджень, що були проведені авторами роботи [88-114]. Комп'ютерна модель була використана при випробуваннях нових типів електропоїздів з асинхронним тяговим приводом [22, 106].

Оскільки для нових типів рухомого складу характерним є генерація гармонійних завад в діапазоні роботи ТРК, в роботі розглянуто вплив гармонійних завад на колійний приймач тональних рейкових кіл.

В даному розділі приведена обґрунтування дослідження впливу завад на колійні приймачі тональних рейкових кіл і наведено декілька прикладів результатів моделювання.

Вплив гармонійних електричних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано шляхом знаходження сумарного струму на вході приймача як суму сигнального струму для нормального, шунтового і контрольного режиму роботи в найбільш несприятливих для цих режимів роботи умовах, а також при максимально допустимому струмі завад в рейках.

4.2. Модель розповсюдження завад в рейковому колі

Загальна еквівалентна схема тонального рейкового кола може бути представлена у вигляді трьох каскадно-з'єднаних чотирьохполюсників, Н, К, РЛ, що відповідають апаратурі живлячого і релейного кінця РК, а також рейковій лінії (рис. 4.1) [7-12]. До входніх і вихідних виводів чотирьохполюсника РЛ під'єднані елементи, що відповідають імпедансам суміжних рейкових ліній для безстикових РК. Схема заміщення і коефіцієнти передачі РЛ суттєво змінюються в залежності від режиму роботи (нормальний, шунтовий, контрольний), а також внаслідок зміни провідності (імпедансу) ізоляції баласту ($Var(Y_i)$) і повздовжнього опору рейкових ліній ($Var(Z_r)$) (що відбувається, головним чином, внаслідок зміни опору рейкових з'єднувачів). Модель має враховувати також зміни напруги живлячого генератора і, за необхідності, також зміни параметрів елементів. Поряд із сигнальним струмом на колійний приймач РК впливають електромагнітні завади (ЕМЗ) (рис. 4.1) [20-25].

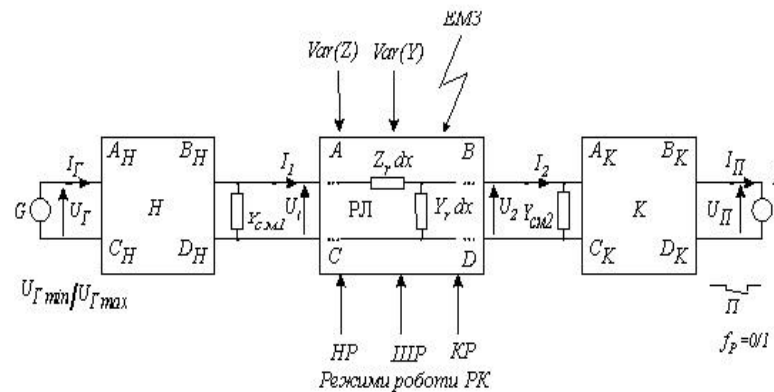


Рисунок 4.1 - Загальна еквівалентна схема тонального рейкового кола

Для аналізу впливу електричних завад на колійний приймач в моделі необхідно визначити сумарний струм на вході колійного приймача від джерела живлення РК при найбільш несприятливих умовах передачі струму для режиму роботи рейкового кола, що аналізується, а також струм гармонійних завад від електро-

рухомого складу з частотою в смузі пропускання вхідного фільтру колійного приймача. Тривалість гармонійних електричних завад має бути достатньою для того, щоби викликати збій в роботі РК.

Вихідними даними моделі є електрична схема і параметри РК, мінімальне і максимальне значення напруги живлення $U_{Г\max}$, $U_{Г\min}$, середнє квадратичне значення (СКЗ) струму гармонійних завад, що віддає ЕРС в рейкову лінію на частотах в смузі пропускання вхідного фільтру колійного приймача, їх частота і тривалість, координати ЕРС, схема каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту. Також в залежності від глибини аналізу, модель може включати деякі інші параметри.

Струм на вході колійного приймача рейкового кола визначається як сума сигнального струму і струму завад

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{zn}(t), \quad (4.1)$$

де i_{cn} і i_{zn} є, відповідно, значення сигнального струму і струму завади на вході КП. Значення струмів i_{cn} і i_{zn} знаходять за відомими рівняннями теорії рейкових кіл [7-12]. Оскільки зсув фаз між сигнальним струмом і завадою може значно вплинути на роботу колійного приймача, в моделі передбачено можливість варіювання зсуву фаз в процесі дослідження.

Граничним значенням моделі є сигнальний струм на вході колійного приймача. Цей струм визначається, в залежності від завдання моделювання, за фактичними $(\dot{U}_{Г\text{факт}}, \dot{I}_{Г\text{факт}})$ або граничними $(\dot{U}_{Г\max}/\dot{U}_{Г\min}, \dot{I}_{Г\max}/\dot{I}_{Г\min})$ значеннями напруги і струму генератора згідно до рівняння [7-12]

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{cn} \\ \dot{I}_{cn} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{Г\text{факт}} \\ \dot{I}_{Г\text{факт}} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

де \mathbf{M}_0 – матриця в А-параметрах для схеми рис. 4.1, що є добутком всіх матриць між генератором і колійним приймачем

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{M}_H \cdot \mathbf{M}_{СМРЛ1} \cdot \mathbf{M}_{РЛ} \cdot \mathbf{M}_{СМРЛ2} \cdot \mathbf{M}_K, \quad (4.3)$$

де \mathbf{M}_{CMPL1} , \mathbf{M}_{CMPL2} - матриці, що відповідають адмітансу суміжних рейкових ліній на початку і в кінці РЛ.

Схему чотирьохполюсника РЛ і параметри матриці \mathbf{M}_{PL} визначають відповідно до режиму роботи РК з урахуванням найбільш несприятливих умов для його виконання.

Для визначення струму, можна використати формулу [7-15]

$$\dot{I}_{cn} = [\underline{A}_0 \underline{Z}_P + \underline{B}_0]^{-1} \dot{U}_{Г\text{факт}}, \quad (4.4)$$

де \underline{C}_0 і \underline{D}_0 є елементами другої строки матриці \mathbf{M}_0 .

Визначення струму завад в рейковій лінії від декількох одиниць ЕРС проаналізовано в [130-133]. Наведені формули дозволяють визначити струм завад в кінці рейкової лінії в точці підключення апаратури релейного кінця РК. Відповідно струм електричних завад на вході колійного приймача визначається через струм завад в кінці рейкового кола і коефіцієнт передачі струму гармонічних завад апаратурою кінця рейкового кола за формулою

$$\dot{I}_{zn} = \underline{K}_{nk} \dot{I}_{zk}, \quad (4.5)$$

де \dot{I}_{zk} – СКЗ струму завад в двох рейках в кінці рейкового кола

$$\dot{I}_{zk} = \dot{I}_{zk1} + \dot{I}_{zk2}. \quad (4.6)$$

При відсутності насичення магнітної системи колійного трансформатора тяговим струмом можна прийняти, що коефіцієнти чотирьохполюсника апаратури кінця рейкового кола для гармонік тягового струму дорівнюють відповідним коефіцієнтам для сигнального струму. Таким чином вираз для коефіцієнта передачі струму гармонічних завад запишемо у вигляді

$$\underline{K}_{nk} = 0,5 \cdot [\underline{C}_k \underline{Z}_r + \underline{D}_k]^{-1} K_a \quad (4.7)$$

де \underline{C}_k і \underline{D}_k є елементами другої строки матриці \mathbf{M}_k , \underline{Z}_p – опір колійного приймача, K_a – коефіцієнт асиметрії РЛ в кінці РК

$$K_a = \frac{|\dot{i}_{3\kappa1} - \dot{i}_{3\kappa2}|}{\dot{i}_{3\kappa1} + \dot{i}_{3\kappa2}}. \quad (4.8)$$

4.3. Визначення сумарного струму на вході колійного приймача

Сумарний струм на вході колійного приймача складається із сигнального струму з несучою частотою f_c і струму завади з частотою f_3 , яка у загальному випадку відрізняється від частоти f_c . Завади, що можуть викликати збій в роботі колійного приймача, мають бути в смузі пропускання вхідного фільтра КП. Оцінку їх впливу на колійний приймач необхідно провадити з урахуванням ослаблення амплітуди гармонійних завад відповідно до амплітудно-частотної характеристики вхідного фільтру [7-15].

Сумарний струм на вході колійного приймача, що складається із сигнального струму і струму гармонійної завади можна представити у вигляді

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{3n}(t) = I_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + I_3 \cos(\omega_3 t + \varphi_3) \quad (4.9)$$

де I_c , ω_c , φ_c , I_3 , ω_3 , φ_3 – відповідно, амплітудне значення, кругова частота й початкова фаза, сигнального струму і струму гармонійної завади.

Сумарний струм двох гармонійних струмів змінюється у часі з частотою, що дорівнює середньому арифметичному значень частот сигнального струму ω_c й завади ω_3 і має биття за амплітудою і фазою відповідно до виразу

$$i_o = I_o \sin \left[\frac{\omega_c + \omega_3}{2} t + \frac{\varphi_c + \varphi_3}{2} + \varphi(t) \right], \quad (4.10)$$

де:

$$I_o = [I_c^2 + I_3^2 + 2I_c I_3 \cos[(\omega_c - \omega_3)t + \varphi_c - \varphi_3]]^{1/2} \quad (4.11)$$

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{I_c - I_3}{I_c + I_3} \times \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c - \omega_3}{2} t - \frac{\varphi_c - \varphi_3}{2} \right) \right] \quad (4.12)$$

4.4. Аналіз завадостійкості тональних рейкових кіл

Вплив гармонійних електричних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано для нормального, шунтового і контрольного режимів роботи для максимально допустимих значень струму завад, що дозволило порівняти результати аналізу з результатами, наведеними в літературі [32-35, 65-70].

4.4.1. Моделювання струму на вході КП ТРК у нормальному режимі

Граничні значення для моделювання струму на вході ТРК у нормальному режимі взяті відповідно технічній документації на колійний приймач ТРК:

- СКЗ сигнального струму на вході колійного приймача ТРК взято на рівні 3 мА, що відповідає мінімальному розрахунковому значенню безперервного струму, яке забезпечує надійне спрацювання колійного приймача і приймається при розрахунках регулювальних таблиць ТРК [32-35, 65-70].

- СКЗ завад для моделювання взяті на рівні гранично допустимих значень, тобто 0,55 і 0,7 мА [32-35, 65-70].

Формули (9)-(12) дозволяють визначати сумарний струм на вході колійного приймача за значеннями гармонійних завад від ЕРС в рейковій лінії.

Порівняння середнє-квадратичного значення сумарного струму на вході КП зі струмом спрацювання колійного реле, при якому стан ТРК відповідає нормальному режиму ($f_n = 1$) або переходу колійного приймача в стан $f_n = 0$, тобто відпускання якоря реле дозволяє визначати стан колійного приймача при різних варіаціях параметрів моделі і, відповідно, визначити причини можливих збоїв в роботі РК

Для ілюстрації розглянутої моделі проведено моделювання для сигнального струму з несучою частотою 420 Гц і частотою маніпуляції 8 і 12 Гц ідеальної форми. Проведення досліджень на одній частоті не обмежує придатності висновків

для інших частот сигнального струму ТРК, оскільки, як буде показано далі, на результати аналізу впливає різниця частот сигнального струму і струму завади, яка визначає період биття (коливання) амплітуди сумарного сигналу на вході колійного приймача. На рис. 4.2 наведено часову залежність сумарного струму на вході приймача ТРК, отриманого підсумуванням сигнального струму із СКЗ 3 мА із завадою із СКЗ 0,7 мА.

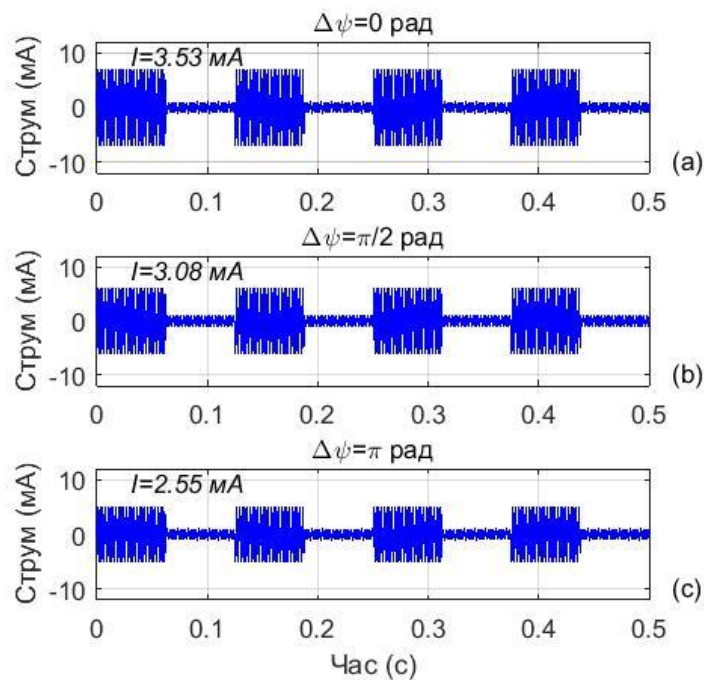


Рисунок 4.2 - Струм на вході приймача ТРК при СКЗ завади 0,7 мА

Як видно з рисунку при збільшенні зсуву фаз $\Delta\psi$ в ряду $0, \pi/2, \pi$ СКЗ сумарного струму зменшується і при найбільш несприятливому значенні зсуву фаз, що дорівнює $\Delta\psi = \pi$, СКЗ зменшується до 2,55 мА, що є меншим за струм спрацьовування колійного приймача. Очевидно, це викликає нестабільну роботу колійного приймача ТРК і може привести до збою нормального режиму ТРК.

При нерівності частоти завади і частоти сигнального струму, згідно з (4.9)-(4.12) виникає биття (коливання) амплітуди сумарного струму з періодом

$$T_B = \frac{2\pi}{|\omega_c - \omega_s|} \quad (4.12)$$

Биття амплітуди струму на вході колійного приймача ТРК може вплинути на роботу приймача в нормальному режимі, якщо СКЗ струму на інтервалі тривалістю більше, ніж 0,6 с зменшиться нижче СКЗ струму надійного спрацьовування приймача. Період коливань амплітуди тривалістю більше 0,6 с виникає при різниці частот сигналу і завади меншій, ніж 1,6 Гц. Дослідження було проведено для двох значень різниці частот сигнального струму і струму гармонійної завади $\Delta f = 0,5$ і 1 Гц, а також для двох значень СКЗ струму завади, а саме 0,55 і 0,7 мА (рис. 4.3, 4.4).

