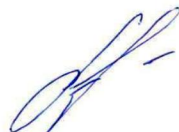


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

МЕЛЕШКО Василь Васильович



УДК 656.259.12:629.423.31

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Науковий керівник** - доктор фізико-математичних наук, професор  
**Гаврилюк Володимир Ілліч**,  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпро)  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри автоматичної та телекомунікацій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Бойнік Анатолій Борисович**,  
Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри «Автоматика і комп'ютерне телекерування рухом поїздів».

кандидат технічних наук, доцент  
**Ніколенко Анатолій Васильович**,  
Національна металургійна академія України,  
завідувач кафедри «Електротехніка та електропривод».

Захист відбудеться “ 23 ” квітня 2021 р. о 11 :00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. академіка Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий “ 19 ” березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



Жуковицький І. В.

## Загальна характеристика роботи

**Актуальність роботи.** Система тягового електропостачання залізниць України є потужним просторово-розподіленим джерелом електромагнітних завад в широкому діапазоні частот, що впливають на роботу пристроїв сигналізації та зв'язку знижуючи їх функціональну безпеку. Проблема набула особливої актуальності в останнє десятиліття в зв'язку з впровадженням в Україні нових типів двосистемних електропоїздів з асинхронним тяговим приводом. На початок проведення випробувань першого двосистемного електровозу ДСЗ в Україні не було нормативних документів, що визначають допустимі рівні електромагнітних завад в рейкових колах (РК) Вирішення важливого науково-прикладного завдання, яке полягає у підвищенні функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впровадження і експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з рейковими колами обумовлює актуальність теми дисертаційних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності з пріоритетними напрямками розвитку залізничної галузі, які визначені у «Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 №430-р), «Стратегічного плану розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року» (наказ Міністерства інфраструктури України від 21 грудня 2015 №547), а також пов'язана з НДР, що виконана Дніпровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: “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), у якій автор брав безпосередню участь як виконавець.

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

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наукові 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 РС;
- удосконалити математичну модель апаратно-програмного комплексу для вимірювання електромагнітних завад від РС в рейках, що дозволить науково-обґрунтовано вибирати параметри компонентів вимірювального комплексу для забезпечення необхідного динамічного діапазону, точності і роздільної здатності за амплітудою, частотою і тривалістю електричних завад;
- розробити математичну модель поширення електричних завад від декількох одиниць РС в поздовжньо неоднорідній несиметричній рейковій лінії для визначення ступеня їх впливу на рейкові кола;

- удосконалити математичну модель впливу гармонічних завад на колійний приймач тонального рейкового кола (ТРК), яка враховує амплітуду, частоту і фазу гармонік тягового струму (ТС), що дозволить визначити граничні параметри електричних завад, перевищення яких може викликати збій в роботі РК в нормальному, шунтовому і контрольному режимах роботи;
- науково обґрунтувати і розробити метод підвищення функціональної безпеки рейкових кіл, заснований на використанні вейвлет-аналізу сигнального струму і класифікатора на основі штучних нейронних мереж, що дозволить своєчасно виявити появу наднормативних завад і спотворень сигнального струму і попередити небезпечні збої ТРК;
- науково обґрунтувати і розробити метод підвищення функціональної безпеки ТРК шляхом моніторингу сигнального струму з використанням адаптивної нечіткої нейронної мережі, що дозволить виявити і контролювати розвиток дефектів рейкового кола, починаючи з їх зародження, що дозволить своєчасно запобігати переходу системи в граничний стан, а у подальшому на цій основі можлива організація обслуговування ТРК з урахуванням їх фактичного стану.

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

**Предмет дослідження** – методи та засоби забезпечення електромагнітної сумісності рейкових кіл з новими типами рухомого складу.

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

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

Отримано такі наукові результати.

***Вперше:***

- розроблено математичну модель поширення електричних завад від декількох одиниць рухомого складу 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 наднормативних завад і спотворень сигнального струму і попередити небезпечні збої ТРК;
- розроблено метод підвищення функціональної безпеки тональних рейкових кіл шляхом моніторингу сигнального струму з використанням адаптивної нечіткої нейронної мережі, що дозволяє виявити і контролювати розвиток дефектів рейкового кола, починаючи з їх зародження, що дозволяє своєчасно запобігати переходу системи в граничний стан, а у подальшому на цій основі можлива організація 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 гармонічних 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 методіку контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також визначено граничні значення гармонік тягового струму, діапазону їх частот і характеру впливу завад від електрообладнання рухомого складу на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації, які прийняті як нормативи для використання у дистанції сигналізації та зв'язку, що підтверджується відповідним актом. Розроблені методи та математичні моделі були використані при проведенні експлуатаційних випробувань нових типів рухомого складу. Математична модель та метод контролю електромагнітних завад в рейковій лінії, а також граничні значення гармонік тягового струму від електрообладнання електровозів 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.

**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 [2], [3]; математичні моделі рейкових кіл і тягової мережі та результати моделювання розповсюдження електромагнітних завад від РС, а також методи контролю гармонік тягового струму [4], [5], [10], [11], [15], [17], [18], [21], [22], [23]; обґрунтування граничних рівнів електромагнітного впливу тягового струму на рейкові кола [9]; математична модель і методи раціонального вибору параметрів вимірювального комплексу та параметрів перетворення Фур'є для спектрального аналізу тягового струму [12], [13], [26], [27], [28], [29]; методи та засоби підвищення функціональної безпеки систем сигналізації в умовах впливу електромагнітних завад [6], [7], [19], [20], [24], [31], [32], [33].

