

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпропетровський національний університет залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна

**ЩЕКА ВАДИМ ІГОРОВИЧ**

УДК 656.259.12:629.423.31

**ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ В  
УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ З АСИНХРОННИМ  
ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
Гаврилюк Володимир Ілліч,  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
завідувач кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв'язок»

**Офіційні опоненти :** доктор технічних наук, професор  
Бабаєв Михайло Михайлович,  
Український державний університет залізничного  
транспорту,  
завідувач кафедри «Електротехніка та електричні  
машини»

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

Захист відбудеться «19» листопада 2015 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розіслано «19» жовтня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
д. т. н., професор

І. В. Жуковицький

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток економіки та промисловості України вимагає збільшення вантажообігу та підвищення швидкостей перевезень, що у свою чергу потребує будівництва спеціалізованих колій, застосування сучасних систем автоматики та сигналізації, введення в експлуатацію нових видів електрорухомого складу (ЕРС), зокрема з асинхронним тяговим приводом (АТП). Рух сучасного ЕРС супроводжується генеруванням гармонік, частоти яких потрапляють у смугу сигнальних струмів рейкових кіл (РК), що є найбільш відповідальними елементами залізничної автоматики, бо саме від їх справної роботи залежить безпека руху на залізниці, цілісність вантажів та життя людей. Оскільки електромагнітні завади можуть бути причиною збоїв в роботі рейкових кіл та призводити до перекриття світлофорів та зупинки поїздів необхідне дослідження, розробка та впровадження систем захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу тягової мережі з ЕРС. Таким чином підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом шляхом захисту їх від електромагнітних завад є актуальним науково-прикладним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності з пріоритетним напрямком розвитку залізничної галузі, яка визначена у "Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року" (схвалена розпорядженням КМУ від 16 грудня 2009 р. № 1555-р), а також пов'язана з НДР "Підвищення безпеки мікропроцесорних систем автоматики й забезпечення їх електромагнітної сумісності з новими типами рухомого складу для магістралей із прискореним та швидкісним рухом поїздів" (номер державної реєстрації 0108U003066), «Дослідження і розробка інтегрованої комп'ютерної системи оптимізації перевезень, енергозбереження, безпеки руху та інтелектуалізації процедур управління залізничним транспортом України» (номер державної реєстрації НДР 0114U005164) та «Дослідження роботи тягової мережі на дільницях з рухом великовантажних і прискорених поїздів, розробка пропозицій щодо зменшення втрат електроенергії в зворотній тяговій мережі та її впливу на роботу АЛСН» (номер державної реєстрації НДР 0112U008162) в яких дисертант приймав участь як виконавець і є співавтором звіту з НДР.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання та новими видами рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз роботи рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом з урахуванням впливу електромагнітних завад від ЕРС;

- розробити узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахуванням процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів та на її основі комп'ютерну програму для дослідження завад від ЕРС з АТП при різних режимах роботи електрообладнання і визначити найбільш несприятливі режими ведення ЕРС для функціонування рейкових кіл;
- вдосконалити метод вимірювання електромагнітних завад від нових типів ЕРС при їх випробуваннях з одночасним багатоканальним вимірюванням параметрів завад, швидкості руху, режимів роботи електрообладнання та ін. для визначення причин появи понаднормованих рівнів завад;
- розробити математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на рейкові кола для наукового обґрунтування методу ефективної компенсації електромагнітних завад в рейкових колах від ЕРС;
- розробити та науково обґрунтувати метод селективної компенсації завад в рейкових колах і, як наслідок, підвищити безпеку функціонування рейкових кіл;
- провести техніко-економічну оцінку впровадження результатів дисертаційної роботи.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні процеси в системі «рейкове коло - контактна мережа – електрорухомий склад» і їх вплив на безпеку функціонування рейкових кіл.

**Предмет дослідження** – методи та засоби підвищення безпеки функціонування рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом.

**Методи дослідження.** У роботі при розробці та дослідженні узагальненої математичної моделі силових кіл ЕРС з АТП використано методи математичного моделювання на ЕОМ, імітаційного моделювання за допомогою пакета OrCAD PSpice, перетворення Лапласа, статистичного аналізу; для розробки методу селективної компенсації завад в рейкових колах використані методи математичного аналізу та синтезу, математичного моделювання, чисельні методи; в експериментальних дослідженнях використані методи фізичного моделювання, натурних випробувань, статистичного аналізу, перетворення Фур'є, цифрової обробки сигналів.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в науковому обґрунтуванні підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання та новими видами рухомого складу.

- вперше запропоновано узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахування процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів, а також аналітичне розв'язання рівнянь моделі і її реалізацію в пакеті OrCAD PSpice, що дозволило дослідити частотні параметри завад від ЕРС

з АТП в різних режимах його роботи та визначити найбільш несприятливі для функціонування рейкових кіл режими ведення ЕРС;

- вперше розроблено математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на рейкові кола, що дозволило дослідити характер розповсюдження електромагнітних завад та науково обґрунтувати метод ефективної компенсації електромагнітних завад в рейкових колах від ЕРС;

- вперше розроблено наукове обґрунтування запропонованого методу селективної компенсації завад в рейкових колах, суть якого полягає у зменшенні в рейкових колах тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів рейкових кіл, що дозволило значно зменшити електроспоживання та потужність компенсуючих пристроїв та підвищити безпеку функціонування рейкових кіл;

- вдосконалено метод вимірювання електромагнітних завад від нових типів ЕРС при їх випробуваннях, що відрізняється від існуючих одночасним багатоканальним вимірюванням та реєстрацією зворотних тягових струмів від електрообладнання ЕРС, фазних струмів тягового асинхронного двигуна, напруги на приймальних котушках автоматичної локомотивної сигналізації, сигналів швидкостеміра та керуючих сигналів контролера, що дало можливість всебічно проаналізувати виявлені понаднормовані електромагнітні завади, які генеруються обладнанням ЕРС та причини їх виникнення.

**Практичне значення одержаних результатів.** Здобуті в дисертації наукові результати дозволили розробити метод зниження електромагнітного впливу контактної мережі на рейкові кола та забезпечити їх електромагнітну сумісність з електрорухомим складом з асинхронним тяговим приводом, що дозволило підтвердити можливість експлуатації сучасних перспективних локомотивів з АТП на залізницях України.

Вдосконалено метод вимірювання електромагнітних завад нових типів ЕРС при їх випробуваннях, який може бути використаний при сертифікаційних випробувань ЕРС з АТП на електромагнітну сумісність з пристроями автоматики.

Основні наукові результати дисертації передані для впровадження у Шосту дистанцію сигналізації та зв'язку Придніпровської залізниці та в П'яту дистанцію сигналізації та зв'язку Одеської залізниці, а також використовуються у навчальному процесі ДНУЗТ на кафедрі «Автоматика, телемеханіка та зв'язок».

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

В роботах, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належить наступне: створення математичної моделі і отримання її характеристик [1]; наукове обґрунтування реалізації запропонованого методу захисту РК [2], [7]; створення математичної моделі розповсюдження зворотного тягового струму та потенціалу в рейках на ділянках з електротягою змінного струму та її комп'ютерна реалізація [3]; проведення вимірів та аналіз отриманих даних [4]; отримання

математичних моделей, обробка результатів дослідження [6], проведення випробувань, аналіз результатів, створення математичних моделей [9]. Роботи [5], [8], [10] - [16] написані без співавторів, самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідалися та були схвалені на: II-й міжнародній науково-практичній конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті” (2009, м. Місхор); 69-й міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” (2009, м. Дніпропетровськ); III міжнародній науково-практичній конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті” (2010, м. Дніпропетровськ), IV міжнародній науково-практичній конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті” (2011, смт. Чинадієво); Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту” (2014, м. Дніпропетровськ). В повному обсязі робота доповідалась і була схвалена на міжкафедральному науковому семінарі в ДНУЗТ 19 червня 2015 року.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 16 наукових праць: 8 наукових статей, з них 6 – у наукових журналах і збірниках наукових праць, рекомендованих ВАК України за фахом 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту, 1 патент на винахід, 7 – у матеріалах та тезах міжнародних конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Загальний зміст дисертації складає 161 сторінок, з них обсяг тексту 138 сторінок. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури (153 джерела), додатків, ілюстрована 85 рисунками, містить 10 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульована мета та задачі дослідження. Приведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Відображена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про апробації та публікації результатів досліджень.