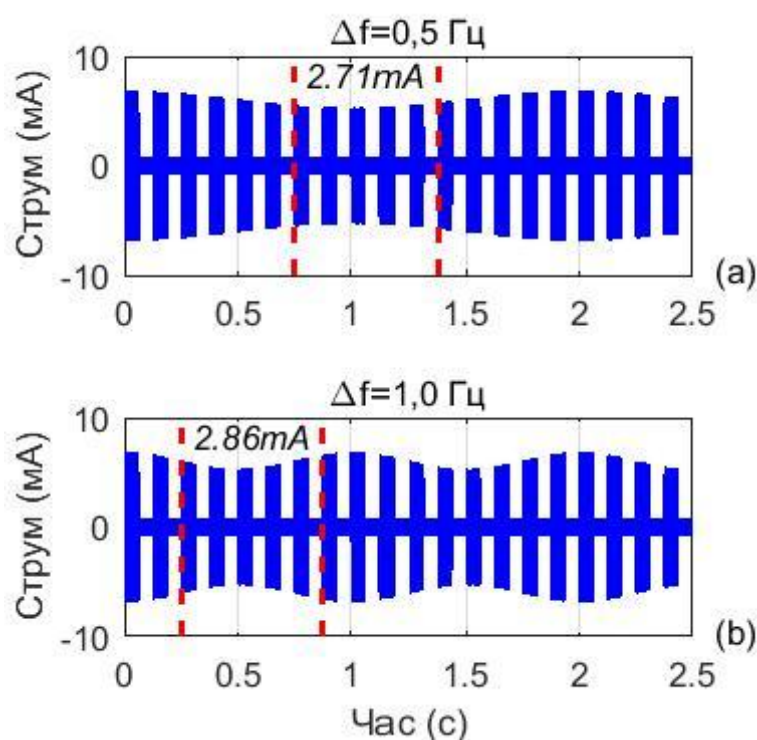


Рисунок 4.3 - Часова залежність струму на вході КП ТРК при СКЗ гармонійної завади 0,55 мА

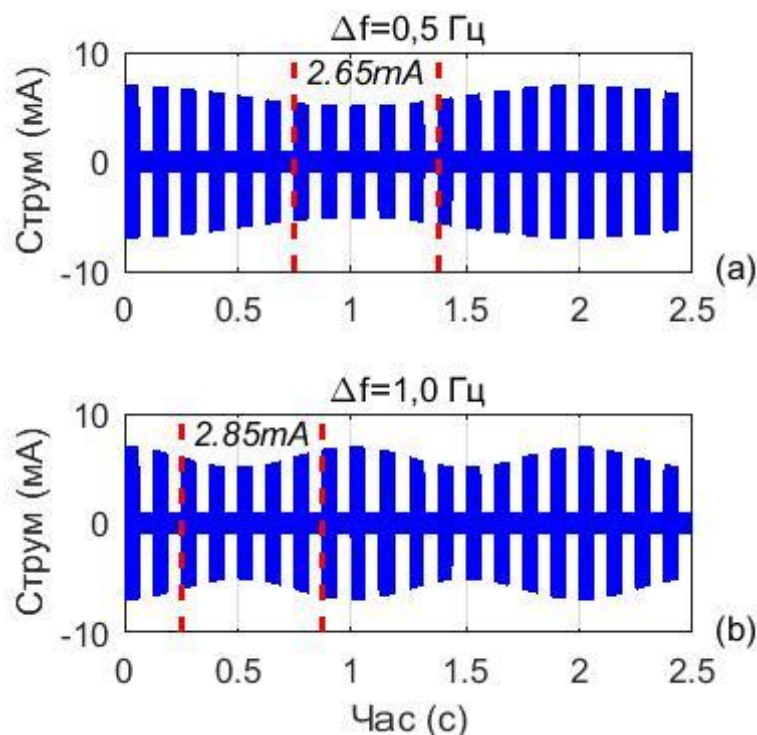


Рисунок 4.4 - Часова залежність струму на вході КП ТРК при СКЗ гармонійної завади 0,7 мА

Внаслідок коливань амплітуди сумарного струму на вході колійного приймача на його часовій залежності спостерігаються інтервали, в яких амплітуда значно зменшується. В межах цих інтервалів були вибрані сегменти тривалістю $5 \times 0,125 = 0,625$ с.

Межі обраних сегментів позначені вертикальними лініями (рис. 4.3, 4.4) і для них підраховано СКЗ сумарного струму. Отримано такі результати. Для завади із СКЗ 0,7 мА при $\Delta f = 0,5$ Гц на інтервалі тривалістю більше 0,6 с СКЗ струму на вході колійного приймача дорівнює 2,65 мА. Це значення є меншим ніж струм надійного спрацьовування колійного реле (3 мА) і впритул наближено до гранично допустимого струму спрацьовування колійного приймача ТРК на рівні від 2,6 до 2,61 мА [196].

Таким чином отримано, що під дією електричної гармонійної завади з максимально допустимим для нормального режиму струмом 0,7 мА при різниці фаз сигнального струму і струму гармонійної завади в інтервалі від 0 до 0,5 Гц мож-

ливе виникнення при несприятливих умовах в струмі на вході колійного приймача інтервалів тривалістю більше 0,6 с, які періодично повторюються, СКЗ яких може бути меншим за СКЗ надійного спрацьовування колійного приймача. Очевидно, це може викликати збій в роботі ТРК в нормальному режимі. Такі результати узгоджуються з запропонованим в [197] граничним значенням завадостійкості приймача ТРК в нормальному режимі.

4.4.2. Моделювання струму на вході КП ТРК у шунтовому і контрольному режимах

Граничні значення для моделювання струму на вході ТРК у шунтовому і контрольному режимах взято відповідно технічній документації на колійний приймач ТРК і галузевим інструкціям:

- залишкова напруга на вході колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимах не може перевищувати 0,23 В, що відповідає струму 1,4 мА [196].

- граничне значення СКЗ гармонійної завади взято на рівні 0,4 мА при $K_{BH} = 0,58$ [65-70, 197].

Моделювання сумарного струму на вході колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимах проведено для двох значень різниці частот сигнального струму і завади $\Delta f = 0,5$ і 1 Гц (рис. 4.5).

Внаслідок биття амплітуди на часовій залежності струму в шунтовому або контрольному режимі спостерігаються сегменти тривалістю $5 \times 0,125 = 0,625$ с, що періодично повторюються, амплітуда яких суттєво зростає.

Межі обраних сегментів позначені вертикальними лініями (рис. 4.5). Для них підраховано СКЗ сумарного струму на вході колійного приймача.

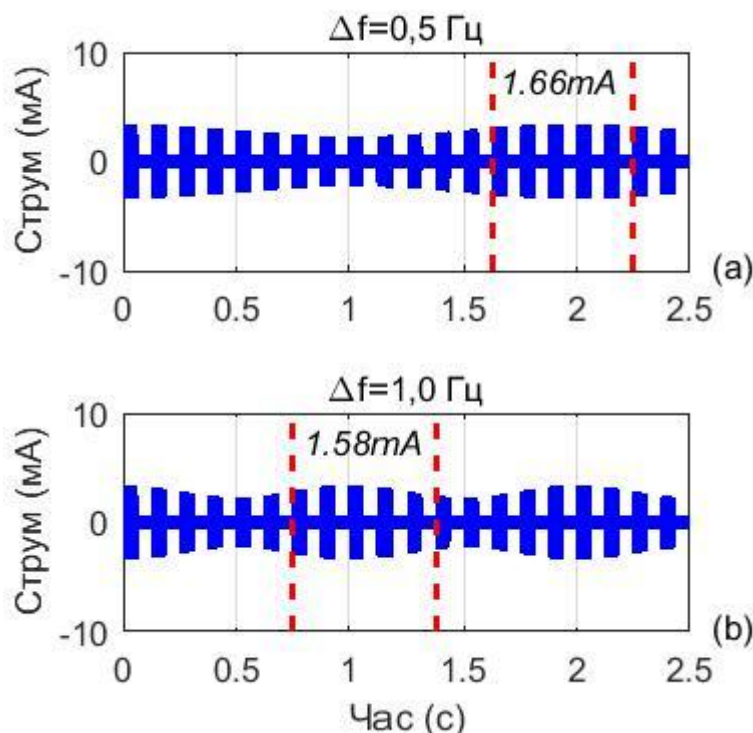


Рисунок 4.5 - Часова залежність струму на вході КП ТРК в шунтовому режимі при СКЗ гармонійної завади 0,4 мА

Для $\Delta f = 0,5 \text{ Гц}$ СКЗ струму на вході приймача дорівнює 1,66 мА, а для $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ СКЗ дорівнює 1,58 мА. Ці значення перевищують граничне значення 1,4 мА для шунтового або контрольного режимів.

Таким чином, під дією електричної гармонійної завади з максимально допустимим для шунтового або контрольного режимів струмом (0,4 мА) при несприятливих умовах можливе виникнення в струмі на вході колійного приймача ТРК сегментів тривалістю більше 0,6 с, що періодично повторюються, СКЗ яких перевищує граничне значення. Внаслідок таких завад може виникнути небезпечна відмова в роботі тональних рейкових кіл.

4.5. Висновки

Удосконалено математичну модель впливу гармонічних завад на колійний приймач ТРК з урахуванням амплітуди, частоти і фазового зсуву гармонік тягового струму відносно частоти сигнального струму.

Визначено параметри електричних завад, які можуть привести до збою в роботі РК в нормальному, шунтовому і контрольному режимах. Завади на вході колійного приймача ТРК зі струмом більшим ніж 0,7 мА і частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц відносно частоти сигнального струму викликають появу періодичних зменшень (провалів) сигнального струму нижче рівня надійного спрацьовування КІ з тривалістю більшою ніж 0,6 с, що приводять до збою у роботі ТРК в нормальному режимі.

Завади на вході колійного приймача ТРК зі струмом більше ніж 0,4 мА і частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц відносно частоти сигнального струму викликають появу періодичних підвищень струму на вході колійного приймача ТРК вище за рівень його надійного відпускання і тривалістю більше 0,6 с, що приводять до збою в роботі ТРК в шунтовому і контрольному режимах.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

5.1. Загальна постановка задачі

Прогрес в розробці нових потужних мікроконтролерів і цифрових технологій передачі даних, а також широке впровадження мікропроцесорних систем автоблокування та електричної централізації виводять на новий рівень можливості застосування інтелектуальних системи безперервного діагностування пристроїв СЦБ. Розроблені в середині минулого століття системи ЧКД практично не використовуються внаслідок морального і фізичного старіння.

Концепція функціональної безпечності сучасних систем СЦБ базується на своєчасному виявленні відмови або збою в їх роботі і своєчасному усуненні їх або переводі системи у безпечний стан.

Відповідно, розробники мікропроцесорних систем управління рухом поїздів передбачають системи самодіагностування і діагностування перефійних пристроїв.

Але діагностування колійних пристроїв СЦБ і, зокрема рейкових кіл, потребує проведення значних теоретичних і експериментальних досліджень та розробки методів моніторингу технічного стану рейкових кіл.

Розробка систем комп'ютерного моніторингу і діагностування рейкових кіл дозволить підвищити надійність і безпечність функціонування колійних пристроїв СЦБ і значно скоротити експлуатаційні витрати.

Відповідно, в даному розділі поставлено задачу підвищення безпечності і надійності функціонування рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад шляхом розробки нових методів інтелектуального діагностування рейкових кіл.

5.2. Розробка методу моніторингу ТРК з використанням вейвлет перетворення і класифікатора на основі штучних нейронних мереж

5.2.1. Характеристика дефектів сигнального струму ТРК

Тональні рейкові кола (ТРК) з сигнальним струмом з несучими частотами 420, 480, 580, 720, 780 Гц і частотами модуляції (маніпуляції) 8 або 12 Гц (ТРК-3) почали впроваджуватися в Україні у складі системи автоблокування АБТЦ-2000, починаючи з 2006 р. Рейкові кола ТРК-4 з несучими частотами 4545, 5000, 5555 Гц в Україні не використовуються.

ТРК складаються з генератора звукової частоти, фільтра, кабельної лінії, яка з'єднує обладнання, розташоване в релейній на залізничній станції, з рейковим колом, що може бути на відстані до десяти кілометрів від станції, узгоджувачів колійних трансформаторів і пристроїв захисту апаратури ТРК від перенапруг, ввімкнених між рейками і кабельною лінією, а також кабелю, по якому сигнальний струм повертається в релейне приміщення до приймача ТРК. Колійний приймач виконує критично важливу для безпеки функцію контролю стану рейкового кола і визначає вільність або зайнятість рейкового кола і його справність.

Амплітудно-маніпульовані сигнали, що використовують в ТРК, мають низьку завадостійкість, тому широкосмугові частотні завади від електрифікованої залізниці можуть впливати на безпечність роботи рейкового кола [4-12].

Для забезпечення надійної та безпечної роботи рейкових кіл обслуговуючий персонал періодично вимірює вручну напругу на приймачах і генератора всіх рейкових кіл [196]. Періодичність обслуговування становить один місяць, а в деяких випадках, можливе зменшення до одного тижня. Такий моніторинг напруги в ТРК є трудомістким і коштовним.

Для автоматизації вимірювань напруги на живлячому і релейному кінці ТРК в деяких дистанціях розроблялися системи автоматичного контролю напруги, що склалися з мультиплексора, аналогово-цифрового перетворювача і комп'ютера.

Мультиплексор циклічно підключав АЦП до живлячого і релейного кінця ТРК, що дозволяло виміряти напругу в цих точках і заносити її в пам'ять комп'ютера. Але такі системи не мали сертифіковані як вимірювальний пристрій і не були затверджені для використання.

Сучасні комп'ютерні системи автоматичного блокування (АБТЦ-М, АБТЦ-ЕН, МАБ-У) дозволяють автоматично вимірювати середньоквадратичне значення напруги на рейкових колах. Це дозволяє обслуговуючому персоналу дистанції сигналізації та зв'язку своєчасно виявляти відхилення параметрів ТРК від значень, визначених регульовальними таблицями і застосовувати необхідні засоби.

Але проблемним питанням є точність визначення напруги на ТРК. Розрахунки ТРК виконуються для не модульованого сигналу з несучою частотою і перераховують на модульований ідеальний сигнальний струм без дефектів.

Форма сигнального струму по мірі проходження в рейковому колі значно спотворюється (рис. 5.1). В реальних рейкових колах дефекти сигнального струму можуть бути ще більш значними (рис. 5.2).

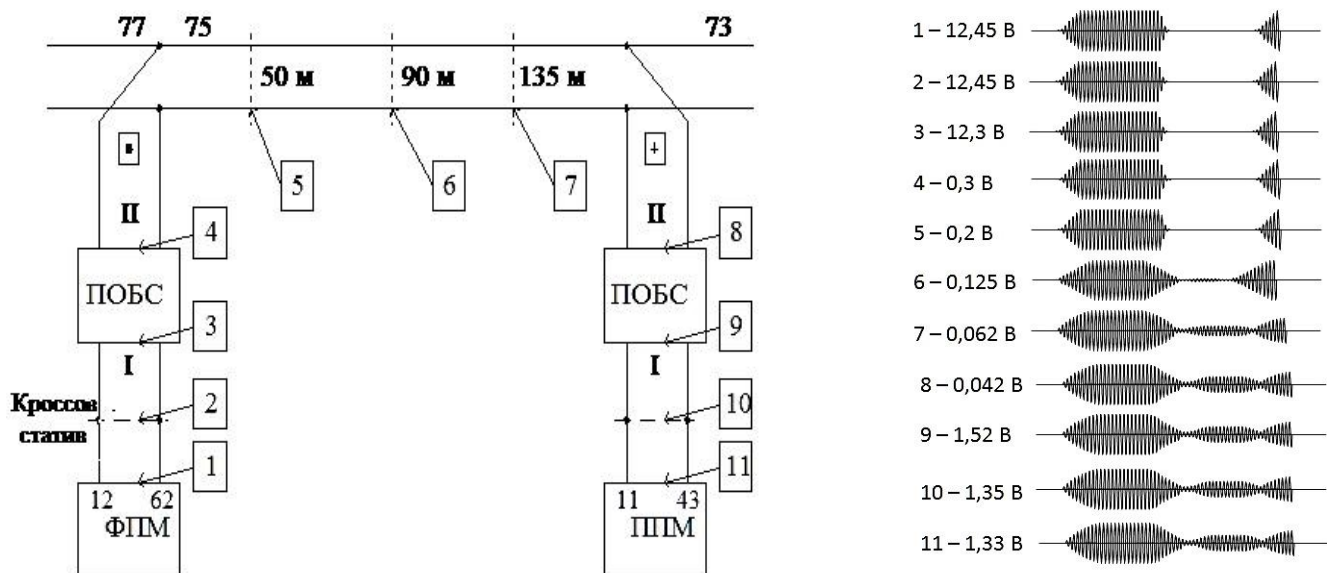


Рисунок 5.1 - Структурна схема ТРК і форма сигнального струму в різних точках рейкового кола

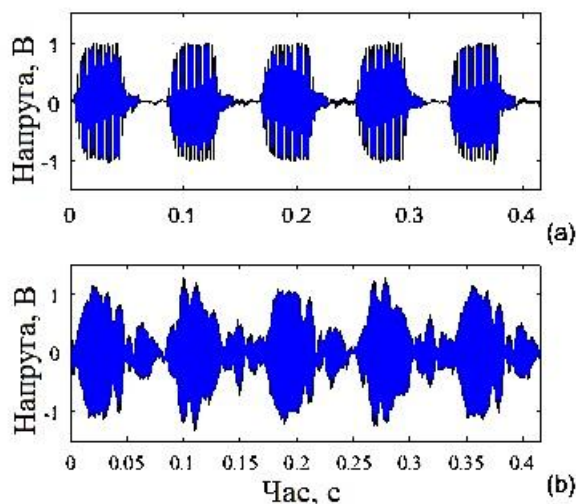


Рисунок 5.2 - Часова залежність напруги на вході колійного приймача ТРК-3 при нормальних умовах роботи (а) і при значних спотвореннях (б) (за результатами вимірювань на станції Баглій Придніпровської залізниці).

