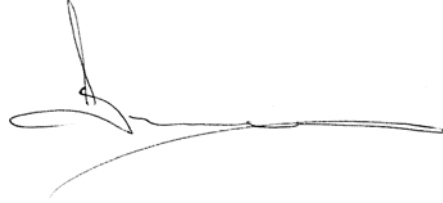


Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Завгородній Олександр Вікторович



УДК 629.4.083:629.424.2

**ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ
ШЛЯХОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ
З ТЯГОВОЮ МЕРЕЖЕЮ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор Гаврилюк Володимир Ілліч, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Міністерство транспорту та зв'язку України, завідувач кафедри автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Бабаєв Михайло Михайлович,
Українська державна академія залізничного транспорту, Міністерство транспорту та зв'язку України

кандидат технічних наук, доцент Вісін Микола Григорович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Міністерство транспорту та зв'язку України.

Захист відбудеться “27” жовтня 2011 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Академіка Лазаряна, 2.

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

Автореферат розісланий “_27_” __вересня__ 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Жуковицький І. В.

Загальна характеристика роботи

Актуальність роботи. Безпека руху поїздів значною мірою залежить від надійної та безпечної роботи рейкових кіл, що є основними колійними датчиками магістральних залізниць України. Рейкові кола (РК) контролюють вільність або зайнятість блок-ділянок залізниці, цілісність рейкової лінії, а також виконують функції безперервного каналу передачі кодів автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) з колії на локомотив. На електрифікованих залізницях по рейкових лініях відбувається каналізація зворотного тягового струму від локомотиву на тягову підстанцію. Рейкові кола функціонують в умовах потужних електромагнітних завад, механічних навантажень, забруднення баласту, впливу погодних умов та інших дестабілізуючих факторів. Гармоніки тягового струму можуть викликати небезпечний або заважаючий збій в роботі РК. Аналіз причин відмов та збоїв в роботі РК показує, що до 10 % їх пов'язано з впливом електромагнітних завад від атмосферних явищ та тягового електропостачання. Особливою мірою це стосується ділянок з прискореним та швидкісним рухом поїздів. Таким чином, підвищення функціональної безпеки РК шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з тяговою мережею є актуальною науково-практичною задачею.

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 України до 2020 року, а також пов'язана з НДР "Розробка та наукове обґрунтування технічних рішень по підвищенню безпеки руху поїздів на швидкісних магістралях шляхом автоматизації контролю та діагностування рейкових кіл" (номер державної реєстрації 0108U003066), в якій дисертант приймав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з тяговою мережею.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести комплексний аналіз функціональної безпеки РК в умовах впливу електромагнітних завад;
- визначити склад та параметри розподілу гармонійних завад від локомотиву з асинхронним тяговим приводом та імовірнісні критерії виконання режимів роботи РК в умовах впливу електричних завад;
- розробити математичну модель розподілу гармонійних завад в рейковій лінії двоколісної ділянки залізниці з декількома локомотивами в фідерній зоні в залежності від основних конструктивних та експлуатаційних параметрів тягової мережі та РК;
- розробити математичну модель розподілу електромагнітного поля навколо рейкової лінії, що враховує реальну конфігурацію рейки та нерівномірність розподілу щільності струму по її перетину внаслідок скін-ефекту;

- розробити та науково обґрунтувати метод захисту РК від електромагнітних завад тягової мережі на дільницях зближення швидкісної магістралі з електро тягою змінного струму з колією з тягою постійного струму;
- розробити математичну модель електромагнітного впливу тягової мережі на РК на дільницях зближення колій з різним родом тягового струму при наявності екрануючого проводу та визначити раціональну конфігурацію і параметри системи захисту РК від електромагнітних завад.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в рейкових колах та тяговій мережі.

Предмет дослідження – функціональна безпека рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад від тягової мережі.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених у дисертації задач застосовано: для визначення складу та параметрів розподілу гармонійних завад від локомотиву з АТД та імовірнісних критеріїв виконання режимів роботи РК в умовах впливу електричних завад – методи цифрової обробки сигналів, перетворення Фур'є (ПФ), прикладної статистики; для розробки математичної моделі розподілу гармонійних завад в рейковій лінії двоколіїної дільниці залізниці - закони і методи електротехніки, теорію матриць, диференціальних рівнянь, численні методи для розробки математичної моделі розподілу електромагнітного поля навколо рейкової лінії - методи електродинаміки, теорії електричних кіл, диференціальних рівнянь, для розробки та наукового обґрунтування методу захисту РК від електромагнітних завад тягової мережі - електроніку, електротехніку, методи моделювання, для розробки математичної моделі електромагнітного впливу тягової мережі на РК на дільницях зближення колій з різним родом тягового струму при наявності екрануючого проводу та визначення раціональної конфігурації і параметрів системи захисту РК від електромагнітних завад – методи цифрової обробки сигналів, перетворення Фур'є, електротехніки, комп'ютерні програми математичного розв'язування рівнянь та моделювання, для експериментальних досліджень та доведення адекватності - теорію вимірювань і обробки результатів, прикладної статистики..

Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку існуючих та розробці нових науково обґрунтованих підходів, які дозволили вирішити науково-практичну задачу підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з тяговою мережею, а саме:

вперше:

- визначено параметри статистичного розподілу гармонійних завад тягового струму як нестационарного випадкового процесу, що дозволило запропонувати процедуру визначення ймовірнісних критеріїв функціональної безпеки рейкових кіл;
- розроблено математичну модель розподілу гармонійних завад в рейковій лінії двоколіїної дільниці залізниці з декількома локомотивами у фідерній зоні, яка враховує основні конструктивні та експлуатаційні параметри тягової

мережі та рейкових кіл, що дозволило визначити максимальні рівні завад в рейковій лінії в різних умовах роботи та визначити вплив електромагнітних завад на функціональну безпеку рейкових кіл;

- розроблено математичну модель розподілу електромагнітного поля навколо рейки при протіканні в ній гармонійних завад тягового струму, яка враховує реальну конфігурацію перетину рейки та нерівномірність розподілу щільності струму в ній внаслідок скін-ефекту, що дало можливість визначити вплив електромагнітних завад на функціональну безпеку автоматичної локомотивної сигналізації;
- розроблено математичну модель електромагнітного впливу тягової мережі на рейкові кола на ділянках зближення швидкісної магістралі з електротягою змінного струму з електрифікованою колією з тягою постійного струму при наявності екрануючого проводу, що дозволило науково обґрунтувати підвищення функціональної безпеки рейкових кіл і ефективності їх захисту від електромагнітних завад тягової мережі суміжної колії та запропонувати пристрій і визначити раціональну конфігурацію системи захисту РК;

отримало подальший розвиток:

- наукове обґрунтування методу визначення рівнів небезпечного та заважаючого впливу гармонійних завад на рейкові кола, який відрізняється від існуючих можливістю урахування основних конструктивних параметрів системи, а саме: кількості локомотивів, що одночасно рухаються у межах фідерної зони, схемою електроживлення контактної мережі;
- наукове обґрунтування засобів та методів захисту рейкових кіл від електромагнітних завад тягової мережі сусідньої колії, які відрізняються від існуючих наявністю регулюючого пристрою, що утворює в активному проводі струм з частотою, яка співпадає з частотою сигнального струму рейкового кола і амплітудою, що вибирається за критерієм максимального ослаблення струму завад в РК.

Практичне значення одержаних результатів визначається наступним:

- розроблено методику вимірювання завад в рейковому колі та визначення параметрів статистичного розподілу параметрів завад як нестационарного випадкового процесу;
- розроблено метод визначення розподілу гармонійних завад в РЛ і їх вплив на функціональну безпеку РК двоколіїної ділянки залізниці з декількома локомотивами у фідерній зоні, що враховує основні конструктивні та експлуатаційні параметри ТМ та РК;
- розроблено метод визначення рівнів небезпечного та заважаючого впливу гармонійних завад на РК в залежності від кількості локомотивів, їх режимів роботи, електричних параметрів РК та при збігу найбільш несприятливих умов для функціональної безпеки РК;
- розроблено систему захисту РК від електромагнітних завад тягової мережі сусідньої колії.