У **першому розділі** проведено огляд існуючих видів ЕРС з АТП на вітчизняних та закордонних залізницях та засобів зменшення електромагнітного впливу струмів контактної мережі на пристрої СЦБ. Проведено аналіз роботи РК в умовах електромагнітного впливу з боку контактної мережі з ЕРС та статистики відмов з причин порушення електромагнітної сумісності.

Значний вклад в дослідження функціональної безпеки та електромагнітної сумісності рейкових кіл з нових типами електрорухомого складу присвячено праці таких вчених: В. С. Аркатов, М. М. Бабаєв, М. П. Бадьор, А. Б. Бойнік, А. С. Бочев, К. А. Бочков., В. І. Гаврилюк, В. М. Даманський, О. В. Завгородній, Г. І. Загарій, О. О. Заріфьян, В. В. Корнієнко, А. Б. Косарєв, А. В. Котельников, Ю. А. Кравцов, В. Ф. Кустов, П. Г. Колпахчян, Н. Ф. Котляренко, А. П. Плакс,

К. Г. Марквардт, В. В. Мунькін, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Ю. В. Соболев, А. П. Разгонов, В. І. Шаманов та інші.

На основі проведеного аналітичного огляду зроблено висновок, що залишається відкритим питання забезпечення електромагнітної сумісності нових типів рухомого складу з пристроями залізничної автоматики, що створює певні труднощі на шляху впровадження перспективної техніки. Насамперед небезпеку являють гармонійні складові тягового струму, що генеруються під час роботи ЕРС з АТП. Імпульсний характер роботи статичних перетворювачів ЕРС викликає споживання з контактної мережі несинусоїдального струму, що у свою чергу призводить до появи в рейкових лініях струмів, гармонійні складові яких можуть потрапляти у смугу сигнальних частот РК, тим самим створюючи заважаючий та небезпечний вплив на їх роботу.

У розділі проаналізовано статистику відмов у системах автоблокування та електричної централізації за причинами. З'ясовано, що на долю відмов з проблеми електромагнітної сумісності припадає до 10,5 % відмов апаратури автоматики, зокрема РК. Також зазначено, що цей показник збільшився в останні роки на ділянках з рухом ЕРС з АТП. Отже для впровадження в експлуатацію нових типів ЕРС з АТП необхідно проведення досліджень електромагнітних процесів в комплексній моделі «рейкове коло - контактна мережа – електрорухомий склад» та розробка методів захисту апаратури СЦБ від завад в умовах експлуатації ЕРС з АТП. Проведений аналіз дозволив сформулювати мету та задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** розроблено узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахуванням процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів, а також аналітичне розв'язання рівнянь моделі і її реалізацію в пакеті OrCAD PSpice, що дозволило дослідити частотні параметри завад від ЕРС з АТП в різних режимах його роботи та визначити найбільш несприятливі режими ведення ЕРС для функціонування рейкових кіл.

Для отримання математичного описання електромагнітних процесів в силових колах ЕРС з АТП в дисертаційній роботі пропонується використання метода контурних струмів. Для моделювання використано схему силових кіл ЕРС з АТП, аналог якої використовується на рухомих одиницях, що експлуатуються на залізницях України та Європи, схема заміщення якої (рис. 1) містить обмотку тягового трансформатора, 4-qS перетворювач, проміжну ланку постійної напруги, автономний інвертор напруги (АІН), обмотки статора АТП. Зміна опору силових ключів моделюється на базі апроксимованої вольт-амперної характеристики реальних IGBT.

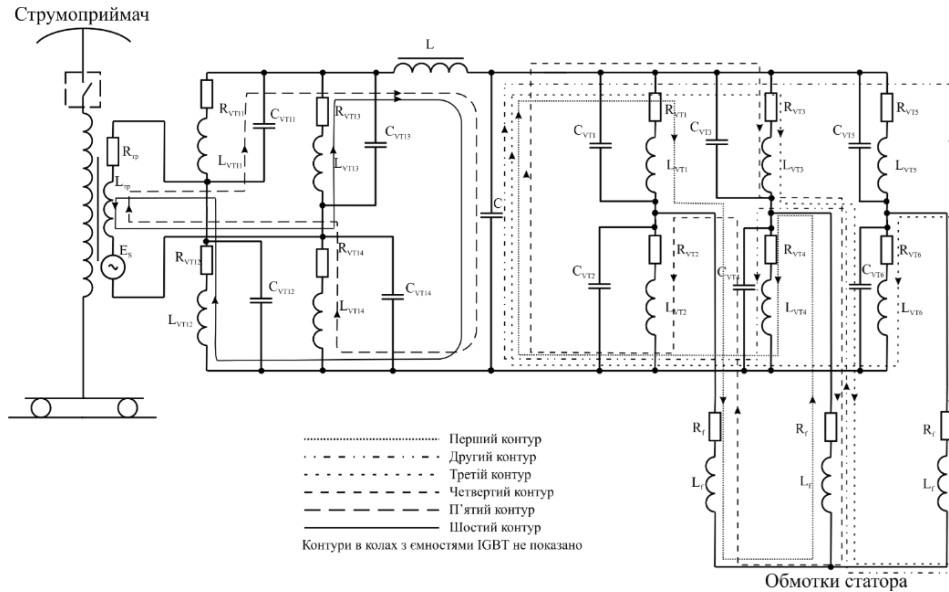


Рисунок 1 - Схема заміщення силових кіл ЕРС з АТП

Ключі АІН заміщуються комплексним опором, що враховує активний опір IGBT, а також його індуктивність та ємність р-п переходів. Обмотки статора заміщуються сумою активного та індуктивного опорів. Обмотка тягового трансформатора заміщується сумою активного та індуктивного опорів з діючою ЕРС ( $E_S$ ) рівною напрузі контактної мережі, поділеної на коефіцієнт трансформації тягового трансформатора. Параметри IGBT визначені на основі технічних даних виробника. Отримана система рівнянь електромагнітних процесів у силових колах ЕРС з АТП для схеми заміщення на рис.1 має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{VT1}(t) \cdot i_{VT1}(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_{VT1}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT1}} \cdot \int_0^t (i_{VT1}(t)) dt + R_{VT1}(t) \cdot i_1(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT2}(t) \cdot i_{VT2}(t) + L_{VT2} \cdot \frac{di_{VT2}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT2}} \cdot \int_0^t (i_{VT2}(t)) dt + R_{VT2}(t) \cdot i_4(t) + L_{VT2} \cdot \frac{di_4(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT3}(t) \cdot i_{VT3}(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_{VT3}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT3}} \cdot \int_0^t (i_{VT3}(t)) dt + R_{VT3}(t) \cdot i_3(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + \\ + R_{VT3}(t) \cdot i_4(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_4(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT4}(t) \cdot i_{VT4}(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_{VT4}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT4}} \cdot \int_0^t (i_{VT4}(t)) dt + R_{VT4}(t) \cdot i_1(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + \\ + R_{VT4}(t) \cdot i_2(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT5}(t) \cdot i_{VT5}(t) + L_{VT5} \cdot \frac{di_{VT5}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT5}} \cdot \int_0^t (i_{VT5}(t)) dt + R_{VT5}(t) \cdot i_2(t) + L_{VT5} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT6}(t) \cdot i_{VT6}(t) + L_{VT6} \cdot \frac{di_{VT6}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT6}} \cdot \int_0^t (i_{VT6}(t)) dt + R_{VT6}(t) \cdot i_3(t) + L_{VT6} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
& \left( R_{VT1}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_1(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + \left( R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_2(t) + L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - \\
& - R_f \cdot i_3(t) - L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} - 2 \cdot R_f \cdot i_4(t) - 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} + R_{VT1}(t) \cdot i_{VT1}(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_{VT1}(t)}{dt} + \\
& + R_{VT4}(t) \cdot i_{VT4}(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_{VT4}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left( i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + i_4(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left( R_{VT5}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_2(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + \left( R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_1(t) + L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - \\
& - 2 \cdot R_f \cdot i_3(t) - 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} - R_f \cdot i_4(t) - L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} + R_{VT5}(t) \cdot i_{VT5}(t) + L_{VT5} \cdot \frac{di_{VT5}(t)}{dt} + \\
& + R_{VT4}(t) \cdot i_{VT4}(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_{VT4}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left( i_2(t) + i_1(t) + i_3(t) + i_4(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left( R_{VT4}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT6}(t) \right) \cdot i_3(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} - R_f \cdot i_1(t) - L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - 2 \cdot R_f \cdot i_2(t) - \\
& 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + R_f \cdot i_4(t) + L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} + R_{VT3}(t) \cdot i_{VT3}(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_{VT3}(t)}{dt} + \\
& + R_{VT6}(t) \cdot i_{VT6}(t) + L_{VT6} \cdot \frac{di_{VT6}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left( i_3(t) + i_1(t) + i_2(t) + i_4(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left( R_{VT5}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT2}(t) \right) \cdot i_4(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} - 2 \cdot R_f \cdot i_1(t) - 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - \\
& R_f \cdot i_2(t) - L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + R_f \cdot i_3(t) + L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + R_{VT3}(t) \cdot i_{VT3}(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_{VT3}(t)}{dt} + \\
& R_{VT2}(t) \cdot i_{VT2}(t) + L_{VT2} \cdot \frac{di_{VT2}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left( i_4(t) + i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left( R_{VT11}(t) + R_{VT14}(t) + R_{TR} \right) \cdot i_5(t) + (L + L_{TR}) \cdot \frac{di_5(t)}{dt} - R_{TR} \cdot i_6(t) + (L - L_{TR}) \cdot \frac{di_6(t)}{dt} + \\
& + R_{VT11}(t) \cdot i_{VT11}(t) + L_{VT11} \cdot \frac{di_{VT11}(t)}{dt} + R_{VT14}(t) \cdot i_{VT14}(t) + L_{VT14} \cdot \frac{di_{VT14}(t)}{dt} + \\
& + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left( i_5(t) - i_1(t) - i_2(t) - i_3(t) - i_4(t) + i_6(t) \right) dt = -E_S \\
& \left( R_{VT13}(t) + R_{VT12}(t) + R_{TR} \right) \cdot i_6(t) + (L + L_{TR}) \cdot \frac{di_6(t)}{dt} - R_{TR} \cdot i_5(t) + (L - L_{TR}) \cdot \frac{di_5(t)}{dt} + \\
& + R_{VT13}(t) \cdot i_{VT13}(t) + L_{VT13} \cdot \frac{di_{VT13}(t)}{dt} + R_{VT12}(t) \cdot i_{VT12}(t) + L_{VT12} \cdot \frac{di_{VT12}(t)}{dt} + \\
& + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left( i_6(t) - i_1(t) - i_2(t) - i_3(t) - i_4(t) + i_5(t) \right) dt = E_S
\end{aligned}$$