Роботи [1], [8], [14], [16], [25], [30] написані без співавторів, самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідалися і були схвалені на: IV і V міжнародній науково-практичній конференції "Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті", (пгт. Чинадієво, 2011, 2012); міжнародної науково-практичної конференції імені доктора технічних наук Сокола Е. М. "Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд" (Львів, 2015); IX, X, XIII міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті" (м. Дніпро, 2015, 2016, 2019); 75-й, 79-й і 80-й міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" (Дніпропетровськ, 2015, 2019, 2020); VII міжнародній науково-практичній конференції "Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті" (с. Розлуч, 2016); 79-й міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" (м. Дніпро, 2019); міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (м. Харків, 2019). 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" Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна 04.02.2020 р.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 33 наукових праці: 14 – у наукових журналах і збірниках наукових праць, затверджених ВАК України за фахом 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту і включених до міжнародних наукометричних баз, 16 – у матеріалах і тезах міжнародних конференцій, три додаткових праці в тому числі 1 патент на винахід.

**Структура й обсяг дисертації.** Повний обсяг викладено на 191 сторінці і включає 127 сторінок тексту. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (237 найменування) на 27 сторінках, 1 додатку на 2-х сторінках, ілюстрована 38 рисунками та 12 таблицями.

### **Основний зміст роботи**

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 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.

Дослідженням функціональної безпеки і електромагнітної сумісності рейкових кіл і систем тягового електропостачання займалися такі вчені як Аркатов В. С., Бабаєв М.М., Бадер М. П., Беляков І. В., Бестемьянов, П. Ф., Бойнік А. Б., Брылеев А. М., Бочков К. А., Бялонь А., Гавзов Д. В., Гаврилюк В. І., Доманський В. Т., Ермоленко Д. В., Котельников А. В., Косарев А. Б., Котляренко Н. Ф., Кравцов Ю. А., Марквардт К. Г., Маріскотті А., Наумов А. В., Огунсола А., Павлов І. В., Поззобон П., Сиченко В. Г., Соколов Ю. В., Хілл Р. Й., Шаманов В. І. та інші.

Проблема ЕМС тягового електропостачання з лініями сигналізації та зв'язку виникла на початку електрифікації залізниць на постійному і, особливо, на змінному струмі у 60-70-х роках минулого століття. Інтерес до проблеми ЕМС в останні десятиріччя пов'язаний з початком впровадження локомотивів з асинхронним тяговим приводом на початку 2000-х років, і особливо, проблема стала актуальною при впровадженні в експлуатацію у 2012 році нових типів двосистемних електропоїздів. Вперше нормативний документ «Значення граничного струму, діапазону частот і характеру впливу завад від електрообладнання електровозів на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації» був розроблений в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна (науковий керівник робіт проф. В. І. Гаврилюк), що дозволило успішно провести випробування нових типів локомотивів і електропоїздів. 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. Загальна структурна схема АПК для спектрального аналізу тягового струму наведена на рис. 1.

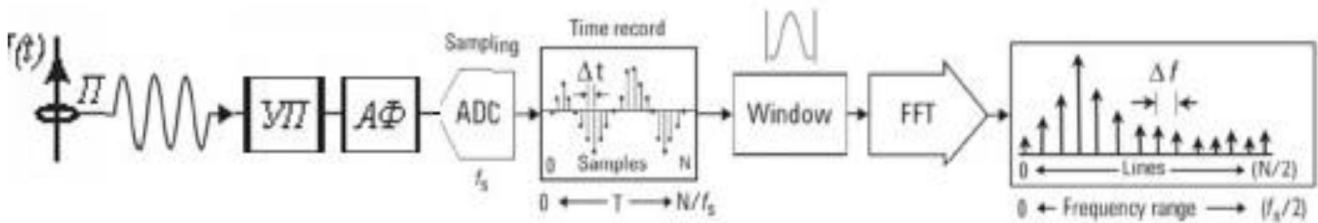


Рисунок 1 - Структурна схема АПК

Проблема раціонального вибору параметрів АПК полягає в жорстких вимогах нормативних документів щодо точності вимірювання параметрів гармонік тягового струму (ТС). На підставі цих вимог сформульовано граничні умови для математичної моделі АПК. Проведення раціонального вибору параметрів АПК ускладнюється великим динамічним діапазоном гармонік тягового струму, широким діапазоном частот та протиріччями, властивими дискретному перетворенню Фур'є (ДПФ), які обумовлюють неможливість одночасного збільшення точності визначення амплітуди гармонік і їх роздільної здатності в частотній області і часовій області, що впливає з принципу невизначеності. В наведеній постановці завдання визначення параметрів АПК для спектрального аналізу ТС раніше не вирішувалося. За умови, що похибки від підсистем АПК є незалежними між собою і носять випадковий характер, загальна відносна похибка вимірювального комплексу є середньоквадратичним значенням (СКЗ) від відносних похибок складових комплексу

$$\delta_{АПК} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2}. \quad (1)$$