Результати роботи впроваджено на Придніпровській залізниці і використовуються при розробці методик випробування нових типів рухомого складу на електромагнітну сумісність з лініями залізничної автоматики, при переобладнанні залізниць для швидкісного руху нових типів електропоїздів, а також у навчальному процесі на кафедрі «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна.

Особистий внесок здобувача. Всі 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 належать наступне: створення математичної моделі, проведення моделювання, експериментальні дослідження та інтерпретація результатів [1–6], [8], та [1] [2], [4–9], [13], [16]; [17], [20] з додаткового списку, основні ідеї винаходів та їх обґрунтування [9] та [21], [22]. Роботи [7] з основного списку та [3], [10–12], [14], [15], [18] [19] з додаткового написані без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися і обговорювалися на: I-й міжнародній науково-практичній конференції «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (2007, м. Дніпропетровськ); на II, III-й міжнародних науково-практичних конференціях «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті» (2009, Місхор, 2010, м. Дніпропетровськ); на 65, 67, 69-й міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (2005, 2006, 2009, м. Дніпропетровськ); 70-й науковій конференції «Науково-технічний прогрес на залізничному транспорті» (2010, м. Дніпропетровськ), на II науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління» (2004, м. Київ, КУЕТТ), на 9 та 10-й міжнародних конференціях «Transport systems telematics» (2009, 2010, Katowice-Ustron, Poland).

В повному обсязі дисертація доповідалась і була схвалена на між кафедральному науковому семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 28 наукових працях, зокрема 8 – у наукових журналах і збірниках наукових праць, затверджених ВАК України за фахом 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту, 3 патенти на винахід, 5 додаткових статей, 15 – у матеріалах і тезах конференцій та симпозіумів.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаної літератури. Загальний обсяг дисертації складає 176 сторінок. Основний зміст викладено на 147 сторінках, який містить 51 рисунок та 8 таблиць. Список використаних джерел становить 190 найменувань на 21 сторінці.

Основний зміст роботи

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з Державними програмами і науково-дослідницькими роботами університету, сформульовано мету і основні задачі досліджень, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів та наведено відомості про апробацію і публікації результатів досліджень.

У першому розділі проведено аналіз літературних даних по дослідженням, з функціональної безпеки рейкових кіл, їх електромагнітної сумісності (ЕМС) з тяговою мережею.

Дослідженнями функціональної безпеки та електромагнітної сумісності рейкових кіл з тяговим електропостачанням займалися такі вчені як Аркатов В. С., Бабаєв М. М., Бадер М. П., Бородулін Б. М., Бочков К. А., Бочев А. С., Брилеєв А. М., Бурков А. Т., Бялонь А., Гавзов Д. В., Гаврилюк В. І., Герман Л. А., Даманський В. М., Добровольскис Т. П., Єрмоленко Д. В., Загарій Г. І., Корнієнко В. В., Костроминов А. М., Косарев Б. І., Косарев А. Б., Котельников А. В., Кравцов Ю. А., Кустов В. Ф., Лисенков В. М., Марквардт К. Г., Магай Г. С., Мамошин Р. Р., Мелліт Б., Мінін Г. А., Наумов А. В., Павлов І. В., Пупинін В. Н., Разгонов А. П., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Соболев Ю. В., Хілл Р. Д., Чернов Ю. А., Шалімов М. Г., Шаманов В. И., Шишляков А. В. та інші.

Електрифіковані залізниці зі швидкісним рухом є джерелом потужних електромагнітних завад, що впливають на функціональну безпеку систем залізничної автоматики та можуть привести до небезпечних або заважаючих відмов та збоїв в їх роботі. Наявність в Україні залізниць з різними родами тягового струму піднімає ще одну проблему при організації швидкісного руху. Необхідні при проїзді станції стикування різних систем електротяги технологічні операції по зміні локомотиву, займають значний час та потребують додаткових експлуатаційних витрат. В роботі запропоновано та науково обґрунтовано концепцію організації швидкісного руху по магістралях з різними системами електротяги. Запропонована концепція містить також технічні рішення по забезпеченню функціональної безпеки та електромагнітної сумісності РК на швидкісних магістралях. В такій постановці задача підвищення функціональної безпеки РК на швидкісних ділянках з різним родом тягового струму практично не досліджувалася. На підставі виконаного аналітичного огляду літератури сформульована мета та задачі досліджень.

У другому розділі досліджено питання функціональної безпеки РК в умовах електромагнітних завад тягового струму, розглянуто методику та засоби експериментальних досліджень ЕМЗ від електрорухомого складу з АТД та наведені результати експериментальних вимірювань і визначено параметри статистичного розподілу гармонійних завад тягового струму. Задача функціональної безпеки рейкових кіл в умовах електромагнітних завад тягового струму сформульована як задача визначення імовірнісних критеріїв, при яких гарантовано виконуються основні режими роботи рейкових кіл в умовах збігу найбільш не-

сприятливих для кожного режиму дестабілізуючих внутрішніх (параметричних) та зовнішніх факторів. В роботі запропоновано вдосконалену методику експериментальних досліджень впливу завад від електрорухомого складу на рейкові кола. Обробка результатів вимірювання провадилася за допомогою пакету MatLab.

В загальному випадку часова залежність тягового струму є нестационарною випадковою функцією часу. Реалізації слабо стаціонарних процесів $i_{Lk}(t)$ можна розглядати як суму детермінованого процесу $i_{Lk}^D(t)$, часова залежність струму в якому програмно задається системою управління рухом поїзду, та випадкового процесу $i_{Lk}^R(t)$.

$$i_{Lk}(t) = i_{Lk}^D(t) + i_{Lk}^R(t).$$

Випадкова складова $i_{Lk}^R(t)$ викликана впливом зовнішніх та внутрішніх факторів, до яких відносяться зміна профілю та стану колії, зміна сили тертя, погодних умов (вітру, температури), зміна напруги в живлячій мережі.

Проведений аналіз показав, що амплітуда випадкової складової має нормальний розподіл щільності ймовірностей і незалежне від часу нульове середнє значення. Випадкову складову тягового струму усували цифровою фільтрацією або оцінюванням середнього за окремими відрізками реалізації.

Довжину дискретної вибірки реалізації процесу та період його дискретизації вибирали виходячи з періоду змін струму, який обумовлений трендом внаслідок повільно діючих дестабілізуючих факторів та частотного інтервалу завад, що можуть викликати збої в роботі РК.

Статистичні параметри визначали за ансамблем реалізацій та у деяких випадках при недостатній кількості зареєстрованих фрагментів тягового струму, записаних в однакових умовах, – за відрізками вибіркової функції тягового струму, виміряними при незмінних параметрах руху локомотиву. Перевірку стаціонарності вибірових реалізацій проводили за першим та другим моментами випадкового процесу.

Перевірку гіпотези про однаковість дисперсій в різних перетинах випадкової функції проводили за критерієм Кокрена, гіпотезу про нормальний закон розподілу амплітуд гармонік перевіряли за критерієм χ^2 . Для вибірових функцій визначали коваріаційні функції та спектральну щільність тягового струму і визначали спектральний склад швидким перетворенням Фур'є (ШПФ).

Статистичні параметри та спектральний аналіз проводили за допомогою Statistic Toolbox і Signal Processing Toolbox (Matlab). На рис. 1 наведено часові залежності та спектральний склад тягового струму під час руху локомотиву при швидкості 65 км/год., які виміряні на локомотиві та в рейковій лінії на відстані 100 та 500 м від локомотиву.