У приведеній системі рівнянь:

$i_1 \dots i_6$  - невідомі контурні струми;  $R_{VTi}$  - активний опір силового ключа;  $L_{VTi}$  - індуктивний опір силового ключа;  $i_{VTi}$  - струм силового ключа;  $C$  – ємність проміжної ланки постійної напруги;  $C_{VTi}$  - ємність силового ключа;  $L$  – індуктивний фільтр;  $L_{TR}$  - індуктивний опір обмотки тягового трансформатора;  $R_{TR}$  - активний опір обмотки тягового трансформатора;  $E_S$  - ЕРС обмотки тягового трансформатора.

Для знаходження струмів у силових колах ЕРС з АТП приведено розв'язання отриманої системи інтегро-диференціальних рівнянь операційним методом при нульових початкових умов  $i_i(0) = 0$  та  $u_i(0) = 0$  для моментів часу, починаючи з пуску АТП. Після застосування перетворення Лапласа  $\frac{di(t)}{dt} = p \cdot I(p)$  та  $\int_0^t i(t) dt = \frac{1}{p} \cdot I(p)$  отримано систему лінійних рівнянь першого порядку, яку розв'язано матричним методом за допомогою математичного пакету Maple. Отриманий вектор зображень контурних струмів шляхом зворотного перетворення Лапласа приведено до вектору оригіналів також за допомогою Maple:

$$i = \begin{bmatrix} 9,48 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-13226,72t} - 0,006 \cdot e^{-13157,77t} + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47 - 95,83 \cdot j)t} + \\ + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47 + 95,83 \cdot j)t} + 96,28 \\ 9,48 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-13226,72t} - 0,006 \cdot e^{-13157,77t} + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47 - 95,83 \cdot j)t} + \\ + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47 + 95,83 \cdot j)t} + 96,28 \\ 1,85 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-13226,72t} - 7,12 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-13157,77t} + (-96,28 - 116,86 \cdot j) \cdot e^{-(39,47 - 95,83 \cdot j)t} + \\ + (-96,28 - 116,86 \cdot j) \cdot e^{-(39,47 + 95,83 \cdot j)t} + 192,57 \end{bmatrix}$$

Для проведення дослідження частотних параметрів завод від ЕРС з АТП в різних режимах його роботи на базі математичної моделі з використанням пакету аналізу електричних кіл OrCAD PSpice реалізовано імітаційну модель силових кіл ЕРС з АТП на базі транзисторів IGBT (фрагмент моделі приведений на рис. 2). Базові параметри моделі IGBT визначалися з необхідних для експлуатації на залізниці характеристик транзистора, що були побудовані у Model Editor. Отримана модель за допомогою пристрою керування дозволяє змінювати параметри силових кіл та задавати певні алгоритми керування транзисторами, що дозволяє реалізувати різні режими роботи локомотива з АТП.

За допомогою імітаційної моделі досліджено роботу силових кіл ЕРС з АТП в різних режимах роботи та з'ясовано, що найбільші значення струмів завод спостерігаються при реалізації прискорення з максимальною тягою. Визначено потенційно небезпечні режими ведення локомотива та вихідні частоти АІН, при яких гармоніки фазного та зворотного тягового струму від ЕРС з АТП потраплятимуть у смугу сигнальних частот РК та впливатимуть на їх функціональну безпеку. Рівень цих гармонік у рейкових лініях буде залежати від:

потужності АТП електровозу, режиму його роботи, рівня постійної напруги проміжної ланки, первинних та вторинних параметрів рейкової лінії, кількості локомотивів на тяговій дільниці та швидкості їх руху, погодних умов та ін.

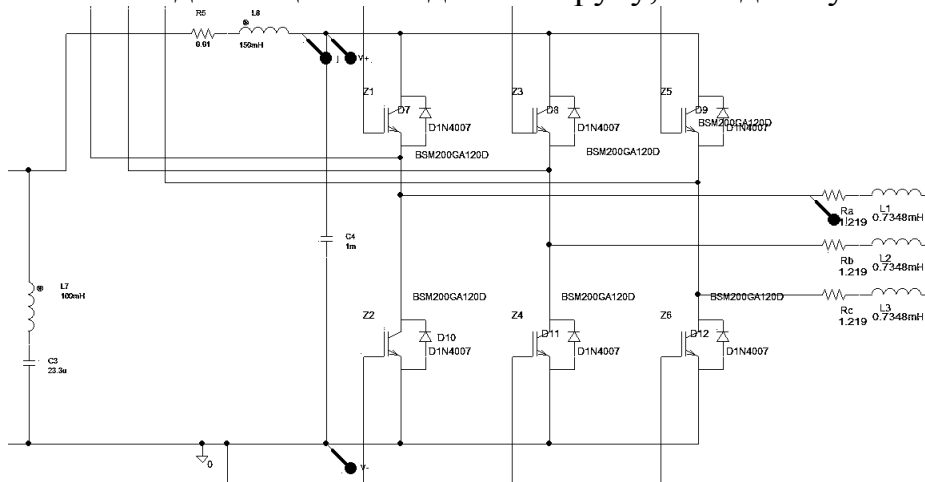


Рисунок 2 - Фрагмент імітаційної моделі в пакеті аналізу OrCAD Pspice

У третьому розділі проведено вдосконалення методу вимірювання електромагнітних завад від нових типів ЕРС при їх випробуваннях. Особливістю методу є одночасні багатоканальні вимірювання та реєстрація зворотних тягових струмів від електрообладнання ЕРС, фазних струмів тягового асинхронного двигуна, струмів в рейкових колах, напруги на приймальних котушках автоматичної локомотивної сигналізації, сигналів швидкостеміра та керуючих сигналів контролера машиніста (рис. 3).