Динамічний діапазон тягового струму визначається як відношення СКЗ основної (найбільшої) гармоніки тягового струму частотою  $f_1$  ( $I_{f1max}$ ) до СКЗ найменшої гармоніки тягового струму частотою  $f_2$  ( $I_{f2min}$ )

$$D_{ТС} = 20 \lg \left( \frac{I_{f1max}}{I_{f2min}} \right). \quad (2)$$

Динамічний діапазон апаратно програмного комплексу має бути більшим ніж динамічний діапазон тягового струму для забезпечення нормальної роботи вимірювального комплексу при комутаційних збільшеннях тягового струму, тобто

$$D_{АПК} \geq D_{ТС} + D_{ЗАП} + D_{PЗ} + D_{ДОД} \quad (\text{дБ}), \quad (3)$$

де  $D_{ЗАП}$  враховує запас АЦП за вхідною напругою для захисту від її можливих випадкових підвищень в  $K_0$  раз

$$D_0 = 20 \lg(K_0) \quad (\text{дБ}), \quad \text{де } K_0 = U_{0max}/U_0. \quad (4)$$

Доданок  $D_{PЗ} = 20 \lg(U_{min}/U_{PЗ})$  (дБ) забезпечує необхідну роздільну здатність АПК за амплітудою. Доданок  $D_{ДОД}$  ( $\sim 0,5-1$  дБ) має враховувати додаткові непередбачувані фактори. Для забезпечення вимірювань напруги на вході АЦП з абсолютною похибкою  $\Delta U_f$  для частоти, що відповідає мінімальній амплітуді гармоніки, значення найменшого значущого розряду АЦП має відповідати рівнянню

$$U_{LSB} / 2 \leq \Delta U_f. \quad (5)$$



Відповідно динамічний діапазон для забезпечення необхідної точності має бути

$$D_{АЦП} = 20\lg\left(\frac{U_{FSR}}{U_{LSB}}\right) = 20\lg\left(\frac{U_{FSR}}{2\Delta U_f}\right). \quad (6)$$

Точність вимірювання амплітуди гармоніки визначається відношенням сигналу до шуму  $SNR$ , яке визначають за розрядністю АЦП та числом відліків  $N_W$  віконного перетворення Фур'є

$$SNR_{FFT} = DR_{ADC} + PG = DR_{FS} + 10\lg\left(\frac{N_W}{2}\right). \quad (7)$$

Вплив розрядності АЦП і ширини вікна  $N_W$  на відношення сигналу до шуму АПК ілюструється на рис. 2.

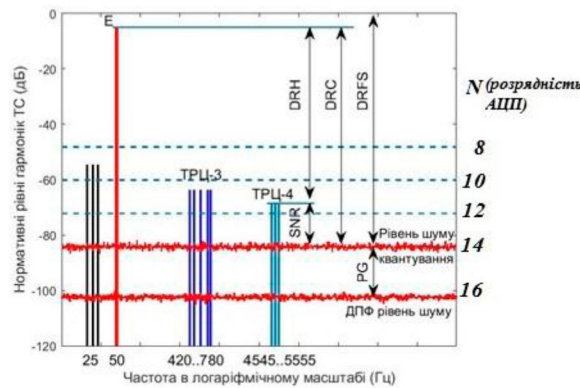


Рисунок 2 – Спектр тягового струму з максимально допустимим рівнем завад при використанні АЦП з розрядністю ( $N$ ) 6, 10, 12, 14 і 16 біт

Спектр сигналу за віконним перетворення Фур'є визначається формулою

$$X_m(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)w(n-mR)e^{-j\omega n} \quad (8)$$

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

Кількість точок віконної функції швидкого перетворення Фур'є дорівнює

$$N_W = 2 \cdot T_W \cdot f_{\max} \cdot K_{f \text{ Запасу}}. \quad (9)$$

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

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

де  $\text{ceil}$  – операнд округлення до більшого цілого числа.

Частота дискретизації АЦП вибирається за умови

$$F_S = 2 \cdot f_{\max} \cdot K_{f \text{ Запасу}}; \quad (11)$$

де  $f_{\max} = 5555$  Гц для ТРЦ-4;  $K_{f \text{ Запасу}} \geq 4..5$  – коефіцієнт запасу.

Мінімальний інтервал тривалості і частоти гармонічної завади при їх одночасному вимірюванні для сегменту з кількістю вибірок  $N_S$  визначається рівняннями

$$\Delta t = N_S / F_S; \quad (12)$$

$$\Delta f_w = \Delta F_0 \cdot F_S / N_w, \quad (13)$$

де  $\Delta F_0$  – ширина головного пелюстка віконної функції.

Збільшити роздільну здатність за рівнем сигналу і за частотою можна за рахунок збільшення числа точок віконного ШПФ  $M$ , що ілюструється рис. 3.

Роздільну здатність у часі можна збільшити шляхом збільшення перекриття вікон  $Nov$ . При цьому кількість полос у часі визначається за формулою

$$k = \frac{N_x - Nov}{N_w - Nov}. \quad (14)$$

Наведена математичний опис (1)-(13) із сформульованими граничними умовами дозволяє провести раціональний вибір параметрів АПК для забезпечення необхідної точності вимірювань.