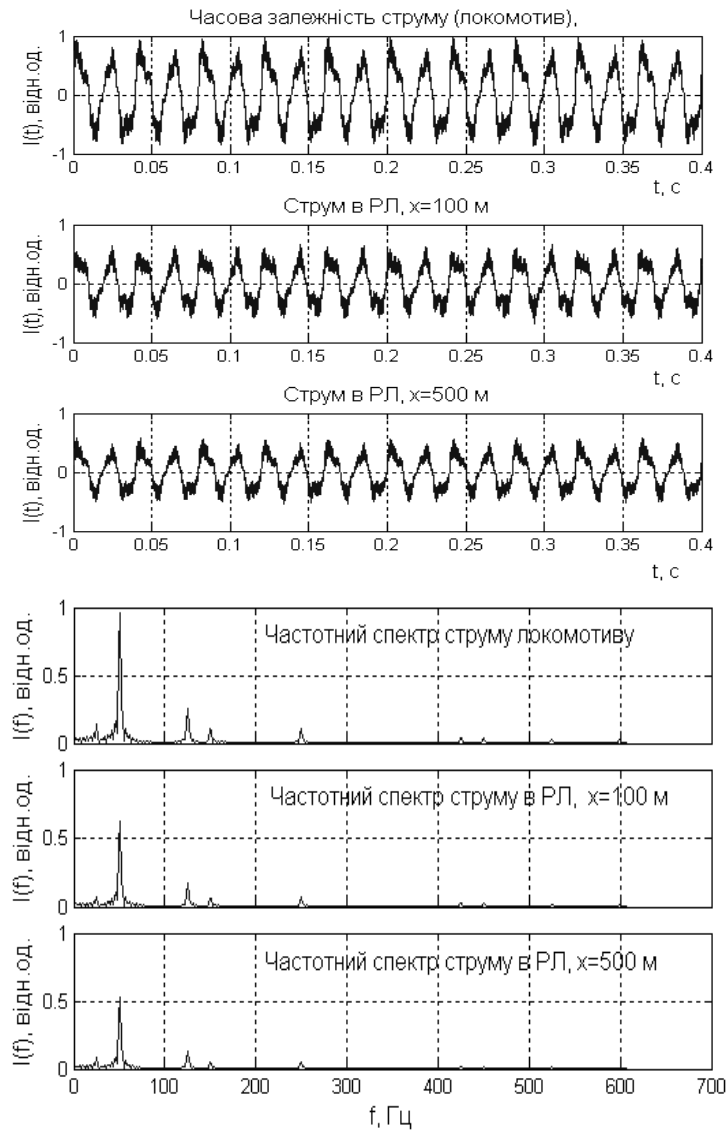


Рис. 1. Часові залежності та спектральний склад тягового струму локомотиву

В результаті статистичного аналізу запропоновано та перевірено гіпотези про закони розподілу щільності ймовірностей амплітуд гармонік тягового струму. Для майже стаціонарному процесу (стаціонарного в широкому значенні) гармоніки тягового струму з частотами, що відповідають частотам сигнального струму РК (25, 420, 480, 520, 729, 780 Гц) достатньо задовільно описувалися нормальним законом розподілу ймовірностей (рис. 2); для нестаціонарного процесу розподіл щільності ймовірностей гармонік тягового струму відповідав експоненціальному закону.

Визначено значення математичного очікування ефективного (діючого) струму гармонік і середнього квадратичного відхилення струму від його математичного очікування (табл. 1). Для гармонік в діапазоні частот 25 ± 6 Гц зареєстровано повторно-короткочасні (тривалістю < 1 с) перевищення значення діючого струму 1 А, що є небезпечним для роботи РК з сигнальним струмом 25 Гц.

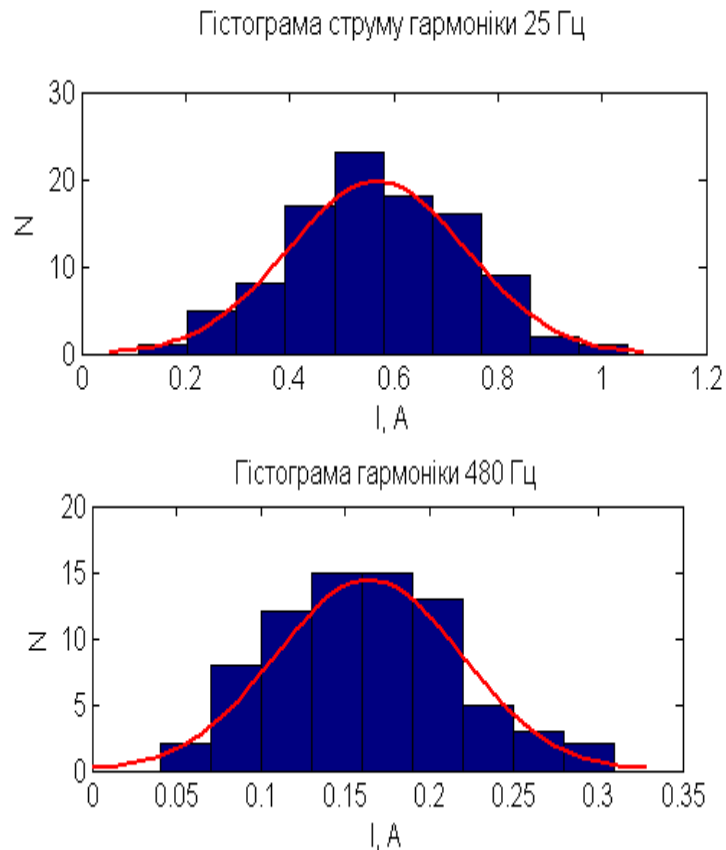


Рис. 2. Приклади гістограм розподілу щільності ймовірностей амплітуд гармонік тягового струму для двох частот.

Таблиця 1

Значення математичне очікування ефективного струму гармонік і середнього квадратичного відхилення

Частота, Гц	25±6	420±6	480±6	520±6	720±6	780±6
μ_{IH}, A	0.568	0.202	0.164	0.021	0.017	0.015
σ_{Ih}, A	0.17	0.071	0.055	0.006	0.004	0.003

В нестационарних процесах діючий струм завод з частотою 25 ± 2 Гц в окремі проміжки часу (тривалістю $\sim 1,6$ с) підвищувався до 1,05 А, що може привести до небезпечного збою в роботі РК.

Параметри РК як і параметри електромагнітних завод є випадковими величинами, що обумовлює ймовірнісний характер виникнення збою або відмови в роботі РК внаслідок дії електромагнітних завод.

На рис. 3 наведено гістограми розподілу напруги спрацьовування та відпускання колійного приймача тонального рейкового кола (ТРК) та функцію щільності розподілу ймовірностей завод в РЛ виміряних при нестационарному процесі ведення локомотиву.