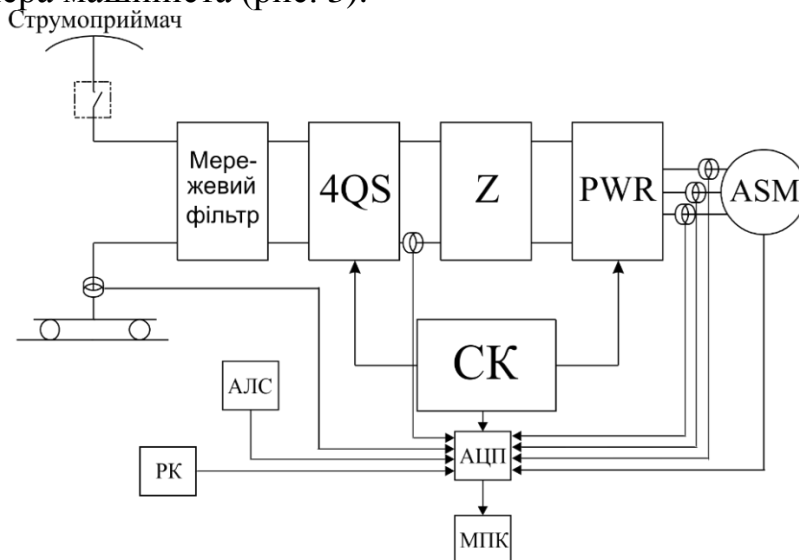


Рисунок 3 - Схема проведення багатоканального вимірювання

Запропоновано комплексний метод аналізу при обробці експериментальних даних, що зумовлює експрес аналіз безпосередньо під час вимірювань з використанням програмного забезпечення, на базі пакету LabVIEW компанії National Instruments, під час якого виділяються найбільш інформативні фрагменти масивів записаних струмів та робляться попередні висновки. Поглиблений аналіз результатів проводився за допомогою пакету MATLAB компанії MathWorks, де реалізовано алгоритм швидкого перетворення Фур'є (FFT). В доповнення до

методу FFT окремі фрагменти загального тягового струму піддавались цифровій фільтрації в пакеті Signal Processing Toolbox, де створено набір цифрових фільтрів декількох типів (з кінцевою та безкінечною імпульсними характеристиками) з полосами пропускання в діапазоні сигнальних частот РК. Отримані за допомогою цифрових фільтрів струми дають інформацію про завади, що безпосередньо потрапляють на приймальні пристрої РК через колійні фільтри і є найбільш загрозливими для їх функціональної безпеки. Як приклад, в таблиці 1 наведено результати вимірювань електромагнітних завод від ЕРС з АТП, отримані на окремій дільниці при проведенні випробувань. З результатів проведених експериментальних досліджень визначено, що в умовах експлуатації ЕРС з АТП струми завод у РК в усіх сигнальних частотах можуть перевищувати гранично допустимі значення. Приклад результатів записаних та оброблених даних наведено на рис. 4.

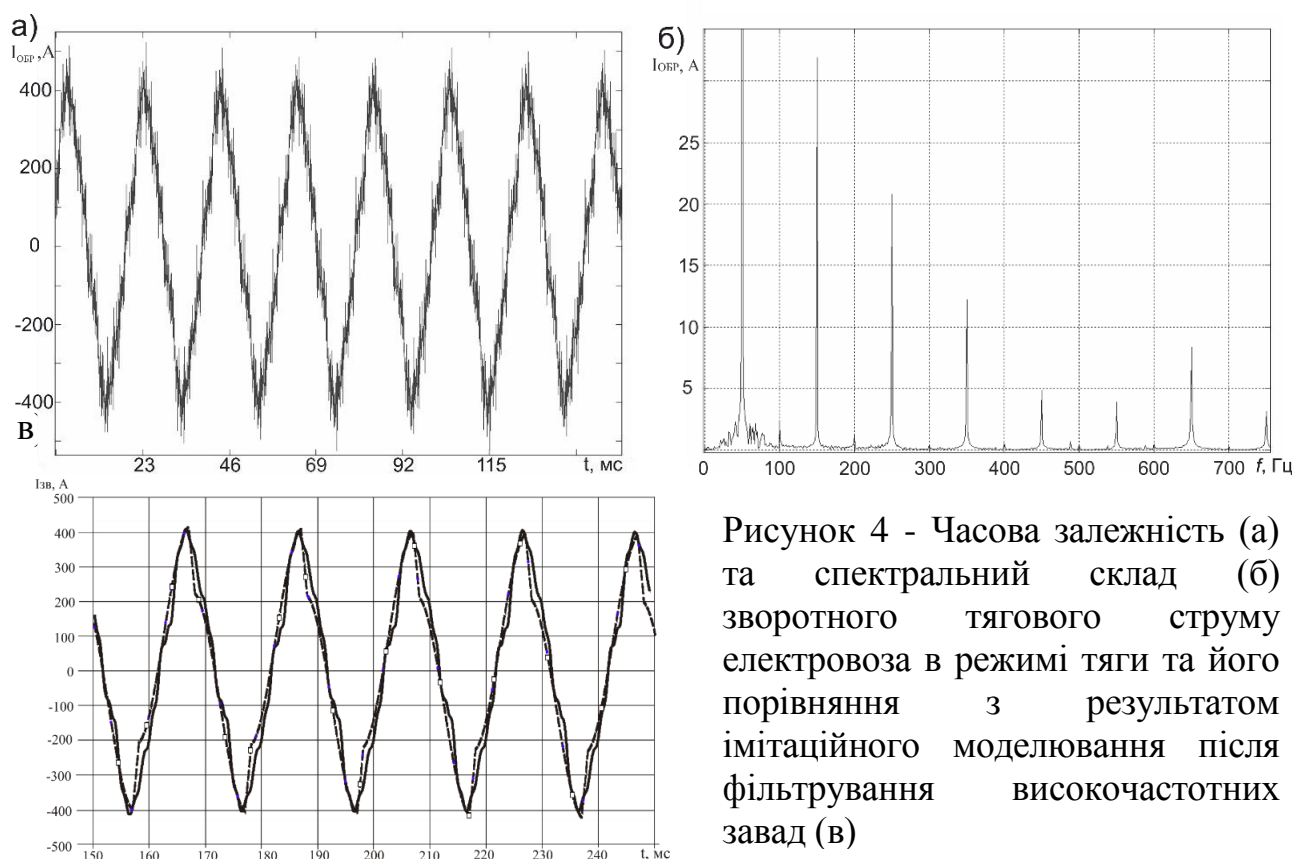


Рисунок 4 - Часова залежність (а) та спектральний склад (б) зворотного тягового струму електровоза в режимі тяги та його порівняння з результатом імітаційного моделювання після фільтрування високочастотних завод (в)

За допомогою отриманих експериментальних даних підтверджено адекватність створених в попередньому розділі математичної та імітаційної моделей реальним системам за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності.

Таблиця 1 - Результати вимірів

Частота, Гц	Діапазон частот, Гц	Максимально допустимий струм завади, А	Максимально вимірний струм завади (тяга змінного струму), А	Максимально вимірний струм завади (тяга постійного струму), А
1	2	3	4	5
25	21-29	1,0	1,41	0,39
50	46-54	1,3	-	0,10

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
420	408-432	0,35	0,37	0,42
480	468-492	0,35	0,40	0,48
580	568-592	0,35	0,55	0,36
720	708-732	0,35	0,42	0,26
780	768-792	0,35	0,52	0,38
4545	4508-4583	0,20	0,50	0,12
5000	4963-5038	0,20	0,15	0,30
5555	5518-5593	0,20	0,21	0,13

Запропоновані методи вимірів та аналізу дозволили всебічно проаналізувати виявлені понаднормовані електромагнітні завади, причиною появи яких є робота тягових перетворювачів ЕРС. Підтверджено, що найбільші значення струмів завад спостерігаються при реалізації прискорення з максимальною тягою. Встановлено зв'язок швидкості руху локомотива з частотним спектром утворюваних ним завад. За результатами досліджень сформовано технічну рекомендацію щодо усунення причин появи електромагнітних завад в рейкових колах: для керування АІН доцільно використовувати метод широтно-імпульсної модуляції з високою несучою частотою.