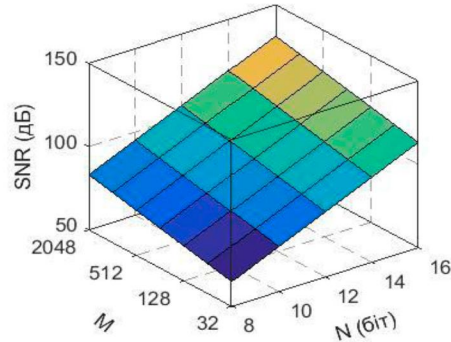


Рисунок 3 – Залежність відношення "сигнал-шум" АПК від розрядності АЦП ( $N$ ) і числа точок ШПФ ( $M$ ).

Модель була реалізована у вигляді комп'ютерної програми. Перевірку адекватності моделі проведено за двома етапами. На першому етапі визначили точність і роздільну здатність віконного ШПФ за відомими параметрами гармонік. В якості віконної функції взято функцію Блекмана-Харріса. Відносна похибка визначення амплітуд і частот гармонік не перевищувала при цьому 0.1 %. На другому етапі визначали похибку вимірювального комплексу з використанням 20 зразків сигналу. Ступінь відповідності отриманих значень амплітуд гармонік для даної вибірки нормальному розподілу визначали за критерієм хі-квадрат Пірсона. Ширину довірчого інтервалу розраховували з використанням розподілу Стьюдента для довірчої ймовірності на рівні 0,95. За значеннями довірчого інтервалу для різних типів вікон розраховували відносний розмах результатів вимірювань параметрів гармонік як відношення (у відсотках) півширини довірчого інтервалу (для  $P = 0,95$ ) до СКЗ параметру.

У **третьому розділі** розроблено математичну модель протікання електричних завад від РС в несиметричній рейковій лінії. В моделі поздовжньо-неоднорідна тягова мережа представлена у вигляді послідовно з'єднаних багатополосників (рис. 4).

$$\mathbf{M}_0 = \prod_{n=1}^N \mathbf{M}_n \quad (15)$$

Кожний багатополосник представлений в моделі еквівалентною схемою і матрицею параметрів в А-формі. Розподіл напруги і струму по їх довжині описується відомими рівняннями

$$\frac{d\mathbf{U}_f(x)}{dx} = -\mathbf{Z}_f \mathbf{I}_f(x), \quad (16)$$

$$\frac{d\mathbf{I}_f(x)}{dx} = -\mathbf{G}\mathbf{U}_f(x). \quad (17)$$

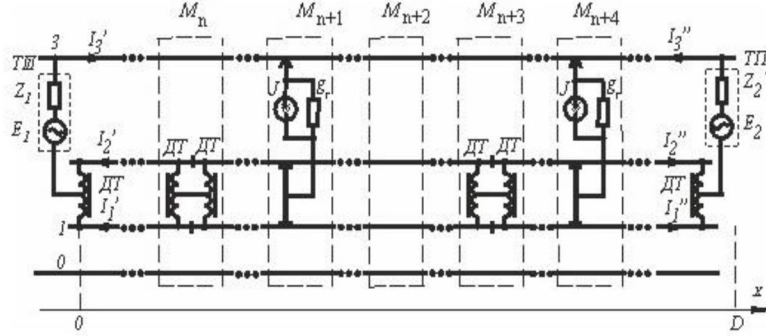


Рисунок 4 - Еквівалентна схема поздовжньо-неоднорідної тягової мережі

Граничні умови визначаються напругами на тягових підстанціях

$$U_3(x=0) = U_{ТП1}; \quad U_1(x=0) = U_2(x=0) = 0; \quad (18)$$

$$U_3(x=D) = U_{ТП2}; \quad U_1(x=D) = U_2(x=D) = 0. \quad (19)$$

Рівняння (16), (17) мають відомі рішення

$$\mathbf{U} = \exp(-\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_a + \exp(-\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_b, \quad (20)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{Z}^{-1} \sqrt{\mathbf{ZG}} \left[ \exp(-\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_a + \exp(-\sqrt{\mathbf{ZG}} x) \mathbf{U}_b \right], \quad (21)$$

$$\text{де } \mathbf{U}_a = \frac{\mathbf{U}_1 + \mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1}{2}, \quad \mathbf{U}_b = \frac{\mathbf{U}_1 - \mathbf{Z}_c \mathbf{I}_1}{2}. \quad (22)$$

Коефіцієнт асиметрії опорів двох рейок і коефіцієнт асиметрії значень провідності між кожною рейкою та землею визначаються виразами

$$\underline{K}_Z = \frac{Z_{11} - Z_{22}}{Z_0} = \frac{\Delta Z}{Z_0}; \quad \underline{K}_g = \frac{g_{10} - g_{20}}{g_0} = \frac{\Delta g}{g_0} \quad (23)$$

Коефіцієнти асиметрії напруги  $\underline{K}_{Uf}$  і струму  $\underline{K}_{If}$  гармоніки з частотою  $f$  визначаються формулами

$$\underline{K}_{Uf} = \frac{\dot{U}_{2f} - \dot{U}_{1f}}{\dot{U}_{0f}} = \frac{\dot{U}_{df}}{\dot{U}_{0f}}; \quad \underline{K}_{If} = \frac{\dot{I}_{2f} - \dot{I}_{1f}}{\dot{I}_{0f}} = \frac{\dot{I}_{df}}{\dot{I}_{0f}}. \quad (24)$$