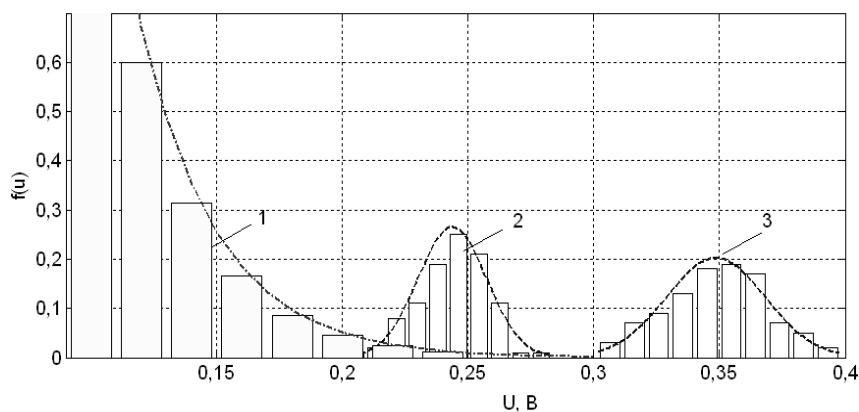


Рис. 3. Графік функції розподілу щільності ймовірностей завад в РЛ (1) та гістограми розподілу напруги відпускання (2) і спрацьовування (3) колійного приймача тонального рейкового кола (ТРК)

Проведений ймовірністний аналіз впливу кондуктивних завад на колійний приймач РК показує, що існує кінцева ймовірність, що умови виконання основних режимів роботи РК під дією електромагнітних завад від електрорухомого складу з АТП не виконуються, що безпосередньо впливає на функціональну безпеку РК. В роботі отримано математичні вирази, за якими можна визначити ймовірність збою в роботі РК під дією електромагнітних завад для конкретних параметрів статистичного розподілу напруги завад на вході приймача. Ймовірність збою в роботі РК в нормальному (P_{3H}) та контрольному (P_{3K}) режимах дорівнює

$$\begin{aligned}
 P_{3H} &= P\{[U_C \in (U_C, U_C + dU_C)] \cap [U_{ПН} < U_C]\} = \\
 &= \int_0^{\infty} f(U_C) \left[\int_0^{U_C} f(U_{ПН}) dU_{ПН} \right] dU_C, \\
 P_{3K} &= P\{[U_B \in (U_B, U_B + dU_B)] \cap [U_{ПК} > U_B]\} = \\
 &= \int_0^{\infty} f(U_B) \left[\int_{U_B}^{\infty} f(U_{ПШ}) dU_{ПШ} \right] dU_B.
 \end{aligned}$$

У **третьому розділі** розроблено комплексну математичну модель розподілу гармонійних завад в РЛ двоколійної ділянки залізниці з декількома локомотивами у фідерній зоні, яка враховує основні конструктивні та експлуатаційні параметри ТМ та РК, що дозволило визначити максимальні рівні завад в РЛ двоколійної ділянки залізниці в залежності від кількості локомотивів на ділянці, їх режимів роботи, електричних параметрів РК з урахуванням можливого збігу найбільш несприятливих умов для функціональної безпеки рейкових кіл.

Для багатопровідної схеми складено систему диференціальних рівнянь у матричній формі

$$\frac{d\bar{\dot{\mathcal{U}}}}{dx} = \underline{\mathcal{Z}} \bar{\dot{\mathcal{J}}},$$

$$\frac{d\bar{\dot{\mathcal{J}}}}{dx} = \underline{\mathcal{Y}} \bar{\dot{\mathcal{U}}},$$

де $\bar{\dot{\mathcal{U}}} = \{\dot{U}_j\}$, $\bar{\dot{\mathcal{J}}} = \{\dot{I}_j\}$ - вектори комплексних напруг та струмів в лініях, $\underline{\mathcal{Z}} = \{\underline{Z}_{ij}\}$ - матриця комплексів поздовжніх опорів ліній (на одиницю довжини) ($i = j$), $\underline{\mathcal{Y}} = \{\underline{Y}_{ij}\}$ - матриця комплексів поперечних провідностей між лініями (на одиницю довжини) ($i, j = 1 \dots 6$), де Y_{ii} в загальному вигляді визначається за формулою

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{Y}_{i0} + \sum_{i=1}^6 \underline{Y}_{ij}.$$

Граничні умови залежать від конкретного типу електроживлення тягової мережі (консольна або двобічна) та кількості локомотивів в межах фідерної зони. Для однобічного живлення тягової мережі з одним локомотивом у фідерній зоні та одним локомотивом на першій колії з координатою x_{E1} граничні умови мають такий вигляд. Для $x = 0$

$$U_3(x=0) = U_{ТП11}, \quad U_6(x=0) = U_{ТП21},$$

$$U_1(x=0) = U_2(x=0) = U_4(x=0) = U_5(x=0) = 0.$$

Для $x = x_{E1}$ граничне рівняння задає значення струму гармонічної завади частотою $f = f_n$, що генерується локомотивом і втікає в точці знаходження локомотиву ($x = x_{E1}$) в РЛ $I_E(f = f_n, x = x_{E1}) = I_{E1}$.

При двобічному живленні тягової мережі, до граничних умов необхідно додавати аналогічні рівняння для другої підстанції з координатою $x = d_1$

Розділяючи змінні в (1), (2), одержуємо систему диференціальних рівнянь другого порядку.

$$\frac{d^2 \bar{\dot{\mathcal{U}}}}{dx^2} = \underline{\mathcal{Z}} \underline{\mathcal{Y}} \bar{\dot{\mathcal{U}}}, \quad \frac{d^2 \bar{\dot{\mathcal{J}}}}{dx^2} = \underline{\mathcal{Y}} \underline{\mathcal{Z}} \bar{\dot{\mathcal{J}}}.$$

Рішення системи запишемо у вигляді

$$\bar{\dot{\mathcal{U}}} = \exp(-\sqrt{\underline{\mathcal{Z}} \underline{\mathcal{Y}}} x) \bar{\dot{\mathcal{U}}}_a + \exp(-\sqrt{\underline{\mathcal{Z}} \underline{\mathcal{Y}}} x) \bar{\dot{\mathcal{U}}}_b,$$

$$\bar{\dot{\mathcal{J}}} = \underline{\mathcal{Z}}^{-1} \sqrt{\underline{\mathcal{Z}} \underline{\mathcal{Y}}} \left[\exp(-\sqrt{\underline{\mathcal{Z}} \underline{\mathcal{Y}}} x) \bar{\dot{\mathcal{U}}}_a - \exp(-\sqrt{\underline{\mathcal{Z}} \underline{\mathcal{Y}}} x) \bar{\dot{\mathcal{U}}}_b \right] m,$$

де $\bar{\dot{\mathcal{U}}}_a$, $\bar{\dot{\mathcal{U}}}_b$ - відповідно, вектори падаючої та відбитої хвилі напруги

$$\begin{aligned}\bar{\dot{\mathcal{U}}}_a &= \frac{\bar{\dot{\mathcal{U}}}_1 + \underline{\mathcal{Z}}_C \bar{\dot{\mathcal{J}}}_1}{2}, \\ \bar{\dot{\mathcal{U}}}_b &= \frac{\bar{\dot{\mathcal{U}}}_1 - \underline{\mathcal{Z}}_C \bar{\dot{\mathcal{J}}}_1}{2},\end{aligned}$$

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

З цих рівнянь отримаємо формули для напруг і струмів у довільній точці системи

$$\begin{bmatrix} \bar{\dot{\mathcal{U}}}_l \\ \bar{\dot{\mathcal{J}}}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\underline{\Gamma} l) & -sh(\underline{\Gamma} l) \underline{\mathcal{Z}}_C \\ \underline{\mathcal{Y}}_C sh(\underline{\Gamma} l) & -\underline{\mathcal{Y}}_C ch(\underline{\Gamma} l) \underline{\mathcal{Z}}_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\dot{\mathcal{U}}}_1 \\ \bar{\dot{\mathcal{J}}}_1 \end{bmatrix}.$$

Для системи з декількома локомотивами розподіл тягового струму в контактній мережі від локомотивів знаходили методом вузлових потенціалів

$$\dot{\Phi}_{KM} = (\underline{\mathcal{Y}}_{KM})^{-1} \cdot \underline{\mathcal{J}}.$$

$$\dot{I}_{mn} = (\dot{\Phi}_{KM_m} - \dot{\Phi}_{KM_n}) \underline{\mathcal{Y}}_{KM_{mn}}.$$

Для проведення моделювання розповсюдження електричних завад різної частоти необхідно задати частотні залежності імпедансів і адмітансів системи провідників, що проходять над поверхнею землі. Для цього були проведені експериментальні дослідження і теоретичні розрахунки і за критерієм мінімальної похибки у діапазоні частот до 10^4 Гц для частотної залежності імпедансу рейкової лінії і контактного проводу обрано формули Вайса–Занде, розрахунки за якими дозволили забезпечити необхідну точність та адекватність побудованої моделі.

