

УДК 656.259.12:621.332.3-026.66

В. І. ЩЕКА^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 647 54 80, ел. пошта shcheka_v@mail.ru, vm.dp.mail@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ВПЛИВУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ НА РЕЙКОВІ КОЛА

Мета. У роботі необхідно дослідити електромагнітні процеси в системі «контактна мережа-рейки-земля» з метою забезпечення електромагнітної сумісності рейкових кіл із системою тягового електропостачання та, як наслідок, підвищення безпеки руху на залізниці. **Методика.** Для досягнення поставленої мети застосовано методи наукового аналізу, математичного моделювання, експериментального дослідження, масштабного моделювання. **Результати.** Проведені теоретичні та експериментальні дослідження свідчать про те, що при вивченні електромагнітних процесів у системі «контактна мережа-рейки-земля» в діапазоні частот до 1 МГц можна вважати, що рейкове коло (РК), як приймач завад, розташоване у ближній зоні. Це дозволяє сприймати електромагнітне поле завади стаціонарним і розглядати його як сукупність двох складових (електричної та магнітної), кожна з яких має свій механізм впливу на приймач. У результаті дослідження отримано теоретичну та експериментальну залежність наведеної у проводі-приймачі електрорушійної сили (ЕРС) від частоти струму завади. Отримана частотна залежність відносно похибки за даними «теорія-експеримент». Доведено адекватність застосованої математичної моделі експериментальним даним за критерієм Вілкоксона. **Наукова новизна.** Результати проведених експериментального та теоретичного досліджень магнітного впливу одного контуру на інший дають збіг у частотному діапазоні до 1 000 Гц із середньою відносною похибкою 2,33 %. При збільшенні частоти струму завади спостерігається впевнене зростання середньої відносно похибки між розрахованими та вимірними значеннями наведеної у проводі-приймачі ЕРС. **Практична значимість.** Підтверджено адекватність математичного апарату отриманим експериментальним даним за критерієм Вілкоксона на рівні значності 5 %, що дозволяє в діапазоні до 1000 Гц використовувати застосований математичний апарат для дослідження електромагнітних процесів у багатопроводних лініях та системі «контактна мережа-рейки-земля» зокрема. Отримані результати можуть бути корисними при проектуванні, дослідженні та забезпеченні електромагнітної сумісності рейкових кіл із системою тягового електропостачання.

Ключові слова: контактна мережа; рейкові кола; кондуктивний вплив; магнітний вплив; наведена ЕРС

Вступ

Доведення електромагнітної сумісності сучасного електрорухомого складу з РК є фундаментом забезпечення безпеки руху на залізниці. Тому дослідження особливостей роботи рейкових (РК) кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі (КМ) є актуальною проблемою галузі. Вивчення характеру та ступеня впливу КМ на РК в кінцевому результаті дозволить організувати ефективні заходи щодо забезпечення електромагнітної сумісності РК з системою тягового електропостачання.

Мета

Метою роботи є виявлення та дослідження механізмів впливу КМ на РК для наукового обґрунтування методів та засобів забезпечення

електромагнітної сумісності РК з системою тягового електропостачання та, як наслідок, підвищення безпеки руху на залізниці.

Методика

Будь-який провідник зі змінним струмом створює навколо себе електромагнітне поле, яке призводить до виникнення в усіх прилеглих металевих об'єктах електрорушійних сил (ЕРС) індукції, під дією яких, при наявності замкненого контуру, протікають індукційні струми [1, 3, 5]. Це загально відоме явище, що базується на законі електромагнітної індукції, знаходить прояв і в системі КМ-РК-земля. Тут провідник зі струмом виступає контактний провід (КП), що створює потужне електромагнітне поле, яке здатне викликати ЕРС індукції в усіх оточуючих металевих об'єктах: рейках,

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

лініях сигналізації та зв'язку, кабельних мережах, прилеглих спорудах і будівлях. Наведені в такий спосіб ЕРС та струми можуть потрапляти у смугу частот, яка використовується іншими об'єктами як робоча, утворюючи, таким чином перебої в роботі пристроїв.

Модель, що описує електромагнітну взаємодію, повинна містити три обов'язкові складові: джерело завад – об'єкт, що генерує небажані електромагнітні коливання під час свого нормального функціонування; механізм зв'язку – фізичний принцип передачі енергії завади від джерела до приймача; приймач – об'єкт, який опинившись під впливом електромагнітних завад може втратити змогу коректно виконувати свої функції.