З рівнянь (16), (17) з урахуванням (23), (24) можна записати

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_{0f}}{dx} = -\frac{1}{2} Z_0 \dot{I}_{0f} \left( 1 - \frac{\Delta R \underline{K}_{If}}{2 Z_0} \right) + Z_{MT} \dot{I}_{3f}; \\ \frac{d\dot{I}_{0f}}{dx} = -2 g_0 \dot{U}_{0f} \left( 1 - \frac{\underline{K}_g \underline{K}_{Uf}}{4} \right); \end{cases} \quad (25)$$

У випадку малих коефіцієнтів асиметрії рейок (реальні значення не перевищують 4 %) диференціальний струм у рейках є досить малим у порівнянні із загальним струмом. Відповідно, члени у дужках в (25) також малі:  $\frac{\Delta R \underline{K}_{If}}{2 Z_0}$  і  $\frac{\underline{K}_g \underline{K}_{Uf}}{4} \ll 1$  і ними можна знехтувати. В такому випадку рішення (25) має вигляд

$$\dot{U}_{0f}(x) = \underline{C}_1 e^{\gamma x} + \underline{C}_2 e^{-\gamma x}, \quad \dot{I}_{hi}(x, f) = m \dot{I}_3 - \frac{1}{\underline{Z}_C} (\underline{C}_1 e^{\gamma x} - \underline{C}_2 e^{-\gamma x}). \quad (26)$$

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

$$\dot{U}_{0f}(x=D) = \dot{U}_{III f}; \quad \dot{I}_{0f}(x=0) = \dot{I}_f \quad (27)$$

Для знаходження диференціальної напруги  $\dot{U}_{df} = \dot{U}_{2f} - \dot{U}_{1f}$  та диференціального струму  $\dot{I}_{df} = \dot{I}_{2f} - \dot{I}_{1f}$  проведемо перетворення (16), (17) з урахуванням (23), (24)

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_{df}}{dx} = -(\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M) \dot{I}_{df} + \frac{\Delta \underline{Z}}{2} \dot{I}_{0f}; \\ \frac{d\dot{I}_{df}}{dx} = \Delta g \dot{U}_{0f} - (g_0 + 2g_M) \dot{U}_{df}. \end{cases} \quad (28)$$

Рішення рівнянь (28) отримано у вигляді

$$\dot{U}_{df}(x) = (\underline{A}_1 e^{\Gamma x} + \underline{A}_2 e^{-\Gamma x}) + \underline{Q} (\underline{C}_1 e^{\gamma x} + \underline{C}_2 e^{-\gamma x}); \quad (29)$$

$$\dot{I}_{df}(x) = -\frac{\underline{\Gamma}}{(\underline{Z}_0 - 2\underline{Z}_M)} (\underline{A}_1 e^{\Gamma x} + \underline{A}_2 e^{-\Gamma x}) + \underline{H}(x); \quad (30)$$

в яких прийняті такі позначення

$$\underline{Q} = \frac{\underline{P}}{\gamma^2 - \Gamma^2}; \quad \underline{H}(x) = \frac{1}{\underline{Z}_A} \left[ \frac{1}{2} (\underline{Q} \underline{Z}_0 + \Delta \underline{Z}) \dot{I}_{0f}(x) - \underline{Q} \underline{Z}_{MT} \dot{I}_3 \right]; \quad (31)$$

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

$$\dot{U}_{df}(x=0) = 0; \quad \dot{U}_{df}(x=d) = \dot{I}_{0f}(x=d) \underline{Z}_F. \quad (32)$$

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 (рис. 5). Відносні значення різниці між вимірюваними та обчисленими значеннями наведені в табл. 1. В цілому, за характером залежності коефіцієнту асиметрії напруги від відстані до поїзду результати розрахунків задовільно збігаються з результатами вимірювань.

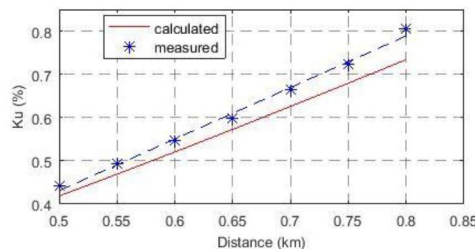


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта асиметрії напруги  $\underline{K}_{Uf}$  для гармоніки тягового струму 50 Гц в рейках від відстані "поїзд колійний трансформатор".

Таблиця 1 – Відносна різниця між вимірюваними та обчисленими значеннями коефіцієнта асиметрії напруги  $\underline{K}_{Uf}$

$x$ (km)	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

У четвертому розділі наведено модель впливу гармонічних завад на приймач тонального рейкового кола. Загальна еквівалентна схема тонального рейкового кола представлена у вигляді трьох каскадно-з'єднаних чотирьохполюсників: Н, К, РЛ, що відповідають апаратурі живлячого, релейного кінця РК та рейковій лінії (рис. 6).