В результаті моделювання отримано розподіл основних гармонік тягового струму з частотами близькими до частот сигнального струму при наявності 1...5-ти локомотивів в фідерній зоні. При протіканні струму завад по рейках від локомотиву в бік тягової підстанції значення завад зменшувалося при віддаленні від локомотиву і збільшувалося при наближенні до відсмоктуючого фіде-ру тягової підстанції. Характер змін завад в рейках залежав від частоти завад і провідності між рейками та землею. Так для частоти завади 25 Гц при $\sigma_g = 10^{-3}$ См/м значний кондуктивний струми завад спостерігався на відстані декількох кілометрів від локомотиву та від тягової підстанції. Для одного локомотиву з АТД в фідерній зоні струм гармоніки частотою 25 Гц не перевищував значення 1 А навіть при найбільш несприятливих умовах, але вже для двох локомотивів

кондуктивний струм завади частотою 25 Гц при $\sigma_g = 10^{-3}$ См/м та на відстані ≤ 1 км від локомотиву мав значення 1.07 А, а при п'яти локомотивах – понад 1.23 А, що за впливом на роботу рейкових кіл є небезпечним струмом (рис. 4).

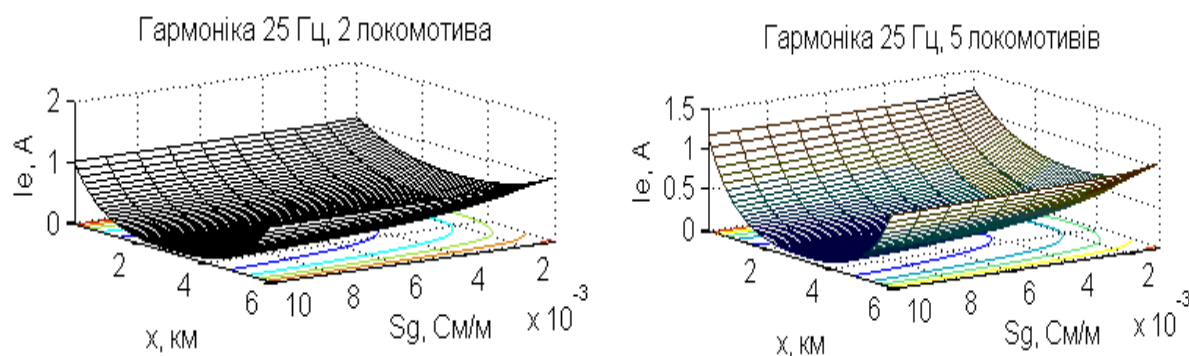


Рис. 4. Залежність струму завади з $f = 25$ Гц від відстані x і питомої провідності землі σ_g

Перевищення граничного за умов функціональної безпеки струму завад в РЛ попереду локомотиву та поблизу тягової підстанції, що спостерігається при збільшенні кількості локомотивів в межах фідерної зони для всіх частот тонального діапазону (420, 480, 520, 720, 780 Гц). Струм завади частотою 420 Гц поблизу підключення відсмоктуючого фідера ТП дорівнював при найбільш несприятливих зовнішніх факторах 0.61 А для двох локомотивів і 0.7 А – для п'яти локомотивів. На відстані 1 км перед локомотивом, що рухається в бік тягової підстанції, перевищення граничного струму завад за умовами безпечної роботи РК для всіх основних частот сигнального струму не спостерігалось, навіть при збігу найбільш несприятливих факторів (п'ять локомотивів, низька питома провідність землі $< 10^{-3}$ См/м) у випадку стаціонарних режимів роботи тягових перетворювачів локомотивів. При консольному живленні тягової мережі значення струмів завад для всіх частот помітно збільшувалися у порівнянні з двобічним живленням тягової мережі (табл. 2). Граничні значення коефіцієнту гармонік тягового струму для всіх основних частот наведено в табл. 3.

Таблиця 2

Струм гармонік на відстані 0.5 км від локомотиву

Струм гармонік в РЛ при двобічному живленні (у відносних одиницях)						
Кількість локомотивів	Частота, Гц					
	25	420	480	520	720	780
1	0.3528	0.2667	0.2582	0.2456	0.2304	0.2247
2	0.442	0.3405	0.3297	0.3136	0.2943	0.2869
3	0.4849	0.3748	0.3629	0.3452	0.324	0.3159
4	0.5019	0.3884	0.3761	0.3578	0.3357	0.3273
5	0.5055	0.3913	0.3788	0.3604	0.3382	0.3297

Струм гармонік в РЛ при однобічному живленні (у відносних одиницях)						
Кількість локомотивів	Частота, Гц					
	25	420	480	520	720	780
1	0.3606	0.2745	0.2658	0.2528	0.2372	0.2313
2	0.4996	0.3881	0.3758	0.3575	0.3355	0.3271
3	0.6093	0.4753	0.4602	0.4378	0.4108	0.4006
4	0.7021	0.5487	0.5313	0.5055	0.4744	0.4625
5	0.7839	0.6135	0.594	0.5651	0.5304	0.5171

Таблиця 3

Граничні значення коефіцієнту гармонік тягового струму локомотивів K_H ,
при яких може виникнути збій в роботі РК

Коефіцієнт гармонік	Частота, Гц					
	25	420	480	520	720	780
$K_H, \%$	1.063	0.475	0.491	0.516	0.55	0.564

У четвертому розділі досліджено індукційний вплив електромагнітних завад на РК від тягової мережі сусідньої колії. Вирішення цієї задачі має практичне значення для забезпечення функціональної безпеки РК на дільницях наближення і паралельного проходження швидкісної магістралі з електротягою змінного струму і колії з тягою постійного струму.

Для оцінки впливу електромагнітного поля РЛ на пристрої СЦБ у близькому оточенні рейки розроблено математичну модель розподілу електромагнітного поля навколо рейки, що враховує реальну конфігурацію перетину рейки, а також нерівномірність розподілу щільності струму по її перетину внаслідок поверхневого ефекту. Еквівалентну електричну схему рейки представили умовно у вигляді 120 паралельних провідників, загальний обрис яких наближається за формою до перетину рейки типу Р65. Для всіх паралельно з'єднаних провідників записані рівняння у матричному вигляді

$$\bar{\mathcal{U}}_a = \mathcal{R} \bar{\mathcal{I}} + j\omega \mathcal{L} = \underline{\mathcal{Z}} \bar{\mathcal{I}},$$

$$\mathcal{R} = \begin{vmatrix} R_{11} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & R_{22} & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & R_{nn} \end{vmatrix}, \quad \mathcal{L} = [L_{ik}], \quad i, k = 1..n,$$

де $\underline{\mathcal{Z}} = [Z_{ik}]$, $i, k = 1..n$, ($Z_{ik} = R + j\omega L_{ik}$) – квадратні матриці, відповідно, активного опору, індуктивності, імпедансу провідників, $\bar{\mathcal{U}}_a$, $\bar{\mathcal{I}}$ – вектори комплексної напруги і струму. Загальний струм в рейці дорівнює струму окремих провідників

$$I_r = \sum_{i=1}^n I_i$$

Напруженість магнітного поля в точці Q , відповідно до законів електромагнітної індукції, дорівнює ротору векторного потенціалу магнітного поля, представленого у вигляді інтеграла від щільності струму по об'єму V рейки

$$\bar{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \text{rot} \int_V \frac{\bar{\delta}(M)}{r_{QM}} dV_M = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{[\bar{\delta}(M), \bar{r}_{QM}]}{r_{QM}^3} dM,$$