У четвертому розділі досліджено математичну модель впливу тягової мережі на рейкові кола, що дозволило визначити характер розповсюдження електромагнітних завад від ЕРС з АТП.

Головним параметром індуктивного зв'язку між приймачем та лінією, що створює вплив, виступає опір взаємоіндукції  $Z_{ij} = \omega \cdot M_{ij}$ , де  $M_{ij}$  – коефіцієнт взаємоіндукції між двома лініями, що розглядаються. Найбільш розповсюдженим та оптимальним для розрахунків коефіцієнта взаємоіндукції на низьких частотах вважається вираз, запропонований Поллячеком, який має наступний вид:

$$M_{ij} = \left( 1 + 2 \cdot \ln \frac{10^4}{1,78 \cdot (D_{ij} - r) \cdot \sqrt{10\pi\omega\sigma}} - j \left( \frac{\pi}{2} + \frac{16 \cdot 10^{-4} (h_i + h_j) \cdot \sqrt{10\pi\omega\sigma}}{3} \right) \right) \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

де  $D_{ij}$  – відстань між проводами;  $r$  – радіус проводу, що знаходиться під впливом;  $\sigma$  – питома провідність землі;  $h_i, h_j$  – висота проводів над землею.

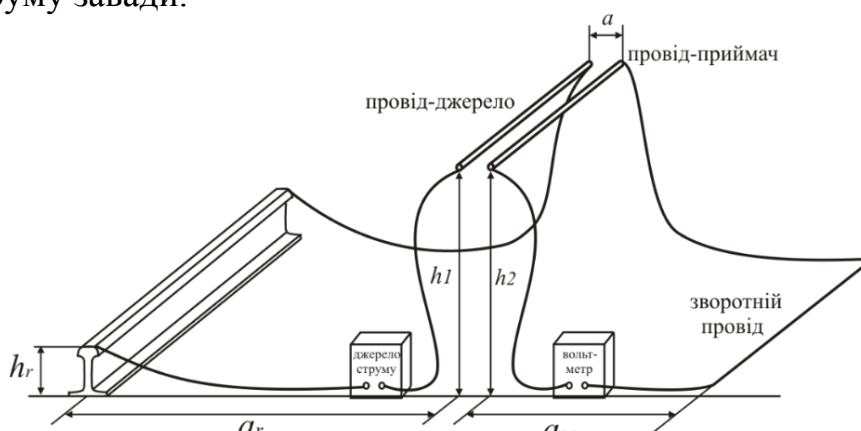
Ступінь впливу можна оцінити за рівнем наведеної в лінії-приймачі ЕРС:

$$E_j = -j\omega M_{ij} I_i l \quad (2)$$

де  $I_j$  – струм в проводі, що створює вплив, А;  $l$  – довжина ділянки зближення, м.

Для дослідження наведеної ЕРС в проводі-приймачі було проведено експеримент (рис. 5) задача якого полягала в фіксуванні рівнів наведеної в проводі-приймачі ЕРС на різних частотах при відомому струмі в проводі-джерелі. При проведенні експериментального дослідження були обрані наступні параметри схеми:  $a = 0,1\text{м}$ ,  $a_r = 2,9\text{м}$ ,  $a_{3\phi} = 10\text{м}$ ,  $h_1 = h_2 = 1,4\text{м}$ ,  $h_r = 0,1\text{м}$ ,

$h_{зв} = 0\text{ м}$ , довжина ділянки зближення  $l = 25\text{ м}$ . Діапазон частот струму завади: до 6000 Гц. При проведенні вимірів для кожної частоти окремо фіксувалось значення струму завади.



$a$  - відстань між проводами по горизонталі;  $a_r$  - відстань між проводом-джерелом та його зворотнім проводом по горизонталі;  $a_{зв}$  - відстань між проводом-приймачем та його зворотнім проводом по горизонталі;  $h_1, h_2$  - висота проводів над землею;  $h_r, h_{зв}$  - висота зворотних проводів над землею.

Рисунок 5 - Схема експерименту для дослідження магнітного впливу контактної мережі на РК

Для інтерпретації отриманих експериментальних даних було проведено теоретичний розрахунок рівня наведеної ЕРС в колі приймача за параметрами експерименту. Окрім цього, проведений натурний експеримент був відтворений в лабораторних умовах на модельному стенді в масштабі 7,45:1. Присутність землі в стенді імітується суцільним металевим листом. Результати проведених досліджень зображено на рис.6.

Суцільною лінією на рис. 6 показано результат теоретичного розрахунку з використанням формул (1) та (2). Символом «○» відмічені значення ЕРС, що отримані при проведенні натурного експерименту. Символом «+» позначено ЕРС, що виміряно на модельному стенді з урахуванням масштабу. З рис. 6 видно, що рівні наведеної ЕРС, отримані різними способами збігаються приблизно до частоти 1000 Гц, при більш високих частотах значення теоретичної моделі значно нижчі від результатів експериментів.

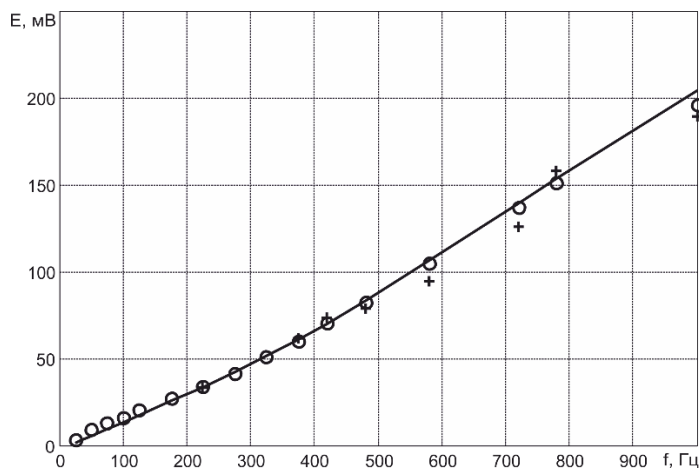


Рисунок 6 - Порівняльна діаграма результатів дослідження

похибка по окремих результатах не перевищує 5 %, середня відносна похибка складає 2,33 %, при чому у діапазоні тональних РК 420...780 Гц - 1,19 %.

При аналізі магнітного впливу КМ рейкова лінія розглядається як дві однопровідні електричні лінії з опором  $Z_{p3}, Z_{p4}$ , які зв'язані між собою взаємною індуктивністю та провідністю верхнього шару баласту. Контактна мережа на

початку та в кінці кожної з цих однопровідних лінії індукує неоднакові потенціали, різниця яких дає поздовжню індуковану в рейках ЕРС:

$$E_{и_p} = U_{рн} - U_{рк} = \frac{2\omega M_{кпр} I_{кп} \operatorname{th}\left(\gamma_p \frac{l}{2}\right)}{\gamma_p} \quad (3)$$

Тоді різницю наведених ЕРС в рейках суміжної колії знаходиться:

$$\Delta E_{34} = E_{и_{р3}} - E_{и_{р4}} = \frac{2\omega (M_{кпр3} - M_{кпр4}) I_{кп} \operatorname{th}\frac{\gamma_p l}{2}}{\gamma_p} \quad (4)$$

На основі отриманої математичної моделі проведено дослідження характеру зміни різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС в залежності від міжколійної відстані та частоти впливаючого струму (рис. 7), а також від висоти розташування контактного проводу та провідності землі (рис. 8). Саме під дією цієї різниці ЕРС у рейковому колі буде протікати різницевий струм, який здатний заподіяти збої в роботі систем автоматики.