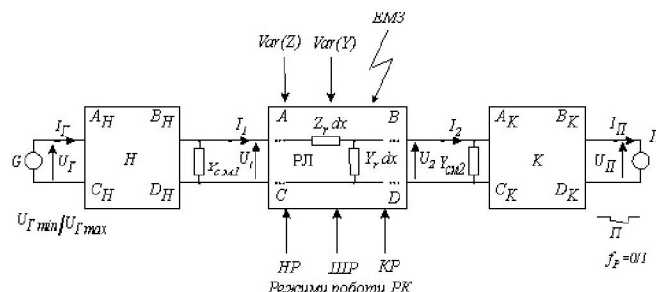


Рисунок 6 – Загальна еквівалентна схема тонального рейкового кола

Граничними значеннями моделі є мінімальне і максимальне значення напруги живлення РК ( $U_{Г\max}$ ,  $U_{Г\min}$ ), середнє-квадратичні значення струму, частота і тривалість гармонічних завад. Струм на вході коїйного приймача рейкового кола визначається як сума сигнального струму і струму завад

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{zn}(t). \quad (33)$$

Сигнальний струм на вході коїйного приймача визначається 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 з рівнянням

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{cn} \\ \dot{I}_{cn} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{Г\text{факт}} \\ \dot{I}_{Г\text{факт}} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

де  $\mathbf{M}_0$  – матриця в А-параметрах для схеми рис. 6, яка визначається як добуток всіх матриць між генератором і коїйним приймачем.

Сумарний струм на вході коїйного приймача можна представити у вигляді

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{zn}(t) = I_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + I_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \quad (35)$$

де  $I_c$ ,  $\omega_c$ ,  $\varphi_c$ ,  $I_s$ ,  $\omega_s$ ,  $\varphi_s$  – відповідно, амплітудне значення, кругова частота й початкова фаза сигнального струму та гармонічної завади.

Сумарний струм двох гармонічних струмів змінюється у часі з частотою, що дорівнює середньому арифметичному від значень частот сигнального струму  $\omega_c$  й завади  $\omega_s$  і має биття за амплітудою і фазою відповідно до виразу

$$i_o = I_o \sin \left[ \frac{\omega_c + \omega_s}{2} t + \frac{\varphi_c + \varphi_s}{2} + \varphi(t) \right], \quad (36)$$

$$\text{де: } I_o = \left[ I_c^2 + I_s^2 + 2I_c I_s \cos[(\omega_c - \omega_s)t + \varphi_c - \varphi_s] \right]^{1/2}; \quad (37)$$

$$\varphi(t) = \arctg \left[ \frac{I_c - I_s}{I_c + I_s} \times \tg \left( \frac{\omega_c - \omega_s}{2} t - \frac{\varphi_c - \varphi_s}{2} \right) \right]. \quad (38)$$

При нерівності частоти завади і частоти сигнального струму, згідно з (36), (37) виникає биття амплітуди сумарного струму з періодом

$$T_B = \frac{2\pi}{|\omega_c - \omega_z|} \quad (39)$$

Адекватність розробленої моделі була експериментально перевірена шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними результатами, отриманими при реєстрації струму на вході коїйного приймача при подачі на нього сигнального струму від генератора ГПУ і гармонічної завади від керованого генератора.

**Моделювання струму на вході КП ТРК у нормальному режимі.** Граничні значення струмів на вході коїйного приймача (КП) ТРК взято з технічної документації, а саме: СКЗ сигнального струму на вході КП взято на рівні 3 мА; СКЗ завад взято на рівні 0,55 і 0,7 мА. Залежність струму на вході КП від часу в нормальному режимі наведено на рис. 7. З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що завади на вході КП з  $I > 0,7$  мА і частотою в смузі  $\pm(0..0,5)$  Гц відносно частоти сигнального струму викликають появу періодичних зменшень струму нижче рівня надійного спрацьовування КП з тривалістю більшою ніж 0,6 с, що приводить до збою у роботі ТРК в нормальному режимі.

**Моделювання струму на вході КП ТРК у шунтовому і контрольному режимах.** Граничні значення струму на вході коїйного приймача в шунтовому і контрольному режимах мають такі значення: залишкова напруга на вході КП ТРК 0,23 В; СКЗ гармонічної завади – 0,4 мА. Залежність струму на вході КП від часу в шунтовому і контрольному режимах наведено на рис. 8.

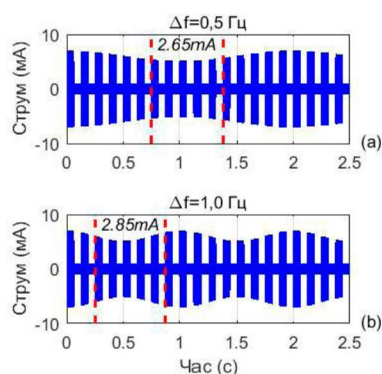


Рисунок 7 – Струм на вході КП ТРК в нормальному режимі при рівні гармонічної завади 0,7 мА

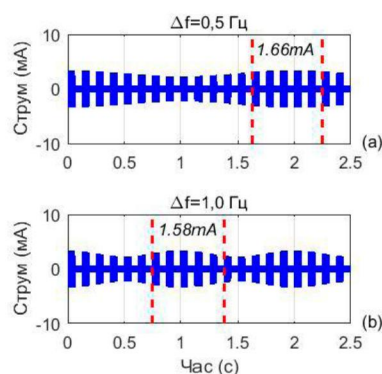


Рисунок 8 – Струм на вході КП ТРК в шунтовому і контрольному режимах при рівні гармонічної завади 0,4 мА

В результаті проведених досліджень зроблено висновок, що завади на вході КП з  $I > 0,4$  мА і частотою в смузі  $\pm(0..0,5)$  Гц відносно частоти сигнального струму викликають підвищення струму на вході КП вище за рівень надійного відпускання КП з тривалістю більше 0,6 с, що приводить до збою в роботі ТРК в шунтовому і контрольному режимах.