де M - точка центра елементарного провідника із площею dS_M у рейці, $\bar{\delta}(M)$ - вектор щільності струму, $\bar{r}_{QM}$ - вектор, проведений із точки Q в точку M . Після декількох перетворень з урахуванням граничних умов отримано формули для напруженості магнітного поля в точці Q

$$H_x(Q) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M) \cos(\alpha)}{\sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2}} dS = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M)(x_Q - x_M)}{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2} dS,$$

$$H_y(Q) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M) \sin(\alpha)}{\sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2}} dS = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M)(y_Q - y_M)}{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2} dS$$

Електрорушійна сила в котушці із центром у точці Q , що наводиться при протіканні електричного струму в рейці визначали по формулі

$$E(Q) = -\frac{d\Phi(Q)}{dt} = -\mu\mu_0 \frac{S_k}{dt} \frac{d \int [\bar{H}(Q), d\bar{S}_k]}{dt},$$

у якій інтегрування робили по площі котушки із центром у точці Q . Адекватність розробленої моделі підтверджено задовільним збігом розрахованого розподілу електромагнітного поля навколо рейки та е.р.с. в котушці локомотивної сигналізації з результатами експериментальних досліджень. Розбіжність між експериментально виміряними й розрахованими результатами не перевищувала 5 %.

Для зменшення індуктивного впливу завад на РК колії з електротягою постійного струму від тягової мережі сусідньої колії змінного струму запропоновано метод та засіб на основі регулюючого пристрою (РЕ), який утворює в активному екрануючому проводі (ЕП) компенсуючий струм, що співпадає за частотою з сигнальним струмом колії, амплітуда якого вибирається за умови максимальної компенсації завад в РК. Схеми пристрою наведені на рис. 5.

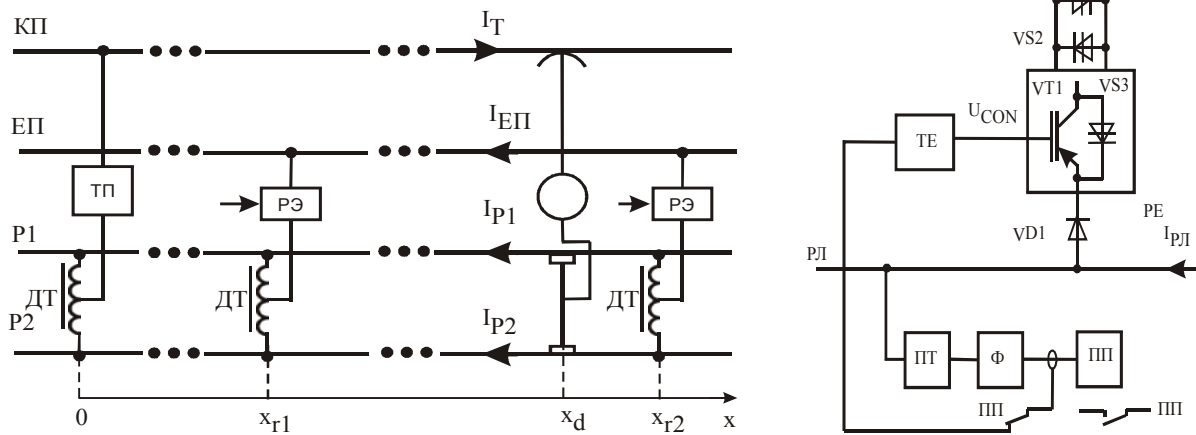


Рис. 5. Схеми пристрою для компенсації завад в РК (РЕ - регулюючий пристрій, ПТ - колійний трансформатор, Ф – фільтр, ПП - колійний приймач, ТЕ - регулюючий елемент).

В результаті проведеного моделювання системи визначено вплив геометричних факторів системи на коефіцієнт екрануючої дії активного екрануючого проводу. Коефіцієнт ослаблення струму завад K_{OS} при застосуванні АЕП зменшувався при збільшенні відстані між коліями, але при цьому значно зменшувався струм завад, внаслідок чого відносний вплив ефекту екранування зменшувався. Коефіцієнт ослаблення K_{OS} незначно зменшувався при підвищенні провідності землі, що можна пояснити екрануванням поверхнею землі наведеного в рейках струму, на фоні чого відносний вплив ефекту екранування екрануючим проводом також зменшувався. При збільшенні ширини зближення колій $y_k > 10...12$ м, значення висоти підвісу АЕП h_e , при якому коефіцієнт K_{OS} приймає максимальне значення, незначно збільшувалося, але в цілому вплив висоти підвісу ЕП на коефіцієнт K_{OS} стає меншим зі збільшенням ширини зближення колій (рис. 7). Визначено раціональну за критерієм максимального ослаблення впливу завад на РК висота підвісу екрануючого проводу над землею, що складає ~ 5 м. При такій висоті спостерігалось ефективне ослаблення впливу завад як при паралельному проходженні так і при косому зближенні колій з $y_k \approx 8...10$ м при незначному впливі провідності землі.

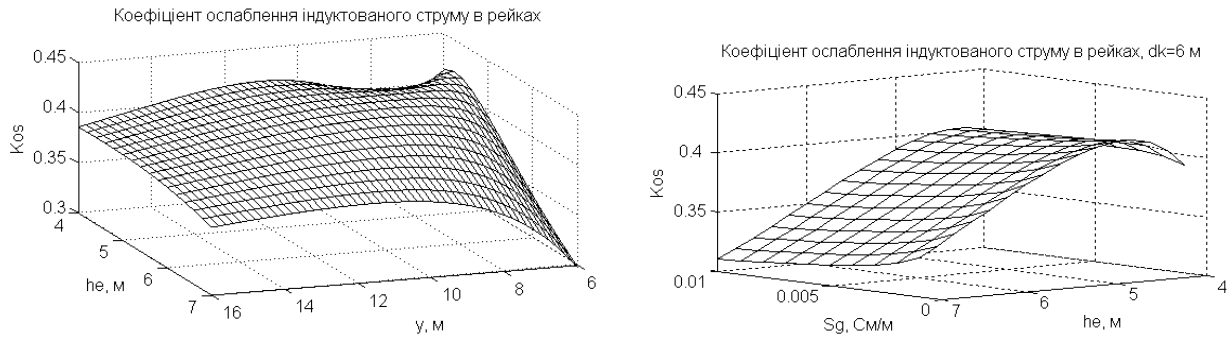


Рис. 7. Залежність коефіцієнту K_{OS} від параметрів системи

В роботі проаналізовано ефективність запропонованого методу підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з тяговою мережею і наведена оцінка його економічної ефективності.

Висновки

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішене науково-практичне завдання підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з тяговою мережею.

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень полягають у наступному.

1. Вдосконалено методику експериментальних досліджень впливу завад від електрорухомого складу на РК, при якій одночасним вимірюється завади тягового струму на локомотиві та в рейковій лінії, що дозволяє провести статистичний аналіз завад та визначити взаємні кореляційні функції між ними.
2. Визначено, що амплітуди завад тягового струму з частотами 25, 420, 480, 520, 729, 780 Гц для майже стаціонарних процесів відповідають нормальному закону розподілу, а для нестаціонарних процесів - експоненціальному.
3. Визначено параметри розподілу гармонік для всіх основних частот, що використовуються в РК; для частот 25 ± 6 Гц статистичні параметри розподілу гармонійних завад в майже стаціонарному режимі мали значення: $\mu_{IH} = 0.568$ А, $\sigma_{IH} = 0.17$ А, при яких спостерігалися повторно-короткочасні (тривалістю до 1 с) перевищення струму 1 А, що є небезпечним для роботи РК з частотою сигнального струму 25 Гц.
4. В нестаціонарних процесах діючий струм завад з частотою 25 ± 2 Гц в окремі проміжки часу (тривалістю до $\sim 1,6$ с) підвищувався до 1,05 А, що є небезпечним для роботи РК.
5. Визначено характер розподілу гармонійних завад в РЛ двоколіїної ділянки залізниці з декількома локомотивами у фідерній зоні, яка враховує

основні конструктивні та експлуатаційні параметри ТМ та РК. Визначено, що відстань розповсюдження в РЛ завод з частотою 25 Гц від локомотиву в бік тягової підстанції та в зоні підключення відсмоктуючого фідера збільшувалася при зменшенні питомої провідності землі та провідності «рейка-земля» і при $\sigma_g \leq 10^{-3}$ См/м досягала декількох кілометрів.