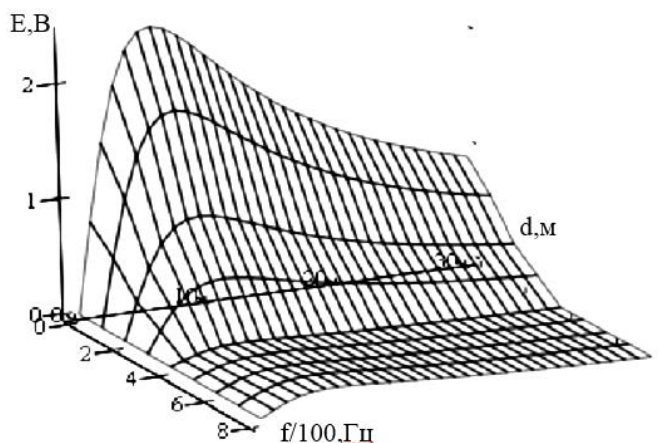


Рисунок 7 – Різниця наведених в рейках ЕРС в залежності від міжколійної відстані та частоти впливаючого струму

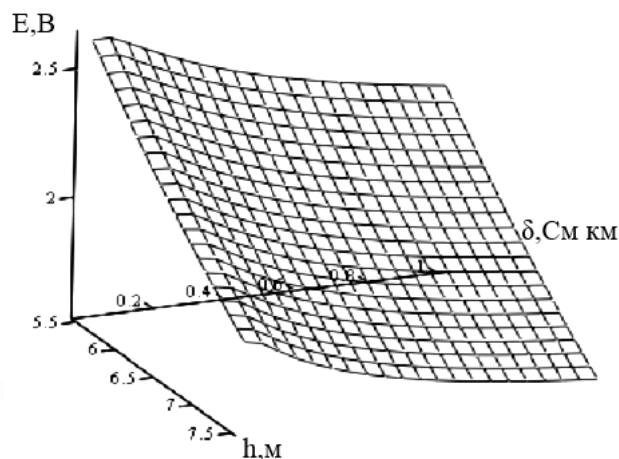


Рисунок 8 – Різниця наведених в рейках ЕРС в залежності від висоти розташування контактного проводу та провідності землі

З приведених графіків видно наявність екстремуму, тобто при розташуванні суміжних колій на відстані 5,9 м контактна мережа буде створювати найбільший вплив на РК суміжної колії. Різниця наведених ЕРС в цьому випадку складатиме 2,42 В для струму 50 Гц та 0,125 В для струму 420 Гц. Отже при проектуванні ділянок з електричною тягою бажано уникати розташування суміжних колій на відстані 5,9 м. Також рівень наведеної ЕРС значно зменшується при збільшенні частоти завади за рахунок зменшення струму завади на високих частотах.

Для дослідження кондуктивних завод в рейках проведено математичне моделювання розповсюдження тягових струмів та потенціалів вздовж фідерної зони (ФЗ). На основі отриманої математичної моделі розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє автоматизувати визначення характеру розповсюдження потенціалів та струмів в рейках уздовж ФЗ. Математична модель дозволяє

змінювати довжину ФЗ, кількість локомотивів у ФЗ, рід тяги, потужність ЕРС, опір рейок та ізоляції. Також запропонована модель враховує індуктивний вплив контактної мережі при тязі змінного струму.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили: підтвердити адекватність математичного апарату (1-4) отриманим експериментальним даних за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності, що дає можливість застосовувати математичний апарат (1-4) в частотному діапазоні до 1000 Гц з невисокою відносною похибкою для розрахунків електромагнітного впливу контактної мережі з ЕРС на РК; визначити, що рівень тягового струму в рейках найбільший в межах тягової підстанції (ТП) і ЕРС та збільшується з ростом інтенсивності руху і при підвищенні опору ізоляції рейок; сформулювати ідею методу компенсації електромагнітних завад в рейкових колах від ЕРС.

У п'ятому розділі розроблено математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом (АЕП) на РК, що дозволило розробити і науково обґрунтувати метод селективної компенсації завад в РК, суть якого полягає в зменшенні тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів РК.

При проведенні моделювання рейкова лінія вважається двопровідною, що дає можливість досліджувати різницю наведених ЕРС та індукованих струмів, а також враховувати поздовжню та поперечну асиметрію опорів рейкових ліній. Розповсюдження зворотного тягового струму в рейках описано за допомогою системи диференціальних рівнянь для ділянки колії довжиною  $dx$ . При визначенні струмів в рейках враховано індукований струм від контактної та екрануючого проводу, екрануючу дію рейок суміжної колії та вплив АЕП. Математична модель впливу тягової мережі з АЕП на РК для двоколійного перегону матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{dU_p(x)}{dx} = (R_p + j\omega L_p) \cdot I_{pm}(x) + j\omega L_{кпР} \cdot I_{кп} + R_{кпР} \cdot I_{кп} \\ \frac{dI_{pm}(x)}{dx} = (G_p - j\omega C_p) \cdot U_p - (G_{кпР} - j\omega C_{кпР}) \cdot (U_{кп} - U_p) \\ I_{p1}(x) = \left( \frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5mep1(d)I_{ke}(d) \right) \cdot \left( 1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right) \\ I_{p2}(x) = \left( \frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5mep2(d)I_{ke}(d) \right) \cdot \left( 1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right) \\ I_{p3}P(x) = 0,5 \cdot (-mkp3(d)I_k - mp1p3(d)I_{p1}(x) - mp2p3(d)I_{p2}(x) - \\ \quad - mep3(d)I_{ke}(d) - mep3(d)I_e(x)) \\ I_{p4}P(x) = 0,5 \cdot (-mkp4(d)I_k - mp1p4(d)I_{p1}(x,d) - mp2p4(d)I_{p2}(x) - \\ \quad - mep4(d)I_{ke}(d) - mep4(d)I_e(x)) \\ I_{ke}(d) = 0,5mke(d)I_k \end{array} \right.$$

Запропонований метод селективної компенсації завад в рейкових колах заснований на використанні АЕП (рис. 9), під'єданого до рейок через елемент регулювання (ЕР), що контролює відгалуження зворотного тягового струму з рейок в АЕП за допомогою сигналів з блоку керування (БК). Забезпечення максимального захисту РК досягається шляхом визначення струму в АЕП виходячи з умови мінімуму електромагнітних завад в РК.

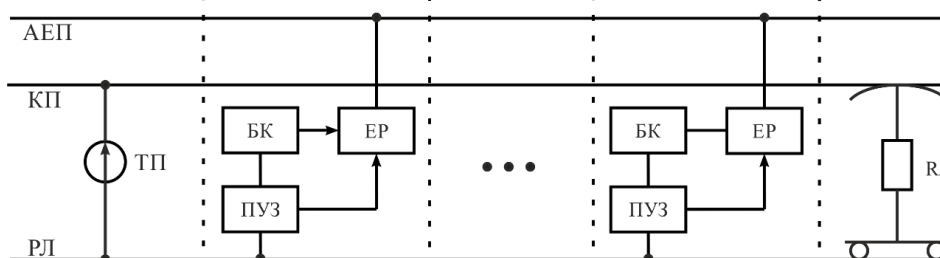
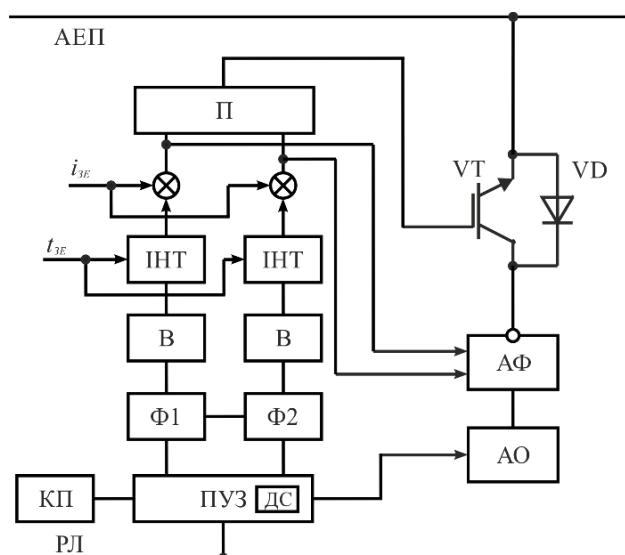


Рисунок 9 - Структурна схема підключення АЕП

Струм з ДС поступає до БК задачами якого є: ідентифікація наявності завади в сигнальному струмі рейкового кола; визначення рівня та тривалості струму завади; формування, виходячи з рівня завади, інформаційного сигналу керування та його підсилення (П) для подачі на ЕР, який відгалужує необхідну і достатню для компенсації електромагнітних завад частину тягового струму з рейок в АЕП (рис. 10). Струм з рейок проходить через активний фільтр (АФ), задача якого підсилити, проінвертувати та пропустити в АЕП струм завади тільки в робочій полосі РК. Коефіцієнт підсилення АФ та полоса його пропускання визначаються за сигналом з БК. Враховуючи великі значення струму через ЕР доцільно створювати його на потужних IGBT.