У **п'ятому розділі** розглянуто методи підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад. В роботі запропоновано два методи вирішення цієї задачі.

**Метод моніторингу ТРК з використанням вейвлет-перетворення і класифікатора на основі штучних нейронних мереж.**

До збоїв в роботі рейкових кіл в нормальному режимі можуть привести такі типи спотворень сигнального струму ТРК: втрата або зменшення амплітуди імпульсів нижче певного рівня; поява надлишкових імпульсів; поява довготривалих завад; поява гострих імпульсів (піків). Для визначення діагностичних ознак цих спотворень було використано дискретне вейвлет-пакетне перетворення (ДВПП) сигнального струму, аналіз сигнального струму на основі ентропії Шеннона енергії коефіцієнтів ДВПП сигналу, а також куртозис (момент четвертого порядку) сигналу. Під час обробки сигнальних струмів їх розділяли на сегменти за допомогою прямокутного ковзного вікна з довжиною, яка дорівнює восьми періодам сигналу маніпуляції. Для кожного сегмента були розраховані діагностичні параметри. Приклад чотирьох значень діагностичних параметрів наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Приклад значень діагностичних параметрів

Наявність і вид спотворень сигнального струму ТРК	Значення діагностичних ознак спотворень			
	Відносна кількість імпульсів	Відносна енергія (ВЕ) коефіцієнтів ДВПП	Куртозис	Вихідний вектор
Сигнал без спотворень	1.0000	0.0003	1.5601	[0 0 0 0]
Сигнал з критично зменшеними або втраченими імпульсами	0.3750	0.0009	1.8799	[1 0 0 0]
Сигнал з додатковими імпульсами в паузі	1.6250	0.0219	1.0884	[0 1 0 0]
Сигнал з тривалою інтегральною	1.0000	0.0311	1.3744	[0 0 1 0]
Сигнал з гострими імпульсами	1.0000	0.0231	3.1620	[0 0 0 1]

Для класифікації дефектів сигналу використано тришарову штучну нейронну мережу (ШНМ) 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. Кількість виходів відповідає кількості дефектів за якими відбувається класифікація (4 виходи). Кожен вихід нейронної мережі дорівнює 1 або 0 в залежності від того, чи був виявлений певний тип дефекту чи ні. Нейронна мережа навчена з використанням алгоритму зворотного поширення помилок і методикою оптимізації Левенберга-Марквардта. Для навчання ШНН було застосовано п'ять комбінацій сигналів ТРК, що складаються з сигналу без спотворень і чотирьох сигналів з чотирма типами спотворень. Кожен сигнал мав 419200 відліків і був розділений ковзним прямокутним вікном з довжиною 2096 відліків і 25% перекриттям на 250 сегментів. Таким чином, було отримано 1250 зразків, 60 % з яких використано для навчання, 20% – для валідації і 20% – для тестування ШНН. Початкові ваги і змі-

щення були генеровані програмою автоматично. Загальна середньоквадратична помилка навченої нейронної мережі становила 0,02310.

**Метод безперервного моніторингу сигнального струму ТРК для виявлення спотворень на початкових стадіях їх виникнення.**

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, щоб 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 статистики, а саме: рівень напруги сигналу на вході приймача, що має бути в межах від 0,4 В до максимального, наведеного в регульовальній таблиці на РК; напруга в паузах сигналу, що має бути меншою, ніж  $U_{OR} = U_S K_R K_{OM}$ , де  $K_{OM}$  - коефіцієнт запасу на відключення приймача; ентропія Шеннона енергії ДВПП, значення якої залежить від спотворень форми сигнального струму. Система АННМ складається з нейро-нечіткої моделі, яка працює за алгоритмом Такагі-Сугено.

Масив даних для навчання побудований з трьох вхідних і одного вихідного векторів із 120 рядками, з яких 60 рядків використовувалися для навчання і 60 – для тестування. Метод навчання АННМ був реалізований редактором MATLAB ANFIS. Функція приналежності типу «*gbellmf*» була генерована для кожного вхідного вектору. Вихід системи був обраний лінійним, що відповідає моделі АННМ класу Sugeno. Структура моделі АННМ і графік результативності тренувань системи показаний на рис. 9. Помилка навчання склала 0,0171. 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.

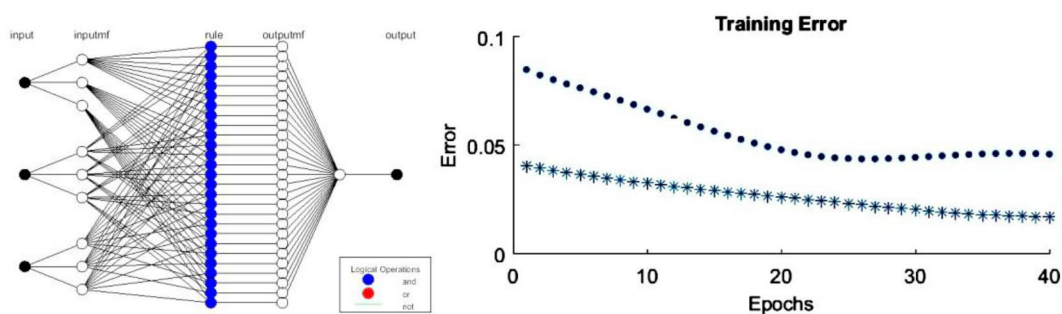


Рисунок 9 – Структурна схема мережі і графік результативності тренувань



## 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. За-

гальна 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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 струму. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2019. №. 17. С. 20-29.
14. В. В. Мелешко Дифференційний 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 светофоровжелезнодорожного 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 освіти*: Тези ІХ Міжнар. науково-практичн. конф. (Дніпропетровськ, 16-17 грудня 2015). – Д.: ДІТ, 2015. С. 15.
19. Гаврилук В. И., Васишин 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. Гаврилук 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.: ДІТ, 2016. С. 24
22. Гаврилук 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.: ДІТ, 2016. С. 25.
23. Гаврилук 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. Гаврилук 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 транспорті*. 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.: ДІТ, 2019. С. 45.
29. Гаврилук 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. Гаврилук 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. Гаврилук 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.