Розрахунки регулювальних таблиць ТРК ведуться для ідеального амплітудно-маніпульованого сигнального струму. Очевидно, що виміряна напруга для сигнального струму (рис. 5.1) буде відрізнятися від наведеної в регулювальних таблицях.

Спотворення сигнального струму ТРК можуть бути викликані короткочасними електромагнітними завадами, які виникли внаслідок комутаційних процесів в тяговій мережі, або тривалими електромагнітними завадами внаслідок електромагнітного впливу, наприклад, високовольтної лінії електропостачання.

Іншою причиною появи дефектів сигнального струму можуть бути деградаційні процеси в елементах рейкового кола, а саме, зменшення ізоляції кабельної лінії, старіння апаратури ТРК (колійних трансформаторів, фільтрів і т.д.), а також зниження ізоляції баласту рейкової лінії.

Дефекти сигнального струму ТРК, викликані електромагнітними завадами і дестабілізуючими факторами, можуть бути настільки значними, що приймач буде неправильно реагувати на сигнальний струм, незважаючи на те, що його серед-

ноквадратичне значення на напруги відповідає нормам. Збої в роботі ТРК будуть, якщо амплітуда імпульсів в сигнальному струмі ТРК зменшиться нижче певного рівня, або в паузі між імпульсами появиться струм, обумовлений електричними завадами в рейковій лінії

Таким чином, розробка методу автоматичного моніторингу дефектів сигнального струму в тональних рейкових колах є важливим завданням. Сучасні комп'ютерні системи сигналізації дозволяють реалізувати такий контроль доповненням існуючої системи контролю напруги ТРК програмним забезпеченням для проведення моніторингу форми сигнального струму ТРК і контролю його параметрів.

В європейських країнах для автоматизації виявлення спотворень сигнального струму в тональних рейкових колах було запропоновано кілька методів, заснованих на використанні електричних моделей ТРК [199, 200], класифікатор Демпстера-Шефера [206], машин опорних векторів [208], мереж Петрі [209], просторових і часових мереж [210].

Нові потужні методи обробки сигналів з'явилися в останні десятиліття. Вейвлет-перетворення (ВП) широко використовується для аналізу нестационарних сигналів у багатьох практичних застосуваннях [211-213]. ВП дозволяє одночасно аналізувати характеристики сигналу як в часовій, так і в частотній областях, але на відміну від короткочасного Фур'є перетворення (КЧФП), вейвлет-аналіз використовує різні часові вікна, довжина яких залежить від частоти сигналу. Ця властивість ВП робить його дуже ефективним для виявлення особливостей безперервних нестационарних сигналів. Ефективність ВП для аналізу якості електроенергії обговорювалася в багатьох роботах [214-217]. Використання вейвлет-розкладання для аналізу завад в рейкових колах описано в [129, 134, 136, 138, 140]. Останнім часом ентропія показала видатні результати у виявленні дефектів сигналу [218-219]. Різні типи ентропії, такі як Шеннона, логарифмічна, нормальна і гранична, були запропоновані для виявлення особливостей дефектів сигналу.

5.2.2. Характеристика дефектів сигнального струму ТРК

Для двопровідної мережі рейкового кола напруга і струм на живильному кінці РК, тобто на виході генератора (U_G, I_G) і на колійному приймачі (U_R, I_R) зв'язані відомими рівняннями з теорії рейкових кіл [7-12]

$$\begin{bmatrix} U_G \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_R \\ I_R \end{bmatrix} = \bar{M}_T \begin{bmatrix} U_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

де $(ABCD)$ – матриця, що дорівнює доданку матриць в А-формі всіх підсистем, що входять до складу рейкового кола. Розглянутий математичний опис ТРК є основою для розрахунку електричних параметрів рейкових кіл, які забезпечують їх безпечну роботу в кожному режимі (нормальному, шунтовому і контрольному), незалежно від усіх можливих дестабілізуючих факторів, що викликають зміни в параметрах рейкового кола.

5.2.3. Опис сигналів ТРК

Сигнали ТРК з частотою 420 Гц і модульованою частотою 8 Гц реєструвалися на вході приймача рейкового кола з використанням 14-розрядного аналого-цифрового перетворювача і комп'ютера. Частота дискретизації сигналу становила 5 кГц. Сегменти з типовими збуреннями сигналу, які можуть призвести до неправильної роботи рейкових кіл, були обрані шляхом аналізу записаних сигналів. Оскільки більшість сегментів записаного сигналу не має значних дефектів, типові завади були штучно додані до деяких сегментах записаного сигналу, щоб забезпечити необхідну кількість спотворених сигналів для навчання і тестування штучної нейронної мережі (ШНМ) і адаптивної нечіткої нейронної мережі (АННМ).

Значення спотворень сигнального струму були обрані відповідно до вимог, відповідно до яких допустимий рівень гармонійних завад для ТРК-3 становить 0,35 А, а для ТРК-4 - 0,2 А при тривалості завад 0,3 с [197]. Для досліджень були відібрані сегменти сигналу тривалістю 1 с. Такі параметри завади, як амплітуда,

тривалість, частота, фаза, кількість і період повторення, що можуть впливати на роботу ТРК, змінювалися під час моделювання випадковим чином.

На підставі огляду літератури [65-70, 196, 197] були обрані чотири основних типи дефектів сигналу ТРК, які можуть привести до збоїв в роботі ТРК в нормальному режимі, а саме [137, 139, 141, 142]:

- втрата деяких імпульсів або зменшення їх амплітуд нижче певного рівня, що може бути викликано провалами напруги (струму) під час імпульсу;
- поява деяких надлишкових імпульсів в сигналі, які можуть бути викликані викидами під час пауз;
- поява довготривалих завад;
- поява гострих коротких імпульсів (піків).

Приклади часових залежностей таких сигналів наведені на рис. 5.3 [137, 139, 141, 142].

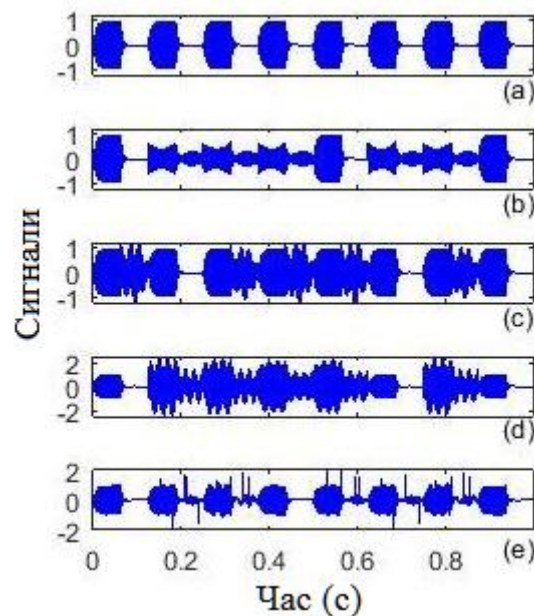


Рисунок 5.3 - Часова залежність сигнального струму без дефектів (а) та сигналів із дефектами у вигляді втрачених імпульсів (b), надмірного числа імпульсів (c), тривалих завад (d) і гострих імпульсів (e)

Електричні завади від тягового струму або деградація параметрів елементів рейкового кола можуть привести до появи різних спотворень форми сигналу ТРК.

Приймач рейкового кола приймає рішення про режим роботи РК на основі порогового розпізнавання імпульсів і пауз в сигналі за умови збігу двох селективних характеристик сигналу, а саме його несучої частоти і частоти модуляції зі смугами пропускання фільтрів приймача ТРК.

Для проведення досліджень і розробки методу визначення наявності тих чи інших типів завад у складі сигнального струму і оцінки чутливості методу до наявності завад, були згенеровано сигнали з декількома комбінаціями спотворень сигнального струму відповідно до наведеного вище переліку. Ступінь спотворень форми сигналів в різних комбінаціях варіювалася за амплітудою, частотою, фазою, тривалістю. Сигнали для досліджень мали наступні параметри: несуча частота становить 420 Гц, частота модуляції – 8 Гц, частота дискретизації – 500 Гц, загальна довжина кожного типу сигналу складала 184448 вибірок.

5.3. Результати дослідження

5.3.1. Вейвлет розкладання сигнального струму ТРК

Для досліджень набули розповсюдження такі типи вейвлет-перетворення: безперервне вейвлет-перетворення (БВП), дискретне вейвлет-перетворення (ДВП) і дискретне вейвлет-пакетне перетворення (ДВПП).

ДВП характеризується як надмірне перетворення, яке подає сигнал у вигляді двовимірного масиву. ДВП забезпечує розкладання сигналу на піддіапазони з шириною смуги, яка лінійно збільшується з частотою. У разі бінарного перетворення ($a_0 = 2$, і $b_0 = 1$), кожна спектральна смуга має ширину приблизно в одну октаву. У цій формі ДВП можна розглядати як особливий вид спектрального аналізатора.

Алгоритм багатосмугового розкладання сигналів, розроблений Mallat [212, 213], реалізується у вигляді двох наборів компонентів (довжиною $2n$), а саме деталізуючих коефіцієнтів D_j , котрі вибирають високочастотну (з малим масштабом) інформацію, що міститься в сигналі, а також апроксимуючих коефіцієнтів

A_j , які вибирають низькочастотну (з великим масштабом) інформацію з сигналу. Обидві компоненти мають понижений розмір $2n - j$, де j є рівнем декомпозиції. Після цього деталізуючи коефіцієнти D_j залишаються незмінними, в той час як апроксимуючі коефіцієнти A_j розкладаються в нові деталізуючі і апроксимуючі коефіцієнти. Такий процес повторюється поки не буде досягнуто необхідного рівня декомпозиції. ДВП може розкласти сигнал в різних масштабах використовуючи базис ортогональних вейвлет-функцій у вигляді

$$f(t) = \sum_k A_m(k) \varphi(t-k) + \sum_k j \sum D_j 2^{\frac{i}{2}} \Psi(2^{-j}t-k), \quad j=1,2,\dots,m, \quad (5.2)$$

де $\varphi(t)$ – масштабуюча функція, а A_m – апроксимуючі коефіцієнти.

ДВПП можна розглядати як узагальнення класичного вейвлет-перетворення, яке забезпечує мультіроздільну здатність і частотно-часовий аналіз нестационарного сигналу. Щоб зробити повне розкладання сигналу в піддіапазонах до деякої бажаної глибини, фільтри низьких і високих частот неодноразово застосовується з подальшим проріджуванням на 2. ДВПП розкладає сигнал не тільки на апроксимуючі компоненти, але і на деталізуючі, які містять важливу інформацію, розташовану в високочастотних компонентах. Таким чином, з використанням ДВПП може бути отримано кращу розподільну здатність сигналу за частотою.

ДВПП може бути представлено як [86 ,212-214]:

$$\begin{cases} d_{0,0}(t) = f(t), \\ d_{i,2j-1}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) d_{i-1,j}(2t-k), \\ d_{i,2j}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) d_{i-1,j}(2t-k), \end{cases} \quad (5.3)$$

де $h(k)$ і $g(k)$ високочастотні і низькочастотні фільтри, відповідно, а $d_{i,j}$ є реконструюючі коефіцієнти вейвлет-пакетного перетворення для i -го рівня і j -го вузла.

5.3.2. Обрання діагностичних ознак

Для обрання діагностичних ознак дефектів сигнального струму ТРК було використано його розкладення з використанням трирівневого дискретного вейвлет-пакетного перетворення (ДВПП) з вейвлетом Волкова-Коровкіна $fk18$. Гістограми відносної енергії (ВЕ) досліджуваних сигналів, взяті в логарифмічних одиницях, показані на рис. 5.4, а часові залежності коефіцієнтів розкладання ДВПП сигналу ТРК без дефектів (ідеального) і сигналів із дефектами для чотирьох вузлів (3.0), (3.3) (3.6) і (3.7) показані відповідно на рис. 5.5, 5.6. Ці вузли обрані тому, що особливості коефіцієнтів ДВПП, які відповідають завадам сигнального струму ТРК, найбільш помітні в цих вузлах. ДВПП-розкладання сигналів дозволяє отримати діагностичні ознаки з часових залежностей коефіцієнтів розкладання в частотних піддіапазонів, де ці ознаки найбільш виражені.

Основні особливості дефектів були виявлені шляхом аналізу енергій вейвлет-розкладання в вузлах (рис. 5.4) і порівнянням коефіцієнтів вейвлет-декомпозиції вихідного (ідеального) сигналу (рис. 5.5) і сигналів з різними видами дефектів (рис. 5.6). Аналіз обраних діагностичних ознак для різного роду дефектів сигнального струму ТРК наведено нижче.

Невідповідна кількість імпульсів за період в сигналі ТРК (поява додаткових імпульсів в паузах або зменшення амплітуди імпульсу нижче певного рівня, тобто втрата імпульсів) може з'явитися під впливом короточасних завал в рейках. Це дефекти сигналу може бути легко виявлені шляхом прямого підрахунку імпульсів протягом певного періоду часу з використанням спеціальної комп'ютерної програми. Зручно виконувати підрахунок імпульсів для часової залежності коефіцієнтів ДВПП в вузлі (3.3), оскільки діапазон частот цього вузла відповідає несучої частоті сигнального струму, і завади з іншими частотами не потрапляють в цей піддіапазон.

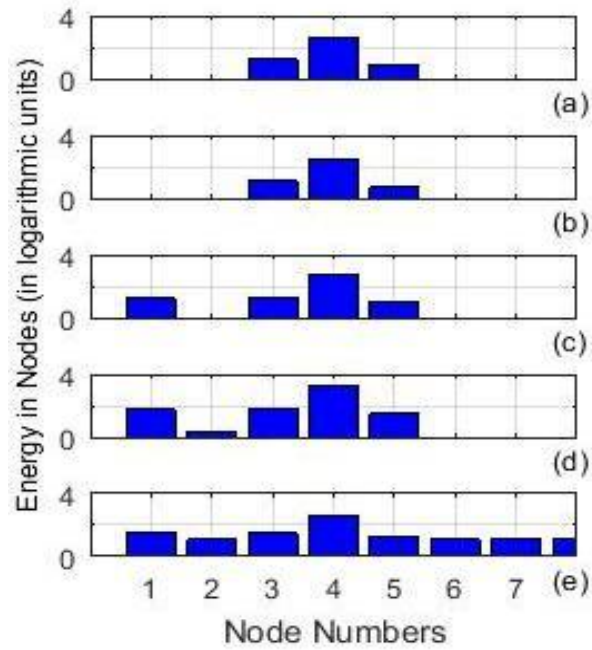


Рисунок 5.4 - Гістограми енергії у вузлах вихідного (ідеального) сигналу (a) та сигналів із втраченими імпульсами (b), із надлишковими імпульсами (c), з довготривалими завадами (d), з різкими імпульсами (e)