- РЛ – рейкова лінія
- КП – колійний приймач
- ПУЗ – пристрій узгодження та захисту
- ДС – датчик струму
- Ф – фільтр
- В – випрямляч
- ІНТ – інтегратор
- П – підсилювач
- АО – амплітудний обмежувач
- АФ – активний фільтр
- $t_{3E}$  - допустима тривалість завади
- $i_{3E}$  - допустимий рівень струму завади

Рисунок 10 - Функціональна схема пункту підключення елемента регулювання

На рис. 11 приведено результати математичного моделювання та ілюстрація ефективності розробленого методу селективної компенсації завад (11, в) на ділянці «ТП - локомотив» у порівнянні з системою з пасивним екрануючим проводом (11, б) та для випадку відсутності будь-якої системи (11, а).

Довжина ділянки «ТП - локомотив» 20 км., площиною позначено максимально допустимий струм завади в рейках на частоті 50 Гц - 1,3 А. На діаграмах побудована залежність струму завади в рейках від міжколійної відстані (d) на ділянці «ТП - локомотив». Струм завади в рейках при застосуванні методу селективної компенсації (11, в) не перевищує допустимого рівня.

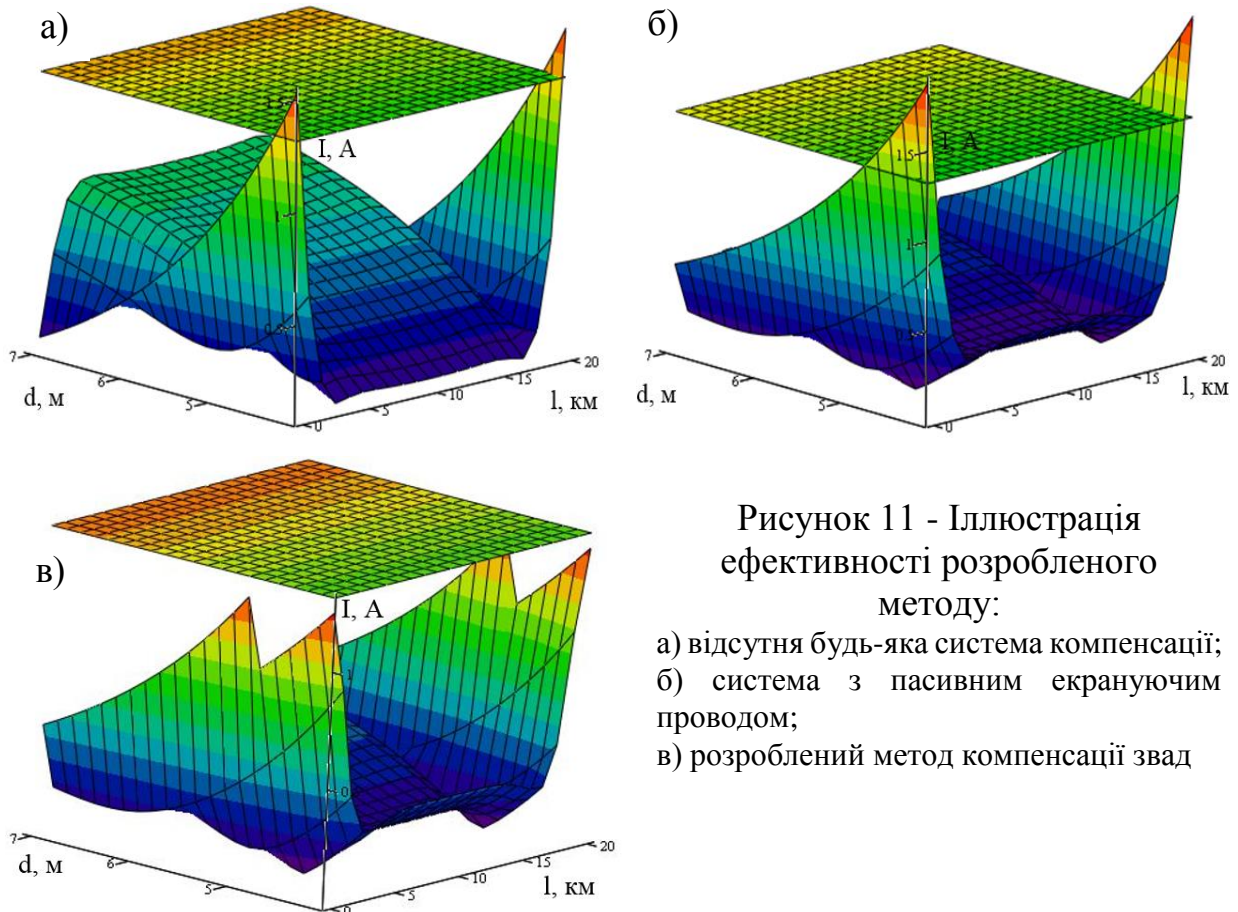


Рисунок 11 - Ілюстрація ефективності розробленого методу:

- а) відсутня будь-яка система компенсації;
- б) система з пасивним екрануючим проводом;
- в) розроблений метод компенсації звад

Впровадження запропонованого методу селективної компенсації завад в рейкових колах дозволяє значно зменшити електроспоживання та потужність компенсуючих пристроїв, а також знижує інтенсивність відмов РК з причин порушення електромагнітної сумісності на 21%, що зумовлює підвищення функціональної безпеки роботи рейкових кіл.

У шостому розділі приведено економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленої системи захисту РК від електромагнітних завад з боку контактної мережі та ЕРС з АТП. Впровадження методу селективної компенсації завад в рейкових колах дозволить знизити кількість відмов РК по причині електромагнітних завад та підвищити безпеку їх функціонування, що в кінцевому результаті дозволить підвищити безпеку руху та отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу. Крім того запропонована система зменшує загальний опір проводів контактної мережі, що дозволяє зменшити втрати потужності. Таким чином впровадження системи захисту РК дозволить отримати економію коштів у розмірі 78649 грн/рік на один обладнаний кілометр.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено науково-прикладне завдання підвищення функціональної безпеки РК в умовах ЕРС з АТП шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання та новими видами рухомого складу. Основні результати досліджень полягають у наступному:

1. На основі проведеного аналізу роботи РК виявлено, що на долю відмов з проблеми електромагнітної сумісності припадає в середньому до 10,5 % відмов апаратури автоматики, зокрема РК, що безпосередньо впливає на безпеку руху поїздів. Також зазначено, що цей показник збільшився в останні роки на ділянках з рухом ЕРС з АТП.

2. Розроблено узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахування процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів, а також аналітичне розв'язання рівнянь моделі і її реалізацію в пакеті OrCAD PSpice, що дозволило дослідити частотні параметри завад від ЕРС з АТП в різних режимах його роботи, визначити найбільш несприятливі для функціонування рейкових кіл режими ведення ЕРС.

3. Вдосконалено метод багатоканального вимірювання електромагнітних завад від нових типів електрорухомого складу при їх випробуваннях, що дав можливість проаналізувати причини виникнення завад, які генеруються обладнанням ЕРС. Метод може бути використаний при сертифікаційних випробувань ЕРС з АТП на електромагнітну сумісність з пристроями автоматики. Виявлено, що рівні гармонічних завад в полосі сигнальної частоти 25 Гц досягають 1,41 А, а в полосах роботи тональних РК (420-780 Гц) – 0,55 А, що перевищує нормативні значення на 40-50%. Встановлено зв'язок швидкості руху локомотива з частотним спектром утворюваних ним завад. За результатами досліджень сформовано технічну рекомендацію щодо усунення причин появи електромагнітних завад в рейкових колах: для керування АІН доцільно використовувати метод широтно-імпульсної модуляції з високою несучою частотою. За допомогою отриманих експериментальних даних підтверджено адекватність створених математичної та імітаційної моделей силових кіл ЕРС з АТП реальним системам за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності.