6. Для одного локомотиву з АТД струм гармоніки частотою 25 Гц не перевищував значення 1 А навіть у найбільш несприятливих умовах, але вже для двох локомотивів струм гармоніки 25 Гц в рейковій лінії від локомотиву в бік тягової підстанції при $\sigma_g \leq 10^{-3}$ См/м мав значення 1.07 А, а при п'яти досягав 1.23 А, що є небезпечним для роботи РК.
7. Перевищення граничного рівня завод в РК перед локомотивом та поблизу підключення відсмоктуючого фідера тягової підстанції при збільшенні кількості локомотивів в межах фідерної зони спостерігалось для всіх частот тонального діапазону (420, 480, 520, 720, 780 Гц). Так струм гармоніки 420 Гц поблизу фідера дорівнював 0.612 А для двох локомотивів і 0.703 А – для п'яти локомотивів, що є небезпечним для роботи РК.
8. Визначено характер розподілу електромагнітного поля навколо рейкової лінії при протіканні в ній гармонійних завод тягового струму, що дало можливість визначити вплив електромагнітних завод на функціональну безпеку пристроїв СЦБ, зокрема АЛСН.
9. Запропоновано метод та засіб зменшення індуктивного впливу тягової мережі на рейкові кола суміжної колії, що включає регулюючий пристрій, який утворює в активному екрануючому проводі (АЕП) компенсуючий струм заданого гармонійного складу.
10. Визначено раціональну за критерієм максимального ослаблення впливу завод на РК висота підвісу активного екрануючого проводу над землею, що складає ~ 5 м; ефективне ослаблення впливу завод для такої висоти підвісу АЕП досягається як при паралельному так і при косому зближенні колій з шириною зближення до 8...10 м.

Список основних праць

1. Завгородний А. В. Моделирование электромагнитных процессов в системе тягового электроснабжения / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Вісник ДНУЗТу ім. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 6. – С. 11-15.
2. Завгородний А. В. Математическое моделирование распределения электромагнитного поля вблизи рельсовой нити / Д. Б. Астраханцев, В. И. Гаврилюк, А. В. Завгородний // Вісник ДНУЗТу ім. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – С. 7-10.
3. Завгородній О. В. Аналіз впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл / В. И. Гаврилюк, А. В. Завгородній // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 2. – С. 37-39.

4. Завгородній О. В. Електромагнітний вплив тягових мереж на рейкові кола. Ч. 1. Моделювання тягового струму в рейковій лінії / В. І. Гаврилюк, О. В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – № 4. – С. 53-57.

5. Завгородний А. В. Измерение электромагнитных помех в обратной тяговой сети / Т. Н. Сердюк, А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Вісник ДНУЗТу ім. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – С. 134-139.

6. Завгородний А. В. Модель распределения гармоник тягового тока в рельсовой линии / В. И. Гаврилюк, А. В. Завгородний // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4. – С. 40-43.

7. Завгородний А. В. Сравнительный анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог / А. В. Завгородний // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 2. – С. 49-53.

8. Завгородній О. В. Ймовірнісна модель впливу тягового струму на рейкові кола // В. І. Гаврилюк, А. В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 73-76.

9. Пат.56336 Україна, МПК (2010) B61L 23/00, B61L 29/00. Спосіб зменшення електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму на рейкові кола суміжної колії / Завгородній О. В., Гаврилюк В. І., Миргородська А. І., Щека В. І.: патентовласник Дніпропетровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2010 07796; заявл. 21.06.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

Список додаткових праць

1. Завгородний А. В. Методические аспекты определения уровней опасного и мешающего влияния подвижного состава на работу рельсовых цепей / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Вісник ДНУЗТу ім. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – С. 11-14.

2. Завгородній О. В. Забезпечення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад від тягової мережі сусідньої колії на дільницях зі швидкісним рухом поїздів / О. В. Завгородній, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – С. 11-15.

3. Завгородний А. В. Расчет импеданса линий электрифицированных железных дорог / А. В. Завгородний // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – С. 96-101.

4. Zavgorodnyj A.V. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonics / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnyj, A. Myrgorodska // Archives of transport system telematics. – 2009. – Vol. 2. – № 1. – P. 33-37.

5. Zavgorodnyj A. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits / A. Zavgorodnyj, V. Gavriljuk // Archives of transport system telematics. – 2010. – Vol. 4, № 1. – P. 14-18.

6. Завгородний А. В. Особенности электромагнитного влияния скоростных поездов на рельсовой цепи / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: II науково-практич. конф., 29 лист.-1 грудня 2004 р.: тези доп. – Ч. 1: Техніка і технологія. – К.: КУЕТТ, 2004. – С. 203-205.

7. Завгородний А. В. Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитного поля вблизи рельсовой нити / Д. Б. Астраханцев, А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 65 міжнар. науково-практич. конф., 19-20 травня 2005 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2005. – С. 321-322.

8. Завгородній О. В. Динаміка екологічних показників на Придніпровській залізниці / О.В. Завгородній, Я.Я Куриленко., Н.О.Янкін та ін. // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: праці 65 міжнар. науково-практич. конф., 19-20 травня 2005 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2005. – С. 211.

9. Завгородний А. В. Математическая модель электромагнитного влияния системы тягового электроснабжения на рельсовые цепи на участках со скоростным движением поездов / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк, С. В. Мямлин // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 65 міжнар. науково-практич. конф., 19-20 травня 2005 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2005. – С. 288.

10. Завгородній О. В. Проблеми впровадження швидкісного руху на Придніпровській залізниці // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 65 міжнар. науково-практич. конф., 19-20 травня 2005 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2005. – С. 292.

11. Завгородній О.В. Забезпечення електромагнітної сумісності на швидкісних залізничних магістралях // Электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте (ЕМС-Р): I Междунар. научно-практич. конф., 24-25 мая 2007 г.: тезисы докл. - Д.: ДНУЖТ, 2007. – С. 25-26.

12. Завгородний А.В. Моделирование распределения электромагнитного поля тягового тока вокруг рельсовой линии // Электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте (ЕМС-Р): I Междунар. научно-практич. конф., 24-25 мая 2007 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2007. – С. 26-27.

13. Завгородний А. В. Определения уровней опасного и мешающего влияния тягового тока на работу рельсовых цепей / В.И. Гаврилюк, А.В. Завгородний // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 69 міжнар. науково-практич. конф., 21-22 травня 2009 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2009. – С. 112-113.

14. Zavgorodnij A. V. The modeling of electromagnetic interference of traction electro supply system on railway circuits // Электромагнитная совместимость и

безопасность на железнодорожном транспорте: II Междунар. научно-практич. конф., Мисхор, 03-05 июня 2009 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2009. – С.27-28.

15. Zavgorodnij A. V. The computer model of automatic locomotive signals system // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте: II Междунар. научно-практич. конф., Мисхор, 03-05 июня 2009 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2009. – С. 28-29.

16. Zavgorodnij A. V. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonics / V. Gavriljuk, A. Zavgorodnij, A. Myrgorodska // Transport systems telematics TST'09: Abstr. 9th Intern. Conf., Katowice-Ustron, Poland, 4-7 nov. 2009.– Katowice-Ustron, 2009. – P. 32.