### 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, м. Дніпро, 2020. У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності. На основі огляду літератури сформульовано мету та основні завдання дослідження. 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. Для підвищення функціональної безпеки рейкових кіл розроблено метод моніторингу сигнального струму в рейкових колах, що базується на використанні вейвлет-аналізу сигнального струму і класифікатора на основі штучних нейронних мереж. Для виявлення дефектів рейкового кола, починаючи з їх зародження, розроблено метод підвищення їх функціональної безпеки на основі адаптивної нечіткої нейронної мережі

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

## АННОТАЦИЯ

*Мелешко В. В.* Повышение функциональной безопасности рельсовых цепей в условиях эксплуатации новых типов подвижного состава. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 - эксплуатация и ремонт средств транспорта. - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна., г. Днепр, 2020. В диссертационной работе решена научно-практическая задача повышения функциональной безопасности рельсовых цепей в условиях эксплуатации новых типов подвижного состава путем обеспечения их электромагнитной совместимости. На основе обзора литературы сформулирована цель и основные задачи исследования. Проведены теоретические и экспериментальные исследования позволили научно обосновать выбор параметров измерительного комплекса, что позволило обеспечить необходимую разрешающую способность и точность определения параметров гармонических помех, а также разработать математическую модель распространения электрических помех от нескольких единиц подвижного состава в продольно неоднородной несимметричной рельсовой линии. Для повышения функциональной безопасности рельсовых цепей разработан метод мониторинга сигнального тока в рельсовых цепях, основанный на использовании вейвлет-анализа сигнального тока и классификатора на основе искусственных нейронных сетей. Для выявления дефектов рельсовых цепей, начиная с их зарождения, разработан метод повышения их функциональной безопасности на основе адаптивной нечеткой нейронной сети

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, железнодорожная автоматика, рельсовые цепи, электромагнитная совместимость, функциональная безопасность.

## ABSTRACT

*Meleshko V. V.* Improving the functional safety of rail circuits in the conditions of operation of new types of rolling stock. - Manuscript of qualification scientific work.

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, Dnipro, 2020.

In the dissertation the scientific and practical task of increase of functional safety of rail circuits in the conditions of operation of new types of a rolling stock by maintenance of their electromagnetic compatibility is solved. Based on the literature review, it is concluded that new types of dual-system electric trains, which began to be introduced in Ukraine in the last decade, are a source of powerful electromagnetic interference in a wide range of frequencies that can cause faults in rail circuits and automatic locomotive signaling system operation and, consequently, lead to dangerous situations for train traffic. At the beginning of the tests of rolling stock for electromagnetic compatibility with rail circuits in Ukraine there were no regulations defining the permissible levels of electromagnetic interference in rail circuits. Theoretical and experimental studies, performed in the work, allowed to scientifically substantiate the choice of parameters of the measuring complex, which allowed to provide the necessary resolution and accuracy of determining the parameters of harmonic interference when testing rolling stock for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices over time (up to 0.3 s), frequency and amplitude (up to 2%). To determine the degree of influence of interference on rail circuits, a mathematical model of the propagation of electrical interference from several units of rolling stock in a longitudinally inhomogeneous asymmetric rail line is developed. Based on the simulation, it was shown that when the train approaches the choke-transformer at a distance of 0.85-0.5 km, the voltage asymmetry on the two halves of the winding of the choke-transformer can increase above 6%. The mathematical model of the influence of harmonic interferences on the track receiver of the tonal rail circuit is improved. The limiting current of noise at the input of the track receiver of the tone rail circuit with a frequency in the band  $\pm (0..0.5)$  Hz relative to the frequency of the signal current, which is equal to 0.7 mA for normal mode and 0.4 mA for shunt and control modes

To increase the functional safety of rail circuits in the conditions of operation of new types of rolling stock, a method of monitoring signal current in rail circuits based on the use of wavelet analysis of signal current and classifier based on artificial neural networks has been developed. To detect and control the development of rail circuit defects, starting from their origin, a method of increasing the functional safety of rail circuits by monitoring the signal current in them using an adaptive fuzzy neural network, which prevents timely transition of the system to the limit state. The application of the method allows to implement the maintenance of rail circuits taking into account their actual condition.

The studies generally confirmed the adequacy of the proposed adaptive fuzzy neural network and the effectiveness of the proposed method of monitoring the origin and development of defects in the signal current of the tone rail circuit using an adaptive fuzzy neural network.

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

**МЕЛЕШКО ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат 60×84 1/16.

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 пр.  
Замовлення № 7

Видавництво Дніпровського національного  
університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.03

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010