4. Розроблено математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на РК та досліджено електромагнітний вплив контактної мережі на РК в діапазоні частот струму завади до 6000 Гц. Отримана середня відносна похибка між теоретичними та емпіричними даними на діапазоні частот до 6000 Гц складає 11,12 %, в діапазоні до 1000 Гц відносна похибка по окремих результатах не перевищує 5 %, середня відносна похибка складає 2,33 %, при чому у діапазоні тональних РК 420...780 Гц вона становить 1,19 %. Виявлено, що при розташуванні суміжних колій на відстані 5,9 м контактна мережа створюватиме найбільший вплив на РК суміжної колії. Різниця наведених ЕРС в цьому складатиме 2,42 В для струму 50 Гц та 0,125 В для струму 420 Гц при тяговому струмі 300А; результати підтверджені масштабним моделюванням, середня

відносна похибка складає 3,81%. В роботі підтверджено адекватність застосованого математичного апарату (1-4) отриманим експериментальним даним за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності. Розроблено математичну модель розповсюдження зворотного тягового струму та потенціалу в рейках та її комп'ютерну реалізацію. Визначено, що рівень тягового струму в рейках найбільший в межах ТП й ЕРС та збільшується з ростом інтенсивності руху і при підвищенні опору ізоляції рейок.

5. Розроблено метод селективної компенсації завад в РК, суть якого полягає в зменшенні в РК тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів РК, що дозволяє підвищити безпеку функціонування РК та значно зменшити електроспоживання та потужність компенсуючих пристроїв. Впровадження запропонованого методу селективної компенсації завад в РК знижує інтенсивність їх відмов, що зумовлює підвищення функціональної безпеки РК кіл на 21%.

6. Проведено техніко-економічну оцінку результатів впровадження запропонованого методу селективної компенсації завад в рейкових колах на залізницях України. Економічний ефект складає 78649 грн/рік на один обладнаний системою кілометр та досягається за рахунок зменшення втрат потужності в проводах контактної мережі та зниження кількості відмов РК, що зменшує втрати на простій рухомого складу.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Основні праці**

1. 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.

2. Щека В. І. Розробка системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу контактної мережі суміжної колії / В. І. Щека, О. В. Завгородній // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – № 36. - С. 156-160.

3. Щека В. І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – № 42. – С. 24-28.

4. Исследование электромагнитной совместимости обратной тяговой сети с устройствами сигнализации, централизации и блокировки / А. М. Безнарытний, В. И. Гаврилюк, И. О. Романцев, В. И. Щека // Наука та прогрес трансп. – 2014. – № 3 (51). – С. 7–14.

5. Щека В. І. Дослідження механізмів впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 57 – С. 27-35.

6. Щека В. І. Дослідження особливостей роботи рейкових кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі / В. І. Щека // Залізничний транспорт України. – К.: Вид-во ДНДЦ УЗ, 2015. – №4. – С.16 – 19.

7. Пат. 56336 Україна, МПК (2009) B61L 25/06. Спосіб зменшення електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму на рейкові кола суміжної колії / Гаврилюк В. І., Щека В. І., Завгородній О. В., Миргородська А. І.; заявник і патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2010 07796; заявл. 21.06.10; опубл. 10.01.11, Бюл. № 1.

#### **Додаткові праці**

8. Щека В. І. Організація захисту рейкових кіл від електромагнітних завад з боку контактної мережі / В. І. Щека // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті – 2011. – № 1. – С. 84-90.

9. 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.

10. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу тягового струму на рейкові кола / В. І. Щека // Тези доповідей 69 міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2009. – С. 123–124.

11. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу нових типів рухомого складу на пристрої автоматики / В. І. Щека // Тези доповідей 69 міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2009. – С. 124–125.

12. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу тягових перетворювачів електрорухомого складу на пристрої СЦБ / В. І. Щека // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті”. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2009. – С. 57–58.

13. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу тягового струму на роботу рейкових кіл / В. І. Щека // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті”. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2009. – С. 55–56.

14. Щека В. І. Дослідження магнітного впливу електрорухомого складу на тональні рейкові кола / В. І. Щека // Тези III міжнародної науково-практичної конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті”. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2010. – С. 52-53.

15. Щека В. І. Захист рейкових кіл від електромагнітного впливу контактної мережі / В. І. Щека // Тези IV міжнародної науково-практичної конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті”. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011. – С. 90-91.

16. Щека В. И. Исследование электромагнитного влияния контактной сети на рельсовые цепи / В. И. Щека // Збірник тезисів Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту” – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2014. – С. 115-116.

## АНОТАЦІЯ

### **Щека В. І. Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2015 р.

Дисертація присвячена питанням підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання та новими видами рухомого складу.

Запропоновано узагальнену математичну модель силових кіл електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом, а також аналітичне розв'язання рівнянь моделі і її реалізацію в пакеті OrCAD PSpice, що дозволило дослідити електрорухомий склад як джерело завад в різних режимах його роботи, визначити найбільш несприятливі параметри завад для безпечного функціонування рейкових кіл.

Запропоновано метод багатоканального вимірювання електромагнітних завад від нових типів електрорухомого складу при їх випробуваннях, що дав можливість проаналізувати причини виникнення завад та надати пропозиції щодо зменшення їх впливу на рейкові кола.

Розроблено математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на рейкові кола та запропоновано метод селективної компенсації завад в рейкових колах, суть якого полягає в зменшенні в рейкових колах тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів, що дало можливість підвищити функціональну безпеку рейкових кіл.

**Ключові слова:** функціональна безпека, електромагнітна сумісність, рейкове коло, тяговий асинхронний привод, імітаційне моделювання.

## АННОТАЦИЯ

### **Щека В. И. Повышение функциональной безопасности рельсовых цепей в условиях эксплуатации подвижного состава с асинхронным тяговым приводом. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 - эксплуатация и ремонт средств транспорта. Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, Днепропетровск, 2015

Диссертация посвящена вопросам повышения функциональной безопасности рельсовых цепей в условиях эксплуатации подвижного состава с асинхронным тяговым приводом путем обеспечения их электромагнитной совместимости с системой тягового электроснабжения и новыми видами подвижного состава.

Предложена математическая модель силовых цепей электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом, а также аналитическое решение уравнений модели и ее реализацию в пакете OrCAD PSpice, что позволило

исследовать электроподвижной состав как источник помех в различных режимах его работы, определить наиболее неблагоприятные параметры помех для безопасного функционирования рельсовых цепей.

Предложен метод многоканального измерения электромагнитных помех от новых типов электроподвижного состава при их испытаниях, который дал возможность проанализировать причины возникновения помех и предоставить предложения по уменьшению их влияния на рельсовые цепи.

Разработана математическая модель влияния тяговой сети с активным экранирующим проводом на рельсовые цепи и предложен метод селективной компенсации помех в рельсовых цепях, суть которого заключается в уменьшении в рельсовых цепях только тех помех, частоты которых находятся в полосах работы путевых приемников, что позволило повысить функциональную безопасность рельсовых цепей.

**Ключевые слова:** функциональная безопасность, электромагнитная совместимость, рельсовая цепь, тяговый асинхронный привод, имитационное моделирование.

### THE SUMMARY

**Shcheka V. I. Increasing functional safety track circuits under operating conditions of rolling stock with induction traction drive. – Manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on specialty 05.22.20 – exploitation and repair of transport means. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2015.

The thesis is devoted to improving the functional safety of track circuits under operating conditions of rolling stock with induction traction drive by providing its EMC with a system of Traction Power Supply and new types of rolling stock.

The generalized mathematical model of electric rolling stock power circuits with induction traction drive, analytic solution of the equations of the model and its implementation in the package OrCAD PSpice were proposed, which allowed to investigate the electric rolling stock as a source of interferences in various operating modes, to determine the most unfavorable interference parameters for safe operation of track circuits.

The multi-channel measuring method of electromagnetic interference from new types of electric rolling stock during its tests was proposed, which provided an opportunity to analyze the causes of the interference and to make proposals to reduce their impact on track circuits.

The mathematical model of a power network with active shielding wire influence on track circuits was developed and the method of selective compensation of interference in track circuits was proposed, the essence of which is the reduction in track circuits only those interference whose frequencies are in the bands of track receivers, making it possible to increase track circuits functional safety.

**Keywords:** functional safety, electromagnetic compatibility, track circuit, induction traction drive, simulation.

**ЩЕКА ВАДИМ ІГОРОВИЧ**

**ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ В  
УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ З АСИНХРОННИМ  
ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 15.10.15 р.  
Формат 60×84 1/16. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.  
Тираж 100 прим. Замовлення. № 611

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 1315 від 31.03.2003

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