17. Завгородний А. В. Аналитический обзор методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог с учетом влияния земли / В. И. Гаврилюк, А. В. Завгородний // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте: III Междунар. научно-практич. конф., 15-16 апреля 2010 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2010. – С.15-16.

18. Завгородній О. В. Методика визначення граничного рівня завад від тягового електропостачання у рейковому колі // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте: III Междунар. научно-практич. конф., 15-16 апреля 2010 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2010. – С. 21-23.

19. Завгородний А. В. Моделирование распределения электромагнитного поля вблизи рельсовой нити // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте: III Междунар. научно-практич. конф., 15-16 апреля 2010 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2010. – С.23-24.

20. Zavgorodnyj A. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits / A. Zavgorodnyj, V. Gavriljuk // Transport systems telematics TST'10: Abstr. 10th Intern. Conf., Katowice-Ustron, Poland, 2010. – Katowice-Ustron, Poland, 2010. – P. 33.

21. Пат. 50925 Україна, МПК (2009) B61L 25/00. Спосіб автоматизованого виявлення дефектів тональних рейкових кіл / В. І. Гаврилюк, О. В. Завгородній, Т. М. Сердюк; патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u200913949; заявл. 30.12.2009; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.

22. Пат. 51856 Україна, МПК (2009) B61L 25/00. Спосіб визначення параметрів рейкової лінії / Р. В. Рибалка, В. І. Гаврилюк, О. В. Завгородній; патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2009 12587; заявл. 04.12.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.

Анотація

Завгородній О.В. Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з тяговою мережею – 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, 2011.

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішене науково-практичне завдання підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з тяговою мережею, що дозволило підвищити безпеку руху поїздів на швидкісних магістралях.

Вперше визначено параметри статистичного розподілу гармонійних завад тягового струму як нестационарного випадкового процесу, розроблено математичні моделі розподілу завад в РЛ, розподілу електромагнітного поля навколо рейки, математичну модель електромагнітного впливу тягової мережі на рейкові кола на ділянках зближення швидкісної магістралі з електротягою змінного струму з електрифікованою колією з тягою постійного струму при наявності екрануючого проводу.

Результати роботи впроваджено на Придніпровській залізниці і використовуються при розробці методик випробування нових типів рухомого складу на електромагнітну сумісність з лініями залізничної автоматики, при переобладнанні залізниць для швидкісного руху нових типів електропоїздів, а також у навчальному процесі на кафедрі «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна.

Ключові слова: функціональна безпека, рейкові кола, електромагнітна сумісність.

Аннотация

Завгородний А. В. Повышение функциональной безопасности рельсовых цепей путем обеспечения их электромагнитной совместимости с тяговой сетью. – 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, 2011.

В диссертационной работе на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена научно-практическая задача повышения функциональной безопасности рельсовых цепей путем обеспечения их электромагнитной совместимости с тяговой сетью, что позволило повысить функциональную безопасность рельсовых цепей и в целом устройств железнодорожной автоматики на скоростных магистралях.

Рельсовые цепи функционируют в условиях мощных электромагнитных помех, механических нагрузок, загрязнения балласта, влияния погодных усло-

вий и других дестабилизирующих факторов. Помехи тягового тока могут вызвать опасный или мешающий сбой в их работе. Особенно это касается участков с ускоренным и скоростным движением поездов.

Таким образом, повышение функциональной безопасности РЦ путем обеспечения их электромагнитной совместимости с тяговой сетью является актуальной научно-практической задачей.

Целью диссертационной работы является повышения функциональной безопасности рельсовых цепей путем обеспечения их электромагнитной совместимости с тяговой сетью.

Научная новизна результатов состоит в дальнейшем развитии существующих и разработке новых научно обоснованных подходов, которые позволили решить научно-практическую задачу повышения функциональной безопасности рельсовых цепей, а именно:

впервые:

- определены параметры статистического распределения гармонических помех тягового тока как нестационарного случайного процесса, что позволило предложить процедуру определения вероятностных критериев функциональной безопасности рельсовых цепей;
- разработана математическая модель распределения гармонических помех в рельсовой линии двухпутного участка железной дороги с несколькими локомотивами в фидерной зоне, которая учитывает основные конструктивные и эксплуатационные параметры тяговой сети и рельсовых цепей, что позволило определить максимальные уровни помех в рельсовой линии в разных условиях работы и влияние электромагнитных помех на функциональную безопасность рельсовых цепей;
- разработана математическая модель распределения электромагнитного поля вокруг рельса при протекании в ней гармонических помех тягового тока, которая учитывает реальную конфигурацию сечения рельса и неравномерность распределения плотности тока в ней вследствие скин-эффекта, что позволило определить влияние электромагнитных помех на функциональную безопасность автоматической локомотивной сигнализации;
- разработана математическая модель электромагнитного влияния тяговой сети на рельсовые цепи на участках сближения скоростной магистрали с электротягой переменного тока с электрифицированной колеей с тягой постоянного тока при наличии экранирующего провода, что позволило научно обосновать повышение функциональной безопасности рельсовых цепей и эффективность их защиты от электромагнитных помех тяговой сети смежной колеи, предложить устройство и определить рациональную конфигурацию системы защиты РЦ.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований состоят в следующем.

Усовершенствована методика экспериментальных исследований влияния помех от электроподвижного состава на РЦ, при которой одновременно

измеряются помехи тягового тока на локомотиве и в рельсовой линии, что позволило провести статистический анализ помех и определить взаимные корреляционные функции между ними.

Найдено, что амплитуды помех тягового тока с частотами 25, 420, 480, 520, 729, 780 Гц для почти стационарных процессов отвечают нормальному закону распределения, а для нестационарных процессов экспоненциальному.

Определены параметры распределения гармоник для всех основных частот, которые используются в РЦ. В нестационарных процессах действующий ток помех с частотами 25 ± 2 Гц в отдельные промежутки времени (продолжительностью $\sim 1,6$ с) повышался до 1,05 А.

Определен характер распределения гармонических помех в РЛ двухпутного участка железной дороги с несколькими локомотивами в фидерной зоне.

Определен характер распределения электромагнитного поля вокруг рельсовой линии при протекании в ней гармонических помех тягового тока.

Определена рациональная по критерию максимального ослабления влияния помех на РЦ высота подвеса активного экранирующего провода над землей.

Результаты работы внедрены на Приднепровской железной дороге и используются при разработке методик испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с линиями железнодорожной автоматики, при переоборудовании железных дорог для организации движения новых типов электропоездов, а также в учебном процессе кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В.Лазаряна.

Ключевые слова: функциональная безопасность, рельсовые цепи, электромагнитная совместимость.

Summary

Zavgorodnij A. V. Increasing of rail circuits functional safety by of their electromagnetic compatibility with a traction network. – Manuscript.

Thesis for candidate of technical science academic degree competition at 05.22.20 – transport means exploitation and maintenance specialty. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2011.

In the thesis the scientific and practical task of increasing of rail circuits functional safety by ensuring of their electromagnetic compatibility with a traction network has been carried out that allows to increase traffic safety of high-speed trains.

For the first time parameters of statistical distribution of harmonious handicapes of a traction current as non-stationary casual process was determined, the mathematical model of distribution of harmonious handicapes in a rail line, the mathematical model of distribution of an electromagnetic field around of a rail and

the mathematical model of electromagnetic influence of a traction network on rail circuits were developed,.

Results of work are used for carrying out of test procedure for new types of a rolling stock on electromagnetic compatibility with lines of railway signalization systems.

Key words: functional safety, rail circuits, electromagnetic compatibility.

Завгородній Олександр Вікторович

**ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ
ШЛЯХОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ З
ТЯГОВОЮ МЕРЕЖЕЮ**

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку “ ” вересня 2011 р. Формат 60×84 1/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.
Замовлення № 1595.

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, www.ditrvv.dp.ua.