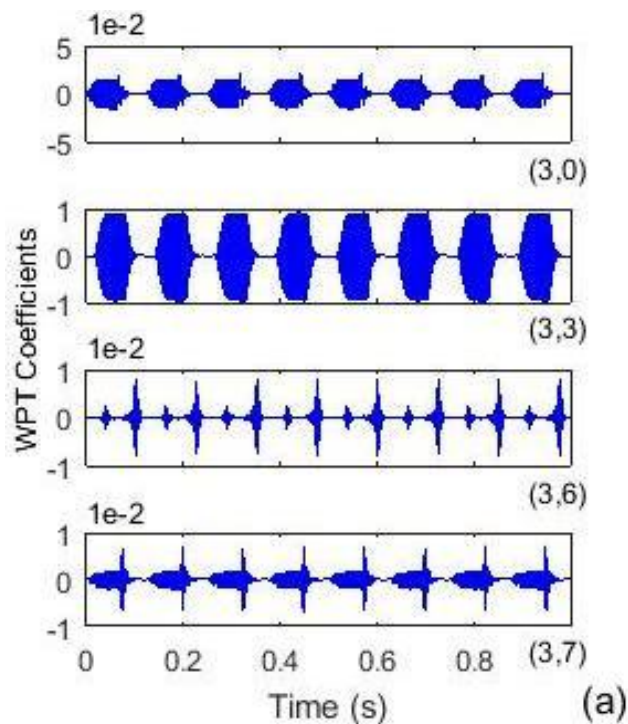


Рисунок 5.5 - Коефіцієнти вейвлет-розкладання вихідного (ідеального) сигналу

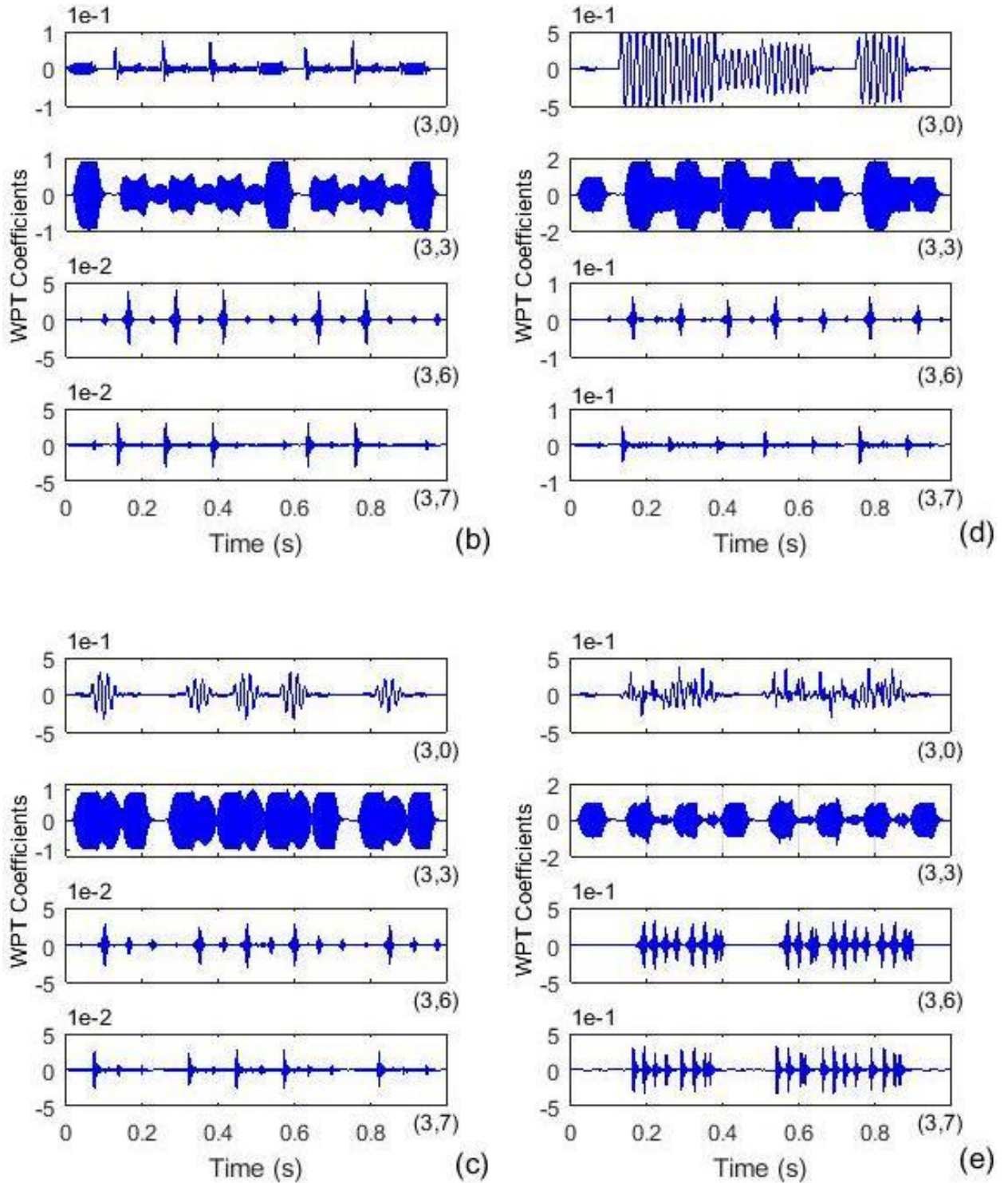


Рисунок 5.6 - Коефіцієнти вейвлет-розкладання сигналів з втраченими імпульсами (b), з додатковими імпульсами (c), із довготривалими завадами (d), із гострими додатковими імпульсами (e)

В роботі реалізований наступний алгоритм підрахунку імпульсів в сигналі ТРК [137, 139, 141, 142]. Компонент сигналу у вузлі (3.3) демодулюється, і потім

імпульси з амплітудою і тривалістю вище певних значень виділяються з використанням дискримінатора амплітуди і тривалості. Імпульси після дискримінатора підраховують і результат порівнюють зі значенням для струму без завад.

Граничний рівень амплітудного дискримінатора визначається відповідно до умов, що імпульси на виході дискримінатора повинні відповідати рівню логічної одиниці, а паузи – логічному нулю приймача рейкового кола.

Таким чином, в якості ознаки неправильної кількості імпульсів в сигналі ТРК прийнята відносна кількість імпульсів (ВКІ), яка за визначенням дорівнює відношенню числа підрахованих імпульсів за певний інтервал сигналу до номінального кількості імпульсів, що має бути в цьому інтервалі (8 імпульсів для вибраного інтервалу (рис. 5.2)). Визначені комп'ютерною програмою значення ВКІ для досліджуємих сигналів наведені в табл. 5.1.

Завади в сигналах ТРК викликані тяговим струмом, який тече по ходовим рейкам разом з сигнальним струмом. Гармоніки тягового струму, що протікають по рейках, створюють напругу на вході приймача рейкового кола тільки в тому випадку, коли між рейками є різниця потенціалів, тобто рейки електрично-асиметричні для тягового струму.

Таблиця 5.1

Значення діагностичних ознак дефектів сигнального струму

Наявність і вид дефектів сигналу ТРК	Значення діагностичних ознак дефектів			
	ВКІ	BE (3.0)	Куртозис	Вихідний вектор
Струм без спотворень (ідеальний)	1.0000	0.0003	1.5601	[0 0 0 0]
З критично зменшеним або втраченим імпульсом	0.3750	0.0009	1.8799	[1 0 0 0]
З додатковим імпульсом в паузі сигналу	1.6250	0.0219	1.0884	[0 1 0 0]
З тривалою інтерференцією	1.0000	0.0311	1.3744	[0 0 1 0]
З гострими імпульсами	1.0000	0.0231	3.1620	[0 0 0 1]

В результаті все гармоніки тягового струму, включаючи основну гармоніку з частотою 50 Гц (для системи електроживлення змінного струму), надходять на вхід приймача ТРК і можуть викликати неправильне декодування сигналу. Ці гармоніки тягового струму потрапляють в різні вузли розкладання сигналу ДВПІ в залежності від їх частот, а найбільш потужний компонент з частотою 50 Гц потрапляє в вузол (3.0) (рис. 5 (d)).

Таким чином, в якості характеристики завад з амплітудою, що перевищує допустимий рівень, була обрана відносна енергія (ВЕ) коефіцієнтів ДВПІ в вузлі вейвлет-розкладання (3.0). Значення ВЕ (3.0) для розглянутих сигналів наведені в табл. 5.1.

Різкі імпульси в сигналі ТРК призводять до збільшення відносної енергії (ВЕ) коефіцієнтів розкладання ДВПІ в вузлах (3.5) ... (3.7), які відповідають піддіапазону більш високих частот (рис. 5.3 (e), 5.5 (e)). Отже, значення ВЕ в цих вузлах можуть бути обрані в якості діагностичної ознаки для визначення сигналів ТРК з гострими імпульсами.

Але найбільш придатною діагностичною ознакою для визначення наявності гострих імпульсів (піків) в сигналі є інший параметр, який називається коефіцієнт ексцесу сигналу або куртозис. Куртозис може визначити зміни коефіцієнтів ДВПІ в часі [220], тому сигнал з гострими імпульсними має більше значення ексцесу, ніж вихідний (ідеальний) сигнал. Математично ексцес визначається як момент четвертого порядку

$$K = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 \quad (5.4)$$

де x_i є i -те значення змінної, \bar{x} і її математичне очікування, N – кількість відліків змінної, σ стандартне відхилення. Значення куртозису для сигналів, що досліджуються, наведені в табл. 5.1.

Визначені діагностичні ознаки можуть бути використані для виявлення та ідентифікації електричних завад та дефектів сигналу ТРК. Але безперервний де-

тальний аналіз сигналу ТРК з використанням аналізу коефіцієнтів вейвлет-перетворення вимагає значних комп'ютерних ресурсів і в більшості випадків є непотрібним, оскільки значні дефекти сигналу ТРК, які можуть викликати збої в роботі рейкових кіл, зазвичай відбуваються протягом обмеженого періоду часу.

Щоб виявити і ідентифікувати сильні завади в сигналі ТРК, які перевищують певний допустимий критичний рівень, що визначається за умов безпечної роботи ТРК, в роботі був запропонований наступний метод обробки сигналу рейкового кола [137, 139, 141, 142].

На першому етапі сегменти сигнального струму ТРК з завадами і дефектам, що перевищують певний допустимий рівень, виявляють за допомогою ентропії Шеннона вейвлет-пакетної енергії.

На другому етапі для виявлених сегментів із значною ентропією Шеннона (тобто значними завадами і дефектами) проводиться детальний аналіз сигналу ТРК для ідентифікації завад і дефектів з використанням розкладання ДВПП.

Ентропія Шеннона вейвлет-пакетної енергії (ЕШВПЕ) визначається наступним чином. Інформація k -го коефіцієнта j -го вузла на i -му рівні ДВПП розкладання сигналу може бути виражена як

$$E_{i,j,k} = \|d_{i,j,k}\|^2 \quad (5.5)$$

Вірогідність k -го коефіцієнту може бути підрахована як

$$p_{i,j,k} = \frac{E_{i,j,k}}{E_{i,j}} \quad (5.6)$$

де $E_{i,j} = \sum_{k=1}^N E_{i,j,k}$ є загальна енергія j -го вузла на i -му рівні; N є число відповідних коефіцієнтів у вузлі.

ЕШВПЕ може бути підраховано як

$$WPESE = -\sum_{k=1}^N p_{i,j,k} \log(p_{i,j,k}) \quad (5.7)$$

де $p_{i,j,k}$ є ймовірність k -го коефіцієнту на i -му рівні в j -му вузлі.

Для оцінки ефективності виявлення дефектів сигналу ТРК з використанням ЕШВПЕ був використаний сигнальний струм ТРК, що був виміряний у рейкових колах зі стабільно працюючою системою сигналізації, а також у рейкових колах, де сигнал ТРК був сильно спотворений.

Для збільшення числа типів і ступеню дефектів сигнального струму, в деяких сегментах виміряного струму додатково створювали дефекти сигналу (дефекти) різного типу і різного рівня. В результаті отримано сигнальний струм довжиною 704 періоди маніпулюючого сигналу (184448 вибірок). Сигнал містив сегмент з вихідним (ідеальним) сигналом (240 періодів) і сегменти сигналів з завадами і дефектами у вигляді зменшених за амплітудою або втрачених імпульсів (80 періодів), додатковим імпульсами в паузі (80 періодів), тривалої інтерференції (80 періодів), з різкими імпульсами (80 періодів), і в кінці сигнального струму – знов сегмент з вихідним (ідеальним, без завад) сигналом (144 періоду).

Амплітуда і тривалість дефектів сигналу не повторювалися, тобто не було періодичного повторення аналогічних завад сигналу. Під час обробки сигналу він був розділений на сегменти з використанням прямокутного ковзного вікна з довжиною, що дорівнює восьми періодам, і для кожного сегмента були розраховані значення ЕШВПЕ.

Отримана часова залежність ЕШВПЕ (WEPSE) (рис. 5.7) показує, що ентропія Шеннона вейвлет-пакетної енергії (ЕШВПЕ) має збільшені значення для інтервалів часу, в яких присутні сигнали з різними типами дефектів. При цьому значення ЕШВПЕ залежить від типу завади або дефектів сигналу і ступеню спотворення форми сигналу. Ці результати підтверджують ефективність використання ЕШВПЕ (WEPSE) для виявлення дефектів в сигналі ТРК

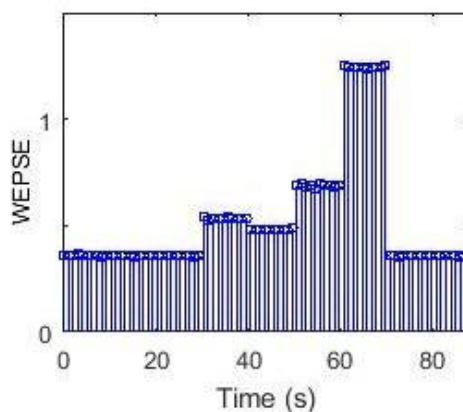


Рисунок 5.7 - Часова залежність ЕШВПЕ (WEPSE) сигнального струму ТРК ідеальної форми та із завадами та дефектами.

5.4. Класифікація дефектів сигнального струму ТРК з використанням штучної нейронної мережі

Тришарова штучна нейронна мережа з прямим зв'язком (ШНН) з трьома вхідними вузлами, прихованим шаром, чотирма вихідними вузлами і нейронами сігмоїдної функції була використана для класифікації завад сигналу ТРК. Кожен вхідний вузол зв'язаний з нейронами прихованого шару, і кожен нейрон цього шару зв'язаний з нейронами вихідного шару [137, 139, 141, 142].

На вхід нейронної мережі подаються значення діагностичних ознак, виявлених при попередній комп'ютерній обробці сигнального струму ТРК. Кількість виходів відповідає кількості дефектів і завад за якими відбувається класифікація. Кожен вихід нейронної мережі дорівнює 1 або 0, в залежності від того, чи був виявлений певний тип дефекти сигналу чи ні.

Нейронна мережа була навчена з використанням алгоритму зворотного поширення помилок. Хоча основний алгоритм зворотного поширення є відносно повільним, методика оптимізації Левенберга-Марквардта може значно поліпшити продуктивність алгоритму. Для навчання ШНН було згенеровано п'ять комбінацій сигналів ТРК, що складаються з вихідного (ідеального без завад) сигналу і чотирьох сигналів з чотирма розглянутими вище завадами. Кожен сигнал мав 419200 відліків і був розділений ковзаючим прямокутним вікном з довжиною 2096 відлі-

ків з 25% перекриттям на 250 сегментів. Таким чином, було отримано 1250 навчальних зразків, 60% цих даних були використані в навчальних цілях, 20% даних для валідації і 20% даних для тестування ШНН. Дані в табл. 5.1 є прикладом п'яти рядків матриць вхідних і вихідних даних, що використали для навчання ШНН. Початкові ваги і зміщення мережі були згенеровані програмою автоматично. Навчання може бути припинено відповідно до критеріїв досягнення певного значення середньоквадратичної помилки (MSE) або коли число епох навчання досягає певного значення.

Загальна середньоквадратична помилка навченої нейронної мережі становить 0,02310, а криві тестування та валідації мають подібні характеристики, що є показником ефективності навчання

5.5. Розробка методу моніторингу зародження і розвитку дефектів сигнального струму ТРК за допомогою адаптивної нечіткої нейронної мережі

Розроблений у попередньому розділі метод визначення спотворень, завод і дефектів сигнального струму ТРК, базувався на порівнянні певних діагностичних ознак сигнального струму з жорстко обумовленими граничними значеннями, які були визначені з проведених досліджень. Подальша ідентифікації типу дефектів провадилася за допомогою класифікатора на основі штучних нейронних мереж.

Але метод, заснований на використанні чітко обумовлених граничних рівнів для діагностичних ознак має певні недоліки.

В останні роки широко застосовуються методи м'яких обчислень, які дозволяють використовувати допуск на неточність і невизначеність для досягнення надійних та недорогих технічних рішень. Адаптивна нечітка нейромережева система (АННМ) [222-225] є потужним методом м'якого розпізнавання технічних станів системи, який дозволяє виявляти не тільки збої в системі або граничний стан перед відмовою, а й визначити поступову деградацію компонентів системи для передбачення можливої відмови заздалегідь. Останнім часом АННМ знайшла успі-

шне використання в багатьох додатках [227, 228]. АННМ представляє підхід штучної нейронної мережі (ANN) до розробки системи нечіткого виводу (FIS).

Використання АННМ для періодичного моніторингу параметрів сигналу ТРК дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки залізниці із дефектами сигналу на ранній стадії до появи відмов системи сигналізації. В якості одного з діагностичних параметрів ефективно використовувати Ентропії Шеннона вейвлет-пакетної енергії (ЕШВПЕ) [229], значення якої сильно залежать від характеру і ступеню дефектів сигналу [230].

Відповідно до зазначеного, завданням даного розділу роботи є розробка методу виявлення дефектів сигнального струму ТРК на початковому етапі за допомогою адаптивної нечіткої нейронної мережі і дослідження ефективності його використання.

5.5.1. Вибір діагностичних параметрів для адаптивної нечіткої нейронної мережі

Допустимі рівні відхилення параметрів струму сигналу визначаються вимогами до безпечної експлуатації рейкових кіл. Для коректної роботи приймача ТРК сигнал на вході приймача повинен відповідати певним селективним вимогам, а саме мати необхідну несучу частоту і частоти модуляції, а також СКЗ напруги, що лежить в певних діапазонах, які визначаються технічними характеристиками приймача [197],

Відповідно до технічних специфікацій, середня ширина смуги вхідного фільтра приймача ТРК знаходиться в межах ± 12 Гц від номінальної несучої частоти, а ширина смуги вхідного фільтра на рівні 0,7 від максимальної складає не менше 24 Гц. Чутливість приймача, тобто середньоквадратичне значення вхідної напруги АМ-сигналу, при якому реле на виході приймача знаходиться під напругою, складає $U_{II} = 0,35 \pm 0,03$ В при номінальних значеннях напруги живлення і при номінальних значеннях несучої частоти і частоти модуляції сигналу [197].

Приймач ТРК з електромагнітним реле на своєму виході працює як пороговий (релейний) пристрій, вихід якого приймає значення логічної 1, якщо на його вході є сигнал з необхідними параметрами, і дорівнює логічному 0 в протилежному випадку. Коефіцієнт повернення для приймача ТРК дорівнює відношенню напруги вимикання до напруги включення. Для приймача ТРК його значення має бути не менше 0,8 [197].

На основі аналізу безпечних умов експлуатації ТРК було обрано такі діагностичні ознаки для контролю функціонування ТРК в нормальному режимі роботи:

- середньоквадратичне значення напруги сигналу на вході приймача має бути в межах від $U_{\min} = 0,4$ В до максимального значення U_{\max} , визначеного в регулювальній таблиці [197];
- напруга в паузах сигналу має бути менше, ніж $U_{OR} = U_S K_R K_{OM}$, де K_{OM} коефіцієнт запасу на відключення приймача;
- значення ентропії Шеннона енергії вейвлет-пакетного перетворення (ЕШЕВПЕ), значення якої сильно залежать від наявності дефектів сигналу [230].

5.5.2. Основні положення адаптивної нечіткої нейромережевої системи

Адаптивна система нейро-нечіткого висновку об'єднує можливості штучних нейронних мереж (ШНМ) і системи нечіткого висновку (FIS) для проведення обчислення і логічного аналізу. Існує два типи нечітких систем, відомих як моделі Мамдані та Сугено. Щоб формалізувати систематичний підхід для генерації нечітких правил з набору вхідних і вихідних даних, Такагі, Сугено і Канг запропонували нечітку модель [222, 223]. Система нечіткого виводу відображає вхідні параметри в однозначні вихідні дані, використовуючи вхідні функції приналежності, правила, вихідні характеристики і вихідні функції приналежності. Основна відмінність між системою нечіткого висновку Мамдані та Сугено полягає в тому, що вихідні функції належності у фаззі-системі Сугено є тільки лінійними або постій-

ними. У цьому типі фаззі-систем використовуються фіксовані функції приналежності, які вибираються довільно, і структура правил, яка по суті зумовлена користувальницької інтерпретацією характеристик змінних в моделі.

Адаптивна система нейро-нечіткого висновку АННМ - це система нечіткої логіки типу Сугено, вільні параметри якої в функціях приналежності (ФП) налаштовуються за допомогою методів навчання, що використовуються в штучних нейронних мережах.

5.5.3. Структура адаптивної системи нейро-нечіткого висновку

Система АННМ складається з нейро-нечіткої моделі, яка працює з використанням алгоритму Такагі-Сугено (Т-S). АННМ підтримує функції лінійного або постійного виводу. Існує два методи, які використовує навчання АННМ для налаштування параметрів функції належності: зворотне поширення для всіх параметрів (метод найшвидшого спуску) і гібридний метод, що складається з зворотного поширення для параметрів, пов'язаних з вхідними функціями приналежності і оцінки методом найменших квадратів для параметрів, пов'язаних з вихідними функціям належності. Під час прямого проходу результуючі параметри і правила оптимізуються з використанням поточних параметрів передумови шляхом застосування оцінки найменших квадратів на основі помилки виведення. При виконанні зворотного проходу вихідні параметри змінюються з використанням градієнтного навчання [224].

Базова архітектура АННМ складається з п'яти рівнів [224 226].

Шар 1 АННМ є вхідним шаром, який генерує класи функції належності для вхідних даних. Вихідні дані цього шару є нечіткі класи приналежності вхідних даних, які задаються виразом

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (5.12)$$

де O_i^1 функція приналежності $\mu_{A_i}(x_i)$, а A_i лінгвістична мітка x , пов'язана з цим вузлом, що відповідає чіткому вхідному значенню. Кожен вузол у цьому шарі є

адаптивним вузлом. У цьому шарі коригуються параметри кожної функції приналежності.

Шар 2 є шаром правил. Кожен вузол у цьому шарі обчислює потужність кожного правила шляхом множення вхідних сигналів. Виходи цього шару можна представити як

$$O_i^2 = \omega_i = \prod_{i=1}^m \mu A_i(x) \quad (5.13)$$

Шар 3 - це нормалізаційний шар. Як у шарі 2, кожен вузол є фіксованим. Вузол i цього шару обчислює потужності i -го правила як відношення до суми всіх потужностей всіх правил згідно до

$$O_i^3 = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (5.14)$$

Шар 4 є послідовним шаром, вузли якого є адаптивним. Цей рівень обчислює внесок кожного правила у загальний вихід фаззі-системи як

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i)_i, \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (5.15)$$

Шар 5 - вихідний шар. Один вузол цього шару - це нерухомий вузол, який обчислює загальний вихід шляхом підсумовування всіх вхідних сигналів. Відповідно, процес дефаззіфікації перетворює нечіткий результат у чіткий висновок

$$O_i^5 = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \quad (5.16)$$

Таким чином, для заданих значень параметрів кінцевий вихід може бути виражений у вигляді лінійної комбінації послідовних параметрів. Ця архітектура є базовою для всіх моделей АННМ.

5.5.4. Вибір даних для навчання і тестування системи

Вибір даних для навчання і тестування системи повинен забезпечувати репрезентативні набори, але в той же час досить відмінні один від одного, щоб не зробити процес перевірки тривіальним. Набір даних, який використовується для

навчання АННМ, повинен бути вільний від нерозпізнаних даних, розділений на частини і мати таку форму, щоб АННМ зміг навчати фаззі-систему на їх основі. Кількість входів і виходів у фаззі-системи визначається набором даних для навчання [137, 139, 141, 142]. Для створення наборів даних для навчання і тестування моделі АННМ з сигналів ТРК були обрані сто сегментів з чотирма періодами кодових комбінацій. Обрані сегменти відповідали ділянкам залізниці зі стабільно працюючою системою сигналізації, а також проблемним ділянкам з нестабільною або несправною системою ТРК. В якості діагностичних ознак дефектів сигналів ТРК були обрані три параметра, які відповідно до статистики [197] викликають більшість відмов ТРК, а саме: середньоквадратичне значення напруги сигналу на вході приймача, СКЗ напруги в паузах сигналу і ентропія Шеннона енергії вейвлет-пакетного перетворення. Для забезпечення надійної роботи системи ТРК значення обраних діагностичних параметрів повинні перебувати в певних межах. Для навчання і тестування АННМ були сформовані три вхідних вектора, кожен довжиною 120 компонентів. Компоненти цих векторів відповідають обраним діагностичним параметрам. Значення вихідного вектора АННМ приймаються рівними одиниці для сегментів сигналу, що відповідають ділянкам залізниці з правильною і стабільною роботою ТРК, і рівними нулю для ділянок з несправностями в системі ТРК. Для ділянок залізниці з переривчастими відмовами і нестабільною роботою системи сигналізації ТРК вхідні параметри мали проміжні значення між значеннями, що відповідають робочому і несправного стану системи (1 і 0). Для цих ділянок залізниці вихідним значенням АННМ були присвоєні проміжні значення від 1 до 0. Конкретні значення вихідних параметрів визначалися методом експертних оцінок з урахуванням ступеня відхилення вхідних параметрів від граничних значень, що відповідають робочому і несправному стану системи. Отриманий таким чином масив, що складається з трьох вхідних і одного вихідного векторів зі 120 рядками, був розділений на дві частини по 60 рядків у кожній, які використовувалися для навчання і тестування АННМ.

5.5.5. Навчання АННМ

Метод навчання АННМ був реалізований редактором MATLAB ANFIS. Функції приналежності типу «gbellmf» були згенеровані для кожного вхідного вектору. Як було визначено під час моделювання, ці функції приналежності дали найкращі результати навчання. Вихід фаззи-системи (FIS) був обраний лінійним, що відповідає вибраній моделі АННМ класу Sugeno. Крива ефективності навчання АННМ показана на рис. 5.8. Помилка навчання склала 0,0171. Результуюча структура АННМ показана на рис. 5.9.

Для оцінки ефективності розробленої моделі АННМ для виявлення сегментів з нестабільною роботою системи ТРК були виміряні значення трьох діагностичних параметрів для кожного з цих сегментів. Відібрані сегменти для перевірки моделі раніше не використовувалися для навчання і тестування АННМ [137, 139, 141, 142].

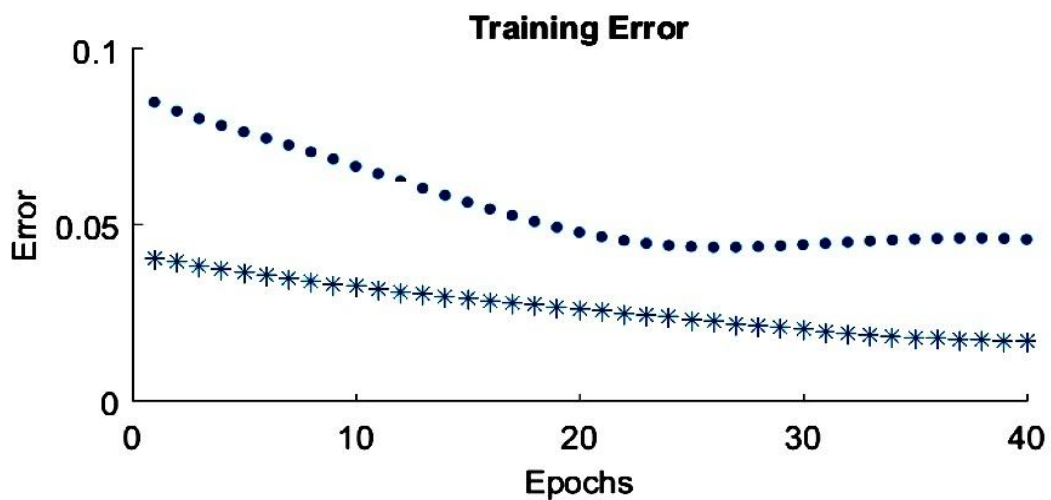


Рисунок 5.8 - Крива результативності тренувань АННМ

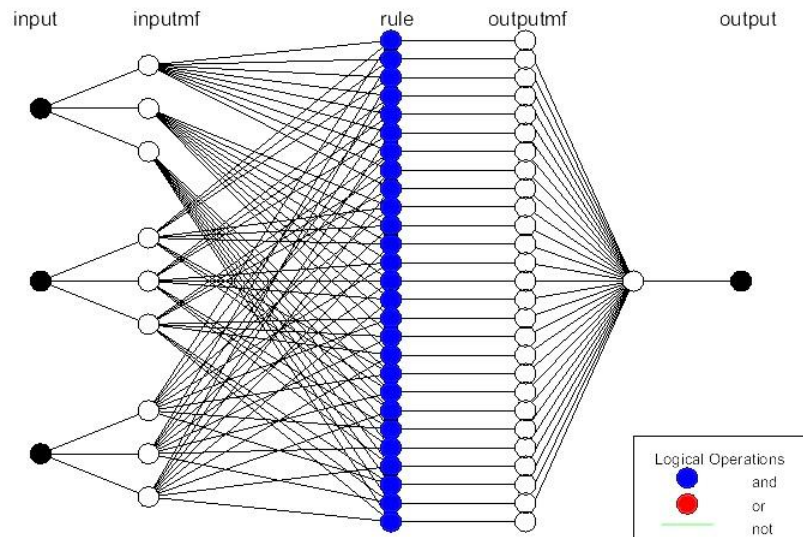


Рисунок 5.9 - Структура моделі АННМ

Вхідні діагностичні параметри і відповідні вихідні параметри, отримані з використанням моделі АННМ для деяких з обраних сегментів, показані в табл. 5.3.. Вихідні значення АННМ змінюються в залежності від ступеня і характеру дефектів сигналу ТРК. АННМ дозволяє кількісно визначити ступінь дефектів сигналу і, в результаті, може виявити сегменти в сигналі ТРК, які відповідають несправному стану ТРК, а також ділянкам залізниці з незначними дефектами, що тільки зароджуються.

Таблиця 5.3

Діагностичні ознаки спотворень сигнального струму ТРК

Наявність і вид дефектів сигналу ТРК	Вхідні параметри			АННМ вихідні значення
	U_R	U_P	$WPESE$	
Вихідний (ідеальний) сигнал	0,68	0,0	0.357	1
З втраченими або додатковими (в паузі) імпульсами	0,39	0,0	0,497	0,97
	0,36	0,0	0.534	0
З тривалою інтерференцією	1.26	0.29	0.567	0

В таблиці прийняті такі позначення: U_R – СКЗ напруги сигнального струму на вході колійного приймача; U_P – значення напруги сигнального струму на вході приймача в паузах.

Проведені дослідження в цілому підтвердили адекватність запропонованої адаптивної нечіткої нейронної мережі і ефективність використання запропонованого методу моніторингу зародження і розвитку дефектів сигнального струму ТРК за допомогою адаптивної нечіткої нейронної мережі.

5.6. Висновки

Розроблено метод моніторингу ТРК з використанням вейвлет перетворення і класифікатора на основі штучних нейронних мереж.

Визначено діагностичні ознаки основних спотворень сигнального струму ТРК при його протіканні по рейках і граничні значення параметрів діагностичних ознак. Для класифікації дефектів сигналу використано тришарова штучну нейронну мережу (ШНН) з прямим зв'язком з трьома вхідними вузлами, прихованим шаром, чотирма вихідними вузлами і нейронами сігмоїдної функції. Кожен вихід нейронної мережі дорівнює 1 або 0 в залежності від того, чи був виявлений певний тип певного дефекту сигналу чи ні. Загальна середньоквадратична помилка навченої нейронної мережі становить 0,02310.

Розробка методу безперервного моніторингу дефектів сигнального струму ТРК на початкових стадіях в процесі їх зародження і розвитку за допомогою адаптивної нечіткої нейронної мережі.

В якості діагностичних ознак дефектів сигналів ТРК для адаптивної нечіткої нейронної мережі були обрані три параметри, відхилення яких від нормативних значень згідно статистиці є причиною більшості збоїв в роботі ТРК, а саме: напругу сигналу на вході приймача, напругу в паузах і ентропію Шеннона енергії вейвлет-пакетного перетворення.

Метод навчання АННМ був реалізований редактором MATLAB ANFIS. Функція приналежності типу «gbellmf» була згенерована для кожного вхідного вектору. Вихід системи був обраний лінійним, що відповідає моделі АННМ класу Sugeno. Помилка навчання склала 0,0171.

Для оцінки ефективності розробленої моделі АННМ для виявлення сегментів з нестабільною роботою системи ТРК були використані сигнали, які раніше не використовувалися для навчання і тестування АННМ.

Проведені дослідження в цілому підтвердили адекватність запропонованої адаптивної нечіткої нейронної мережі і ефективність використання запропонованого методу моніторингу зародження і розвитку дефектів сигнального струму ТРК за допомогою АННМ.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та вирішення актуального наукового завдання підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертаційної роботи полягають в наступному.

- На основі огляду літератури зроблено висновок, що нові типи двосистемних електропоїздів, що почали впроваджуватися в Україні в останнє десятиріччя, є джерелом потужних електромагнітних завад в широкому діапазоні частот, які здатні викликати збої в роботі рейкових кіл і автоматичної локомотивної сигналізації і приводити до небезпечних для руху поїздів ситуацій.
- Для наукового-обґрунтування вибору параметрів апаратно-програмного комплексу для вимірювання електричних завад від РС в рейках для забезпечення необхідного динамічного діапазону, точності і роздільної здатності удосконалено математичну модель АПК. Модель реалізована у вигляді комп'ютерної програми.
- Визначено, що динамічний діапазон АПК для забезпечення відносної похибки 2,5 % при тяговому струмі 300 А має бути 91,6 дБ. Відношення сигналу до шуму АПК з АЦП розрядністю 14 і 16 біт при раціональному виборі параметрів швидкого перетворення Фур'є складає 102 і 110 дБ, відповідно, що дозволяє забезпечити відносну похибку вимірювань рівня завад не більше 1 %.
- Необхідну точність вимірювань параметрів гармонік забезпечують віконні функції типу Блекмана-Харріса. Функції Ханна і Хаммінга можуть бути використані для спектрального аналізу при значеннях тягового струму до 200 А.
- Збільшити точність визначення параметрів гармонік можна шляхом збільшення числа точок віконного ШПФ. Роздільну здатність у часі можна збільшити шляхом збільшення перекриття вікон.

- Для визначення ступеню впливу завад на рейкові кола розроблено математичну модель поширення електричних завад від декількох одиниць ЕРС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії. На основі моделювання показано, що при наближенні поїзду до дросель-трансформатора на відстань 0,85-0,5 км асиметрія напруги на дросель-трансформаторі може збільшуватися вище 6 %.
- Удосконалено математичну модель впливу гармонічних завад на колійний приймач тонального рейкового кола. Визначено граничний струм завад на вході колійного приймача ТРК з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц відносно частоти сигнального струму, який дорівнює 0,7 мА для нормального режиму і 0,4 мА для шунтового і контрольного режимів
- Для підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу розроблено метод моніторингу сигнального струму в рейкових колах, що базуються на використанні вейвлет-аналізу сигнального струму і класифікатора на основі штучних нейронних мереж. Загальна середньоквадратична помилка навченої нейронної мережі становила 0,02310.
- Для виявлення і контролю розвитку дефектів рейкового кола, починаючи з їх зародження, розроблено метод підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом моніторингу сигнального струму в них з використанням адаптивної нечіткої нейронної мережі, що дозволяє своєчасне запобігати переходу системи в граничний стан. Застосування методу дозволяє впровадити обслуговування рейкових кіл з урахуванням їх фактичного стану.
- Проведені дослідження в цілому підтвердили адекватність запропонованої адаптивної нечіткої нейронної мережі і ефективність використання запропонованого методу моніторингу зародження і розвитку дефектів сигнального струму ТРК за допомогою АННМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Карякин Р. Н. – М. : Транспорт, 1967. – 279 с.
2. Справочник по электроснабжению железных дорог / под ред. К. Г. Марквардта – М. : Транспорт, 1980. – Т. 1. – 1980. – 256 с.
3. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / Марквардт К. Г. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / Бадер М. П. – М. : УМК МПС, 2002. – 638 с.
5. Сумин А. Р. Исследование распространения обратного тягового тока в земле и его электромагнитного влияния / А. Р. Сумин // Вестник ВНИИЖТ. – 1984. – № 7. – С. 26–28.
6. Котельников А. В. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции / А. В. Котельников, А.Б.Косарев // Электричество. – 1992. – № 9. – С. 26–34.
7. Брылеев А. М. Устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Кравцов Ю. А., А. В Шишляков. – М. : Транспорт, 1966. – 264 с.
8. Брылеев А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Кравцов Ю. А., А. В Шишляков. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
9. Брылеев А. М. Критерии работы рельсовых цепей с учетом токов помех / А. М. Брылеев // Исследование элементов устройств автоматики и телемеханики на ж.д. транспорте. Межвузовский сборник научных трудов. – М. – 1980. – № 664. – С. 3–17.
10. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б.М.Степенский– М.: Транспорт, 1990. – 295 с.

11. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: справочник / В. С. Аркатов. – 2-е изд. – М. : Транспорт, 1992. – 384 с.
12. Путевая блокировка и авторегулировка: учебник для вузов / Котляренко Н. Ф. , Шишляков А. В., Соболев Ю. В. и др. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
13. Беляков И. В. Влияние помех от переменного тягового тока на контроль состояния рельсовых линий / И. В. Беляков // Межвузовский сборник научных трудов. – Москва: МИИТ. – 1986. – №775. – С. 125–127.
14. Беляков И. В. Флуктуационные помехи рельсовых линий от переменного тягового тока / И. В. Беляков // Межвузовский сборник научных трудов. – Москва: МИИТ. – 1988. – №790. – С. 69–72.
15. Беляков И. В. Влияние помех от переменного тягового тока на контроль состояния рельсовых линий / И. В. Беляков // Автоматизированные системы испытаний объектов ж.д. транспорта. Межвузовский сборник научных трудов. – М.: МИИТ. – 1986. – №775. – С. 125–127.
16. Бочков К. А. Вероятностный метод определения уровней ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности / К. А. Бочков, Н. В. Рязанцева // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость: труды междунар. семинара. – Гомель, 2001. – С. 20-29.
17. Бочков К.А. Нормирование параметров ЭМС с учетом реальной электромагнитной обстановки / К. А. Бочков, Н. В. Рязанцева // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость : труды междунар. семинара. – Гомель, 2001. – С. 35–42.
18. Бялонь А. Значения допускаемых параметров помех тягового подвижного состава / А. Бялонь // Вестник ВНИИЖТ. – 2001. – № 5. – С. 44–47.

19. Анохов І. В. Про електромагнітну сумісність електрифікованих ліній постійного струму / І. В. Анохов, М. П. Бадьор, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко // Залізничний транспорт України. – 2000. – № 2. – С. 10–12.
20. Gavrilyuk V., Zavgorodnij A. The modelling of electromagnetic influence of traction electrosupplysystem on railway circuits // Transport Systems Telematics. Politechnika Slanska. Zeszyty Naukowe. Gliwice (Poland). 2004. NR 1657. P. 18-19
21. Гаврилюк В. И. Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитного поля вблизи рельсовой нити / В. И. Гаврилюк, Д. В. Астраханцев // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 3/2. – С. 172–175.
22. Гаврилюк В. И. Испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с рельсовыми цепями / В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 3/2. – С. 192–194.
23. Gavrilyuk V. I. To the question about checking parameters of code current of rail circuit / V. I. Gavrilyuk, T. N. Serdyuk // Transport systems telematics : III International Conferense. – Katowice-Ustron, – 2003. – P. 127–135.
24. Сердюк Т.Н., Гаврилюк В.И. Экспериментальне дослідження поєх в рельсових цепях // Вісник Дніпропетровськ. національного ун-ту залізничного тр-ту ім. ак. В.Лазаряна. – 2005. Вип. 9. С. 15-19.
25. Гаврилюк В. І., Щєка В. І., Мелешко В. В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2015. - № 5(59). - С. 7-15.
26. Ермоленко Д. В. Показатели электромагнитной совместимости и методы ее обеспечения в системе электрической тяги переменного тока: автореф.

- дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.22.09 "Електротранспорт" / Д. В. Ермоленко. – М., 1999. – 44 с.
27. Ермоленко Д. В., Павлов В. И. Улучшение электромагнитного воздействия тиристорного подвижного состава и системы тягового электроснабжения / Д. В. Ермоленко, В. И. Павлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 8. – С. 25–30.
28. Ермоленко Д. В. Показатели электромагнитной совместимости и методы ее обеспечения в системе электрической тяги переменного тока: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.22.09 "Електротранспорт" / Д. В. Ермоленко. – М., 1999. – 44 с.
29. Котельников А. В. Оптимизация параметров цепей обратного тока тягового электроснабжения в условиях интенсификации движения и повышения весовых норм поездов / А. В. Котельников, А. В. Наумов, А. А. Наумов, Е. Э. Закиев // Вестник ВНИИЖТ. – 2006, – № 1. – С. 3–12.
30. Котельников А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / Котельников А. В., Наумов А. В., Слободянюк Л. П. – М. : Транспорт, 1990. – 215 с.
31. Косарев А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока / Косарев А. Б. – М. : Интекст, 2004. – 272 с.
32. Бестемьянов, П. Ф. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – №. 1. – С. 87-92.

33. Кравцов Ю.А., Мащенко П.Е., Щербина Е.Г. Электромагнитное влияние перспективного электроподвижного состава на устройства железнодорожной автоматики: Учебное пособие. - М.: МИИТ, 2012. - 117 с.
34. Кравцов, Ю. А. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Мащенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2009. – №. 1. – С. 86-91.
35. Кравцов, Ю. А. Методика проверки помехоустойчивости приёмников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – №. 6. – С. 102-109.
36. Наумов А.В., Наумов А.А. Выбор параметров и правила построения обратной тяговой рельсовой сети на электрифицированных железных дорогах со скоростным и тяжеловесным движением. – М.: Интекст, 2005. – 143 с.
37. Павлов И. В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока / Павлов И. В. – М. : Транспорт, 1965. – 204 с.
38. Шаманов В. И. Проблемы электромагнитной совместимости рельсовых цепей с тяговой сетью // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – №. 2.– С. 160-185.
39. Бестемьянов П. Ф., Кравцов Ю. А., Шаманов В.И. Исследование электромагнитной обстановки на электрифицированных участках железных дорог // Электротехника. – 2019. – №. 9. – С. 3-7.
40. Шаманов В.И. Шаманов В. И., Трофимов Ю. А. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – №. 4 (48).
41. ЦШ-0042 Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування. Київ, 2006.

42. Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников В. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем //Автоматика и телемеханика. – 1994. – №. 8. – С. 3-50.
43. Low frequency and radio frequency electromagnetic compatibility for rapid transit railways / Allan J., Chan S., Shao Z.Y., Mellitt B. // Conference of European Power Electronics Association, 13–16 September 1993. – Brighton, 1993. – P. 106–111.
44. Hill R.J. Electric Railway Traction. Part 6. Electromagnetic compatibility – disturbance sources and equipment susceptibility / Hill R.J. // Power Engineering Journal. – 1997. – P. 31–39.
45. Some low frequency EMC issues in electrified railways / Rambukwella N. // International Conference on Development in Mass Transit Systems, 20–23 April 1998. – P. 260–265.
46. Скоков Р. Б. Снижение влияния тяговой сети постоянного тока на автоблокировку с тональными рельсовыми цепями: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Р. Б. Скоков. – Омск, 2004. – 18 с.
47. Горенбейн Е. В. Помехоустойчивость приёмных устройств рельсовых цепей //Наука и современность. – 2010. – №. 5-2 – С. 178-183.
48. EN 50121-1:2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility – Part 1: General.
49. EN 50121-2 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world.
50. EN 50121-3-1 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-1: Rolling stock - Train and complete vehicle.
51. EN 50121-3-2 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock - Apparatus.

52. EN 50121-4 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus.
53. EN 50121-5 Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus.
54. CENELEC CLC/TR 50507. (2005). Railway applications – Interference limits of existing track circuits used on European railways.
55. CENELEC CLC/TS 50238-2, (2010). Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems – Part 2: Compatibility with track circuits. CENELEC prEN 50238-2 (draft, Pr. 15360). (2009). Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems –Part 2: Compatibility with track circuits.
56. Михайлов М. И., Разумов Л. Д., Соколов С. А. Защита сооружений связи от опасных и мешающих влияний. – М. : Связь, 1978. – 288 с.
57. Gao, R.X., Yan, R. Wavelets. Theory and applications for manufacturing. Springer 2011. XIV. 224 p.
58. Low frequency and radio frequency electromagnetic compatibility for rapid transit railways / Allan J., Chan S., Shao Z.Y., Mellitt B. // Conference of European Power Electronics Association, 1993. – Brighton, 1993. – P. 106–111.
59. Holtz J., Klein H-J. The Propagation of Harmonic Currents Generated by Inverter-Fed Locomotives in the Distributed Overhead Supply System // IEEE Transactions on Power Electronics, 1989. - Vol. 4. , No.2. – April. – P 168–174.
60. Шевердин И. Н. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС / И. Н. Шевердин, В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов. // Автоматика, связь, информатика. – 2004. –№ 8. – С. 24–29.

61. Modelling for Electromagnetic Interference Assessment in Electric Railway Traction System / Brillante S., Hill R., Pozzobon A., Sciutto G. // IEE Conference “Electric Railways in a United Europe”, 27–30 March 1995, – P 148-152.
62. .Сербиненко Д. В. Расчет электромагнитных процессов в тяговых сетях постоянного тока / Д. В. Сербиненко, М. С. Хлопков // Технологии электромагнитной совместимости. – 2003. – № 2(5). – С. 65–68.
63. Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в тяговой сети и их влияние на показатели качества электрической энергии / Д. В. Сербиненко, М. С. Хлопков // Вестник ВНИИЖТ. – 2003, – № 3. – С. 38–42.
64. Бочарников Ю. В. Комплексный метод расчета токов и напряжений, возникающих в рельсе под воздействием электромагнитного и гальванического влияния тяговых токов / Совершенствование схем устройств электроснабжения транспорта и проектирование их конструкций: сб. трудов Уральского государственного университета путей сообщения. – 2005. – Выпуск 48 (131). – С. 42–51.
65. Кравцов Ю.А., Мащенко П.Е., Щербина Е.Г. Электромагнитное влияние перспективного электроподвижного состава на устройства железнодорожной автоматики: Учебное пособие. - М.: МИИТ, 2012. - 117 с.
66. Кравцов Ю. А. Нормативы по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методы их проверки / Кравцов, Ю. А., Архипов, Е. В., Антонов, А. А., & Бакин, М. Е // Наука и техника транспорта. – 2014. – №. 2. – С. 65-71.
67. Щербина Е. Г. Рельсовые цепи-состояние и перспективы //Автоматика, связь, информатика. – 2019. – №. 2. – С. 18-19.
68. Щербина Е. Г. Характеристики помехоустойчивости фазочувствительных реле для расчета нормативов электромагнитной совместимости

- //Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – №. 3. – С. 82-88.
69. Кравцов Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – №. 1. – С. 7-27.
70. Кравцов Ю. А. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей / Кравцов, Ю. А., Линьков, В. И., Мащенко, П. Е., Щербина, А. Е. //Наука и техника транспорта. – 2009. – №. 1. – С. 86-91.
71. Zhi, Y. J. Electromagnetic environment around a high-speed railway using analytical technique / Y. J. Zhi, B. Zhang, K. Li, X. Y. Huang, Y. T. Fang, W. P. Cao, // Journal of Zhejiang University-Science A. – 2011. – V. 12. – No. 12. – P. 950-956.
72. Ogunsola, A. Electromagnetic compatibility in railways. Analysis and management // A. Ogunsola, A. Mariscotti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – 528 p.
73. Ефанов Д. В. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты / Д. В. Ефанов Н. А. Богданов //Транспорт Урала. – 2013. – №. 1. – С. 36-42.
74. Ghanizadeh A. J. Harmonic Disturbance Compensating and Monitoring in Electric Traction System / A. J. Ghanizadeh, S. H. Hossenian, G. B. Gharehpetian //Elect. Electro. Eng: An Int. J. – 2013. – Т. 2. – №. 3.
75. Lyons, R. G. Understanding Digital Signal Processing. – Pearson Education India, 2011.
76. Walden R. H. Analog-to-digital converter survey and analysis //IEEE Journal on selected areas in communications. – 1999. – Т. 17. – №. 4. – С. 539-550.

77. Kester W. Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD+ N, and SFDR so you don't get lost in the noise floor //MT-003 Tutorial, [www. analog. com/static/importedfiles/ tutorials /MT-003. pdf](http://www.analog.com/static/importedfiles/tutorials/MT-003.pdf). – 2009.
78. Kester W. Mt-001: Taking the mystery out of the infamous formula," $snr = 6.02 n + 1.76 \text{ db}$," and why you should care //REV. 0. – 2005. – С. 10-03.
79. Lundberg K. H. Analog-to-digital converter testing //Massachusetts Institute of Technology. – 2002.
80. Allen, J. B A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis / J. B. Allen, L. R. Rabiner// Proceedings of the IEEE. – 1977. – V. 65. – No. 11. – P. 1558-1564.
81. Smith, S. Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. – Elsevier, 2013.
82. Квасников В. П. Оптимизация аналогового интерфейса информационно-измеритель-ных систем для дистанционных измерений механических вели-чин / В. П. Квасников, Д. П. Орнатский, А. И. Осмоловский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №. 4 (11). – С. 31-37.
83. Harris, F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform // Proceedings of the IEEE. – 1978. – Т. 66. – №. 1. – P. 51-83.
84. Doerry A. W. Catalog of window taper functions for sidelobe control //Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA. – 2017. 2018 p.
85. Nisar S. An efficient adaptive window size selection method for improving spectrogram visualization / S. Nisar, O. U. Khan, M. Tariq //Computational intelligence and neuroscience. – 2016. – Т. 2016.
86. Rioul O., Vetterli M. Wavelets and signal processing // IEEE signal processing magazine. – 1991. – Т. 8. – №. 4. – С. 14-38.

87. Lyons R. Windowing Functions Improve FFT Results-Flexible windowing functions let you adjust frequency and leakage effects //Test and Measurement World. – 1998. – Т. 18. – №. 10. – С. 53.
88. Мелешко В. В. Организация обслуживания и ремонта устройств и систем железнодорожной автоматики, построенных на базе программно-аппаратных средств // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2008. – №. 4. – С. 34-37.
89. Маловічко, В. В., Рыбалка, Р. В., Маловичко, Н. В., & Мелешко, В. В. Визначення пріоритетів вибору об'єктів діагностування та контролю електричної централізації з урахуванням затримок поїздів // Автоматика, телемеханіка, зв'язок Збірник наукових праць ДонІЗТ. 2012. - № 31.- С. 57-61.
90. Маловічко, В. В., Рыбалка, Р. В., Маловічко, Н. В., Мелешко, В. В. Вибір об'єктів діагностування та контролю електричної централізації з урахуванням впливу відмов на рух поїздів. //Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2012. – №. 3. – С. 45-48.
91. Havryliuk V. I., Meleshko V. V. The comparative analysis of main calculation methods of matrix elements' impedance of 1520 mm rail track gauge in audio frequency range // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2014. - № 7. - С. 44-51.
92. Havryliuk V. I., Melesko V. V. Electrical impedance of traction rails at audio frequency range //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2015. – №. 2. – С. 31-36.
93. Сердюк Т. М. , Мелешко В. В., Гаврилюк В. І. Метод моделювання системи тягового електропостачання // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – №. 10. – С. 35-43.
94. Havryliuk V. I., Voznyak O. M., Meleshko V. V. Improving the positioning accuracy of train on the approach section to the railway crossing //Наука и про-

- гресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2016. – №. 1 (61). - С. 9–18.
95. Мелешко В. В.. Технічний контроль систем числового кодового автоблокування // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2017. – №. 13. - С. 81-87.
96. Гаврилюк В. И, Мелешко В. В. Обоснование уровней электромагнитного влияния тягового тока на рельсовые цепи // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2017. № 14. – С. 21-28.
97. Гаврилюк В. І, Мелешко В. В. Моделювання розповсюдження гармонійних завад від електрорухомого складу у несиметричній рейковій лінії // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 2018. – №. 16. - С. 15-26.
98. Havryliuk V. I., Meleshko V. V. Comparative analysis of experimental and calculation methods for determination of the traction current harmonics distribution in rails // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2018. - № 16. - С. 11-16.
99. Гаврилюк В. І, Мелешко В. В. Раціональний вибір параметрів апаратно-програмного комплексу для спектрального аналізу тягового струму // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2018. – №. 15. - С. 15-26.
100. Гаврилюк В. І., Мелешко В. В. Вибір параметрів перетворення Фур'є для спектрального аналізу тягового струму // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2018. – №. 15. - С. 15-26.
101. Мелешко В. В. Диференційний струм гармонічних завад в рейковій лінії від електрорухомого складу при нормативних значеннях коефіцієнта асиметрії // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2018. – №. 15. - С. 15-26.

102. Гаврилюк В.І., Мелешко В.В. Електромагнітна сумісність рухомого складу з системами сигналізації і зв'язу як складова безпеки руху поїздів // Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції імені доктора технічних наук Сокола Е. М. (Львів, 2015, вересень). С. 40-41.
103. Гаврилюк В., Маловічко В., Мелешко В. Дистанційне діагностування стрілочних переводів в умовах експлуатації // Українські залізниці, 2015. - № 7–8 (25–26). - С. 44-47.
104. Гаврилюк В. И., Мелешко В. В. Стратегии технического обслуживания систем железнодорожной автоматики // Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2015 р.) – Д.: ДНУЗТ. С. 207-209.
105. Havryliuk V. I., Zavgorodnij O. V., Meleshko V. V. Testing of modern types of the rolling stock on electro-magnetic compatibility with railway signalization systems Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: тези VII Міжнар. науково-практичної конф., 16-19 лютого 2016 р., с. Розлуч. – Д.: ДПТ, 2016. –с. 24
106. Гаврилюк В. И., Щека В. И., Мелешко В. В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: тези VII Міжнар. науково-практичної конф., 16-19 лютого 2016 р., с. Розлуч. – Д.: ДПТ, 2016. –с.
107. Гаврилюк В. І. Мелешко В. В. Випробування нових типів рухомого складу на електромагнітну сумісність з системами сигналізації і зв'язку / Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 76 Міжнародної науково-практичної конференції імені доктора технічних наук Сокола Е. М. (Львів, 2015, вересень). С. 40-41.

- дної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2016 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2016. С. 150-152
108. Гаврилюк В.И., Мелешко В.В. Контроль механических параметров нейтрального реле железнодорожной автоматики на основе вейвлет-анализа // Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези X Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 2016).– С. 22-23.
109. Meleshko V. V. Distribution of the traction current harmonics in rails // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Тези доповідей (24-25.10. 2019 р. м. Харків) / Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2019. – № 4 (додаток). – С. 79-80.
110. Meleshko V. V., Havryliuk V. I. Determination of traction current harmonics parameters by FFT // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Тези доповідей (24-25.10. 2019 р. м. Харків) / Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2019. – № 4 (додаток). – С. 80-81.
111. Havryliuk V., Leferink F., Serdiuk T., Meleshko V. The accuracy of traction current harmonics parameters determination by windowed FFT // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 79 Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 16-17 травня 2019 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2019. С. 218-219.
112. Гаврилюк В. І., Мелешко В. В. Вибір параметрів апаратно-програмної системи Для спектрального аналізу тягового струму // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 80 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2020 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2020. С. 117-119.
113. Мелешко В. В. Методика визначення граничного рівня електромагнітних завад у рейкових колах струму // Проблеми та перспективи розвитку заліз-

- ничного транспорту: Тези 80 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2020 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2020. С. –119.
114. Пат. 80217 Україна, МПК В61L 25/06 (2006.01). Спосіб діагностування колійного приймача тональних рейкових кіл / Гаврилюк В. І., Мелешко В. В.; Буряк С. Ю.; Святченко О. О.; Брусник І. Ю.: власник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – u 2009 12596; заявл. 04.12.2009 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 12.
115. Завгородний А.В. Моделирование электромагнитных процессов в системе тягового электроснабжения / А.В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Вісник ДНУЗТу ім. В. Лазаряна. –2005. – Вип. 6. – С. 11-15.
116. Гаврилюк В. И. Аналіз впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл / В.И. Гаврилюк, А.В. Завгородній // Залізничний транспорт України. – 2005. – №2. – С. 37-39.
117. Гаврилюк В. І. Електромагнітний вплив тягових мереж на рейкові кола. Ч. 1. Моделювання тягового струму в рейковій лінії / В. І. Гаврилюк, О.В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2007. – № 4. – С. 53-57.
118. Сердюк Т. Н. Измерение электромагнитных помех в обратной тяговой сети / Т.Н. Сердюк, А.В. Завгородний, В.И. Гаврилюк // Вісник ДНУЗТу ім. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – С. 134-139.
119. Гаврилюк В. И. Модель распределения гармоник тягового тока в рельсовой линии / В. И Гаврилюк, А.В. Завгородний // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2009. - № 4. - С. 40-43.
120. Гаврилюк В. І. Ймовірнісна модель впливу тягового струму на рейкові кола // В.І Гаврилюк, А.В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2010. –№ 4. –С. 73-76.

121. Завгородний А.В. Методические аспекты определения уровней опасного и мешающего влияния подвижного состава на работу рельсовых цепей / А.В. Завгородний, В.И. Гаврилюк, В.Г. Сыченко // Вісник ДНУЗТу ім. В. Лазаряна. –2005. – Вип. 9. – С. 11-14.
122. Завгородній О. В. Забезпечення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад від тягової мережі сусідньої колії на ділянках зі швидкісним рухом поїздів / О.В.Завгородній, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. –2011. – № 1. – С. 11-15.
123. Gavrilyuk V. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonics / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnyj, A. Myrgorodska // Archives of transport system telematics. – 2009. – Vol. 2. - № 1. – P. 33-37.
124. Zavgorodnyj A. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits / A Zavgorodnyj, V. Gavrilyuk // Archives of transport system telematics. – 2010. – Vol. 4, № 1. – P. 14-18.
125. Гаврилюк, В. І. Розробка математичної моделі для дослідження електромагнітних завад від тягових перетворювачів з асинхронним двигуном / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – № 31. - С. 221–225.
126. Щека В. І. Дослідження особливостей роботи рейкових кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі / В. І. Щека, В. І. Гаврилюк // Залізничний трансп. України. – 2015. – № 4. – С.16-19.
127. Щека В. І. Дослідження магнітного впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті – 2011. – № 2. – С. 39-44.

128. В. И. Гаврилюк // Нормы и методы испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с системами сигнализации и связи // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2016, № 2. С. 48-57.
129. Hololobova O. O., Havryliuk V. I. Application of fourier transform and wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017. - № 1 (67) С. 7-17
130. Havryliuk V. I. Modeling of the traction current harmonics distribution in rails // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2017, № 13. Р. 20-27.
131. Гаврилюк В. Международные нормы на электромагнитную совместимость подвижного состава с системами сигнализации и связи // Українська залізниця, №5–6 (47–48). - 2017. - С. 46-50.
132. Гаврилюк В. И. Моделирование распределения обратного тягового тока в рельсовой линии // Електрифікація транспорту, 2017. - № 13. - С. 64-70.
133. Havryliuk V. I. Modelling of the return traction current harmonics distribution in rails for AC electric railway system, 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), IEEE, pp. 251-254, 2018.
134. O. Hololobova, V. Havryliuk, M. Kovryhin, and S.Buriak, “Study of transmission lines effect on the system operationon of continuous automatic cab signalling,” Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, no. 5(53), pp. 17-28, 2014. (in russian).
135. Sichenko V. G., Gavrilyuk V. I. The theoretical and experimental researches of electromagnetic influence from a traction electrosupply system on a railway

- circuits. IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. Proceedings, 2005, – p. 41-43.
136. Havryliuk V. I. The accuracy of traction current harmonics parameters determination by windowed FFT // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 2018. - № 15. - С. 11-18.
137. Havryliuk V. I. Using the wavelet decomposition method for monitoring of amplitude-manipulated signals of railway automation // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 2018. - № 16. С. 17-23.
138. Гаврилюк, В. І. Моделювання розповсюдження гармонійних завад від електрорухомого складу у несиметричній рейковій лінії // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2018. – № 16. – С. 24–31.
139. Havryliuk V. Wavelet Based Detection of Signal Disturbances in Cab Signalling System //2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. – IEEE, 2019. – P. 94-99.
140. Завгородний А.В. Модель распределения гармоник тягового тока в рельсовой линии / В.И Гаврилюк, А.В. Завгородний // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2009. - № 4. - С. 40-43.
141. Havryliuk V. Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier //2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2019. – P. 491-496.
142. Havryliuk V. Modelling of the Distribution of Return Traction Current Harmonics in Electrically Asymmetric Rails //2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. Rome, Italy, IEEE, 2020. P. 1-6,

143. Басов Г. Г. О паразитных электромагнитных помехах в тяговом подвижном составе / Г. Г. Басов, Н. И. Фалалеев // Залізничний трансп. України. – 2004. – № 2. – С. 25-30.
144. Pozzobon P. Electromagnetic compatibility of advanced rail transport signalling / Pozzobon, P., Amendolara, A., Vittorini, B., Henning, U., Schmid, R., Shirran, S., & Ahlstedt, S. //Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR), Edinburgh, UK. – 2003. – С. 1250-1263.
145. Шалимов М.Г. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1990. 128 с.
146. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями: Диссертация доктора технических наук. – М.: МИИТ, 1999. – 471 с.
147. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
148. Шалимов М.Г. (под ред.), Барковский Б.С., Магай Г.С., Маценко В.П., Панфиль М.С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
149. Скоков Р.Б. Снижение влияния тяговой сети постоянного тока на автоблокировку с тональными рельсовыми цепями: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. – Омск, 2004. – 18 с.
150. Мамошин Р.Р., Ардаков А.П. Активный фильтр высших гармоник для тяговых подстанций постоянного тока // Сборник трудов I международного симпозиума «Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте», М.: МИИТ, 1997. – С. 111-113

151. Borchard L.O., Beukes H.J., Enslin J.H.R. Development of regenerative 3kV dc traction substation with active power filter capability // Computers in Railways VII, WIT Press, 2000, pp 567-575
152. Wilkinson R., Putter C., Enslin J. DC-side harmonic compensation in DC traction applications // IEEE 1996, pp 827-832.
153. Кулинич Ю.М. Электронная преобразовательная техника: учебное пособие. – М.: ФГБОУ, 2015. – 204 с.
154. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. Том 2: Электронная преобразовательная техника. М.: УМЦ ЖДТ, 2015. 307 с.
155. Марикин А. Н. Исследование влияния управляемых выпрямителей тяговых преобразовательных агрегатов на рельсовые цепи СЦБ / Марикин, А. Н., Бурков, А. Т., Жемчугов, В. Г., & Кузьмин, С. В. // SCIENTIFIC EDITION. – 2010. – №. 6/6. – С. 77.
156. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко; Под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
157. Comparison of multi-system traction converters for high-power locomotives // M. M. Bakran, H.-G. Eckel, P. Eckert, H. Gamach, U. Wenkemann // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany. – 2004. – P. 697 – 703.
158. Литовченко В. В. Современные многосистемные электровозы / В. В. Литовченко, О. Б. Баранцев // Локомотив. – 2000. - №10. – С. 44-48.
159. "Укрзализныця" на пути реформ // Локомотив – 2012, - №10. С. 2-5.
160. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Нейман Л. Р. – Ленинград-Москва: Госэнергоиздат, 1949. —176 с.

161. A method for integrated harmonic analysis of multi-converter systems / Ferrari P., Giuliari M., Pozzobon A., Pozzobon P. // 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP '98, jointly organized by IEEE IPES and NTUA, 14-16 October 1998. – Athens. – P. 426–431.
162. Путевая блокировка и авторегулировка / Котляренко Н.Ф., Шишляков А.В., Соболев Ю.В., Скрыпник И.З., Шишляков В.А.; под ред. Н. Ф. Котляренко. – М. : Транспорт, 1983. – 408 с.
163. Estimation of Electrical Traction Load Harmonic Impact on Distribution Networks / Prudenzi A. // IEEE. – 2003, – P. 1166–1171.
164. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Бессонов Л. А. – М. : "Гардарики", 2006. – 701 с.
165. Соболев Ю.В. Путевые преобразователи автоматизированных систем управления железнодорожного транспорта / Соболев Ю.В. – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины". – 1999. – 200 с.
166. Шаманов В. И. Обеспечение надежности токопроводящих элементов рельсовой линии при электротяге переменного тока / Шаманов В. И., Косякин В. В., Березовский Г. С., Пультяков А. В. // Автоматика, связь, информатика. – 2002. – № 12. – С. 28–32.
167. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В.С. Аркатов, Н.Ф. Котляренко, А.И. Баженов, Т.Л. Лебедева.. – М. : Транспорт, 1982. – 360 с.
168. Гордеев Н. Ф. Электромагнитная совместимость подвижного состава с импульсным регулированием и линии железнодорожной автоматики / Н. Ф. Гордеев // Всес. науч.-техн. конф. «Проблемы преобразования техники». – Киев, 1991. – С.40.
169. Ермоленко Д. В. Повышение электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения с тиристорным электроподвижным составом:

- автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.09 "Електротранспорт" / Д. В. Ермоленко. – М., 1991. – 22 с.
170. Ермоленко Д. В. Показатели электромагнитной совместимости и методы ее обеспечения в системе электрической тяги переменного тока: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.22.09 "Електротранспорт" / Д. В. Ермоленко. – М., 1999. – 44 с.
171. Штол К., Бечка Й., Надворчик Б. Влияние тягового подвижного состава с тиристорным регулированием на устройства СЦБ и связи / Штол К., Бечка Й., Надворчик Б.; пер. с чеш. – М. : Транспорт, 1989. – 199 с.
172. Maddocks T. Managing EMC problems on railways / T. Maddocks // International Railway Journal and Rapid Transit Revolution. – 1998. – №8. – P. 27–28.
173. Засорин С. Н. Электронная и преобразовательная техника / Засорин С. Н., Мицкевич В. А., Кучма К. Г. ; под ред. С.Н. Засорина. – М.: Транспорт, 1981. – 319 с.
174. Ермоленко Д.В. Улучшение электромагнитного воздействия тиристорного подвижного состава и системы тягового электроснабжения / Д.В. Ермоленко, Павлов В.И. // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – №8. – С.25–30.
175. Carson J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return / J. R. Carson // Bell. Syst. Tech. J. – 1926. – № 5. – P. 539–544.
176. Pollaczek F. On the field produced by an infinitely long wire carrying alternating current / F. Pollaczek // Elektrische Nachrichten Technik. – 1926. – № 9. – P. 339–359.
177. Wise W. H. Effect of ground permeability on ground return circuits / W. H. Wise // Bell. Syst. Tech. J. – 1931. – № 10. – P. 472–484.

178. Wise W. H. Propagation of high frequency current in ground return circuits / W. H. Wise // Proc.Inst. Radio Engrs. – 1934. – № 22. – P. 522–527.
179. Sunde E. D. Earth conduction effects in transmission systems, 2nd ed. Dover Publications, 1968. P. 99–139.
180. Rachidi F. Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground / F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz // IEEE Trans. Power. Delivery. – 1999. – Vol 14. – № 1. – P. 294–302.
181. Gary C. Approche complete de la propagation multifilaire en haute frequence par l'utilisation des matrices complexe / C. Gary // EDF Bull. de la direction des erudes et recherches. Serie B. –1976. – № ¾. – P. 5–20.
182. Deri A. The complex ground return plane. A simplified model for homogenous and multilayer earth return / A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira // IEEE Trans. On Power Systems. – 1981. – Vol 100. – №. 8. – P. 3686–3693.
183. Hill R. J. Calculation and measurement of rail impedances applicable to remoteshort-circuit fault curBETs / R. J. Hill, D. C. Carpenter, B. Mellitt, J. Allan, J. C. Brown // Electric Power Applications. IEE Proceedings. B. – 1993. – Vol 140. – №. 6. – P. 417–420.
184. Косарев Б. И. Совершенствование цепи отсоса тяговых подстанций на грузонапряженных участках / Б. И. Косарев, А. Н. Бычков // Вестник ВНИИЖТ. – 1987. – № 4. – С. 25–29.
185. Кононова Е.И. Расчет электромагнитного влияния тяговых сетей переменного тока на металлические коммуникации / Е.И. Кононова, А.Б. Косарев // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – №2. – С. 17–19.
186. Кучумов В. А. Электромагнитные процессы в тяговой сети с распределенной емкостью при выпрямлении тока в преобразователе электроподвиж-

- ного состава / В. А. Кучумов, Н. Н. Широченко // Вестник ВНИИЖТ. – 1984. – № 8. – С. 23–27.
187. Шевцов Б. В. Анализ мешающего влияния тяговой сети переменного тока / Б. В. Шевцов, А. И. Хетчинов // Новое в повышении эффективности и совершенствовании систем тягового электроснабжения: межвузовский сборник научных трудов. – М. : ВНИИЖТ. – 1985. – С. 42–47.
188. Бочков К. А. Модель электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков // Тезисы докладов научно-технической конференции «Пути повышения эффективности использования подвижного состава». – Гомель. – 1983. – С. 55–56.
189. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
190. CCITT, DIRECTIVES Concerning the Protection of Telecommunication Lines Against Harmful Effects from Electric Power and Electrified Railway Lines, vol. I and IV, Geneva, 1989.
191. Mariscotti A., Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1422–1432, Oct. 2003.
192. Mariscotti A., Pozzobon P., Distribution of the Traction Return Current in AT Electric Railway Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005. - Vol. 20 - No. 3. - P. 2119–2128.
193. Cella R., Giangaspero G., Mariscotti A., Montepagano A., Pozzobon P., Ruscilli M., Vanti M. Measurement of AT electric railway system currents at power-supply frequency and validation of a multiconductor transmission-line model // IEEE Transactions on Power Delivery, 2006. - Vol. 21. - No. 3. - P. 1721–1726.

194. Mingli W., Roberts C., Hillmansen S., Modelling of AC feeding systems of electric railways based on a uniform multi-conductor chain circuit topology // IET Conference on Railway Traction Systems, (RTS), 2010.
195. Bin, W. Haitao H., Shibin G., Xudong H., Power flow calculation for traction networks under regenerative braking condition based on locomotive-traction network coupling // Indonesian Journ. of Electrical Engineering and Computer Science, 2013. - Vol. 11. - No. 2. - P. 848-854.
196. Doerry A. W. Catalog of window taper functions for sidelobe control //Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA. – 2017. 2018 p.
197. Кулик, П. Д., Ивакин, Н. С., Удовиков А. А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности // К.: Изд. дом «Мануфактура. – 2004.
198. Кравцов, Ю. А. Методика проверки помехоустойчивости приёмников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин //Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – №. 6. – С. 102-109.
199. Serdyuk T., and Gavrilyuk V. Research of electromagnetic influence of traction current and its harmonics on the rail circuits // 17th Int. Wroclaw Symp. and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Wroclaw, Poland, pp. 260-263, 2004.
200. Cherfi Z. L., Oukhellou L., Côme E., Dencœux T. P., Aknin P. Partially supervised independent factor analysis using soft labels elicited from multiple experts: Application to railway track circuit diagnosis // Soft Computing, vol. 16, no. 5, pp. 741-754, 2012.
201. Romantsev I. O., Havryliuk V. I. The choice of parameters and criteria for automatization of control tone track circuits // Science and Transport Progress.

- Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, vol. 31, pp. 216-220, 2010.
202. Debiolles A., Oukhellou L., Aknin P. Combined use of partial least squares regression and neural network for diagnosis tasks // IEEE, pp. 573-576, 2004.
203. T. de Bruin, Verbert K., and Babuška R., Railway track circuit fault diagnosis using recurrent neural networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 28.3, pp. 523-533, 2017.
204. Aravindh P., Devakumaran R., Gobikannan S., Kumar K. Rajesh // Railway track circuit fault diagnosis using recurrent neural networks // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol. 6, iss. 3, March 2017.
205. Chen J., Roberts C., Weston P. Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems // ScienceDirect, Control Engineering Practice, vol. 16, pp. 585-596, 2007.
206. Tirian G. O., Filip I., Prostean G. Adaptive control system for continuous steel casting based on neural networks and fuzzy logic // Neurocomputing, 125 (Special Issue), pp. 236-245, 2014.
207. Oukhellou L., Debiolles A., Dencœux T., Aknin P. Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster-Shafer classifier fusion // ScienceDirect, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 23(1), pp. 117-128, 2010.
208. Fink O., Zio E., Weidmann U., Extreme learning machines for predicting operation disruption events in railway systems // ESRE, pp. 1-8, 2013.
209. Sun S., Zhao H. Fault diagnosis in railway track circuits using support vector machines // Machine Learning and Applications (ICMLA), 2013, 12th International Conference, vol. 2, pp. 345-350, 2013.

210. Prasad P. A., Kumar U., Availability analysis of railway track circuits // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, 224.3, pp. 169-177, 2010.
211. Verbert K., B. De Schutter, Babuška R. Exploiting spatial and temporal dependencies to enhance fault diagnosis: Application to railway track circuits // Control Conference (ECC), 2015 European. IEEE, pp. 3047-3052, 2015.
212. Grossmann A. Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // SIAM Journal on Mathematical Analysis, vol. 15, no. 4, pp. 723-736, 1984.
213. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing Representation, San Diego: Academic Press, Elsevier, 1999.
214. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: the Sparse Way, Academic Press, 2008.
215. Gawre S. K., Patidar N. P., Nema R. K. Application of wavelet transform in power quality: a review // Power, vol. 39, no. 18, 2012.
216. Hao S., Sun B., Wang Y., Zhang X., An application of wavelet analysis to detect disturbances in power quality // International Journal of Simulation – Systems, Science and Technology, vol. 17, no. 49, 2016.
217. Pampa S., Debath S., Goswami S. K. Classification of power quality events using wavelet analysis and probabilistic neural network // IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI), vol. 5 no.1, pp. 1-12, 2016.
218. Dekhandji F. Z. Detection of power quality disturbances using discrete wavelet transform // Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B), 2017, 5th International Conference on. IEEE, pp. 1-5, 2017.

219. Coifman R. R., Wickerhauser M. V. Entropy-based algorithms for best basis selection // *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 38, no 2, pp. 713-718, 1992.
220. Liu Z. G., Cui Y., Li W. H. Complex power quality disturbances recognition using wavelet packet entropies and S-transform // *Entropy*, vol. 17, pp. 5811–5828, 2015.
221. Martinez W. L., Martinez A. R. *Computational Statistics Handbook with MATLAB*, Chapman and Hall/CRC, 2007.
222. Sugeno M., Kang G. T.. Structure identification of fuzzy model // *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 28. no. 1, pp. 15-33, 1988.
223. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // *IEEE Trans. Syst., Man Cybern*, 15 pp. 116–132, 1985.
224. Jang J. S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23, pp. 665–685, 1993.
225. Fullér R. *Neural fuzzy systems*, 1995.
226. Wang H., Keerthipala W. W. L. Fuzzy neuro approach to fault classification for transmission line protection // *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, pp.1093–1104, 1998.
227. Chen J., Roberts C., Weston P. Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems // *ScienceDirect, Control Engineering Practice*, vol. 16, pp. 585-596, 2007.
228. Tirian G. O., Filip I., Prostean G. Adaptive control system for continuous steel casting based on neural networks and fuzzy logic // *Neurocomputing*, 125 (Special Issue), pp. 236-245, 2014.
229. Shannon C. E., A mathematical theory of communication // *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, 1948.

230. Havryliuk V. Wavelet Based Detection of Signal Disturbances in Cab Signalling System // 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), IEEE, pp. 94-99, 2019.
231. Бойник А. Б. Корреляционный прием и дешифрация кода АЛСН по спектральному признаку // Інформаційно керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – №. 2. – С. 64-68.
232. Бойник А. Б. Диагностирование и прогнозирование состояния железнодорожной автоматики: Учебное пособие // Харьков: ХарГАЖТ. – 2001.
233. Бойник А. Б. и др. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах // Харьков: УкрГАЖТ. – 2005.
234. Доманский В. Т., Доманский В. В., Доманский И. В. Повышение энергетической эффективности систем электроснабжения тяги и питающих линий энергосистем // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – №. 2. – С. 17-27.
235. Бабаев М. М., Блиндюк В. С., Богатырь Ю. И. Имитационное моделирование временных зависимостей параметров асинхронных двигателей стрелочных электроприводов // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2015. – №. 154. – С. 120-126.
236. Бочев А. С. Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводами / А. С. Бочев, В. В. Мунькин, Е. П. Фигурнов // Железные дороги мира. - 1997. - №11. - С. 8–12.
237. Бочев А. С. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного / А. С. Бочев, Т. П. Добровольскис, В. А. Мишель // Вестник ВНИИЖТа. - 1990. - № 8. - С. 17-20.

Додаток

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

АТ «Укрзалізниця» Регіональна філія «Південно-Західна залізниця»

ВП «Дарницька дистанція сигналізації та зв'язку»

вул. Приколійна, 5, м. Київ, 02099, тел.: (044) 366-42-40, факс: 366-43-40

м. Київ

23.09.2020

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи на отримання
ступеня кандидата технічних наук здобувача

Мелешка Василя Васильовича

на тему: "Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації
нових типів рухомого складу"

Розроблені в результаті виконання дисертаційної роботи Мелешком Василем Васильовичем програма та методика контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також таблиці зі значеннями граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації прийнято до використання у Дарницькій дистанції сигналізації та зв'язку.

Контроль електромагнітних завад у рейкових колах має практичний інтерес для визначення причин появи нестабільної роботи рейкових кіл і, зокрема, автоматичної локомотивної сигналізації на окремих дільницях регіональної філії.

Особливо проблема є актуальною для дільниць з рухом швидкісних поїздів (типу "Хюндай"), а також великовантажних поїздів, під часу руху яких можуть виникати в деяких випадках перекриття сигналів світлофорів. Крім того, проблема є актуальною для дільниць регіональних філій, що межують зі станціями стикування тягових мереж з різними видами тягового струму.

Розроблені програма та методика можуть бути використані для визначення причин збоїв в роботі рейкових кіл, як при безпосередньому контролі сигнального струму в рейкових колах на проблемних дільницях, так і при обробці сигналів АЛСН, що були зафіксовані при вимірюваннях вагон-лабораторіями під час планових поїздок.

Начальник ВП Дарницька дистанція
_сигналізації та зв'язку



Д.В. Шутий

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Дніпровського
національного університету

залізничного

транспортного імені академіка В. Лазаряна

Б. Є. Боднар

2020 р.



про використання результатів дисертації Мелешко Василя Васильовича
"Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в
умовах експлуатації нових типів рухомого складу"

м. Дніпро

« 1 » жовтня 2020 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці спеціалістів та магістрів за спеціальностями 151 «Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології» та 273 «Залізничний транспорт» використовуються наукові та практичні результати, що отримані в дисертації Мелешко Василя Васильовича, а саме:

1. Математична модель та методика контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також таблиці зі значеннями граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації, які використовуються при викладанні дисципліни «Цифрова обробка сигналів в системах залізничної автоматики»; метод моніторингу сигнального струму тональних рейкових кіл з використанням класифікатора на основі штучних нейронних мереж, що використовується при викладанні дисципліни "Технічні специфікації інтероперабельності для контрольно-управляючих систем. Європейська система управління залізничними перевезеннями (ERTMS)".

2. Результати дисертації використовуються при виконанні дипломних магістерських робіт спеціальностей 151 «Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології» та 273 «Залізничний транспорт» (ОПП "Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті (за міжнародною програмою TEMPUS)").

Декан факультету
"Комп'ютерні технології і системи"
д.т.н., професор

В. В. Скалозуб

Завідувач кафедри
"Автоматика та телекомунікації"
д.ф.-м.н., професор

В. І. Гаврилюк