Під час розгляду загальної системи джерело – приймач слід враховувати відстань між об'єктами, що мають електромагнітний зв'язок, визначити, знаходиться приймач в ближній чи дальній зоні відносно джерела [1, 6, 14]. Дальня зона визначається відстанню між джерелом та приймачем, а також швидкістю зміни поля, іншими словами якщо час зростання поля менше ніж час проходження електромагнітною хвилею відстані між джерелом та приймачем, то можна вважати, що приймач розташований у дальній зоні. В такому випадку приймач з джерелом завад зв'язаний електромагнітним випроміненням, а електромагнітне поле завади повинно розглядатися як нестационарне, внаслідок чого опис і дослідження таких електромагнітних процесів стає громіздким.

Якщо приймач розташований в безпосередній близькості до джерела, на відстані, яка не перевищує довжини хвилі завади ($d \ll \lambda/2\pi$), то можна вважати, що приймач знаходиться у ближній зоні [1, 6, 12]. Знаходження приймача у ближній зоні дозволяє припустити, що зміни електромагнітного поля, згенерованого джерелом завади, відбуваються одночасно в усіх точках простору. Завдяки такому припущенню поле завади у ближній зоні можна вважати стаціонарним, тоді між джерелом та приймачем може існувати кондуктивний та індуктивний зв'язок. Крім того, в такому випадку єдине електромагнітне поле завади може розглядатися як сукупність двох складових: електричної та магнітної, кожна з яких має свій механізм впливу на приймач.

Ступінь впливу на приймач залежатиме від симетричності впливаючих і схильних до впливу ліній [1, 3, 12–14]. Будь-яка лінія вважається симетричною, якщо її проводи мають однакові первинні (активний опір, індуктивність, ємність між проводами і відносно землі, провідність ізоляції) і вторинні параметри (волновий опір і коефіцієнт розповсюдження хвилі). Більший електромагнітний вплив створюють лінії з більшим ступенем несиметрії. Коло КМ створене КП та рейками, що зв'язані з землею, тому первинні та вторинні параметри проводів такого кола будуть значно відрізнятися. А враховуючи, що струм в рейках та землі повністю дорівнює робочому струму в КП, КМ можна віднести до повністю несиметричних ліній [1,3], внаслідок чого КМ є потужним джерелом електромагнітних завад.

Рейкова лінія розташована поблизу КМ та виступає одним з її проводів, а отже малопотужне РК є потенційним приймачем електромагнітних завад з боку КМ.

Під час дослідження електромагнітного впливу КМ в діапазоні частот до 1 МГц можна вважати, що РК, як приймач завад, розташований у ближній зоні. Це дає можливість розглянути окремо кондуктивний, електричний та магнітний вплив КМ. Рейкова лінія бере участь у каналізації зворотного тягового струму, гармонічні складові якого можуть потрапляти у смугу сигнальних частот РК, створюючи цим заважаючий або небезпечний вплив, таким чином КМ створює гальванічні завади, які можуть суттєво впливати на роботу РК.

Наявність напруги у КП зумовлює утворення електричного поля, під дією якого в рейкових лініях наводяться потенціали відносно землі. Величина наведеного потенціалу в рейкових лініях суттєво залежить від ємності між впливаючим та схильним до впливу проводами, тобто, в нашому випадку, між КП та рейкою. Внаслідок незначних значень цієї ємності наведені в такий спосіб електричні потенціали не будуть мати досить великих рівнів, тому часто для спрощення розрахунків цим видом впливу нехтують.

Під час руху потягу в зоні колії утворюється низькочастотне магнітне поле, що спрямоване перпендикулярно до осі колії та зростає пропорційно збільшенню тягового струму в КМ. Під дією цього поля індукуються заважаючі по-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

вздовжні ЕРС в рейкових лініях, кабелях зв'язку та інших лініях автоматики, прокладених вздовж колії. Повздовжня ЕРС, при розподілі уздовж лінії, створює в ній напругу відносно землі, що змінюється по довжині лінії, а також може викликати в ній струм, який замикається через розподілену ємність лінії відносно землі. У двопровідних лініях поздовжні ЕРС, індуковані в кожному з проводів, створюють в кінці лінії неоднакову напругу кожного проводу відносно землі унаслідок повздовжньої і поперечної асиметрії ліній, а також неоднакової відстані до впливаючого проводу. В результаті чого з'являється деяка різниця потенціалів між проводами лінії, під дією якої, за наявності контура, протікатиме різницевий струм (струм асиметрії). Таким чином індуковані в рейках повздовжні ЕРС викликають протікання в них струмів завад, які можуть бути причиною відмов в роботі РК [1, 7, 8, 13, 15].

Головним параметром магнітного зв'язку між приймачем та лінією, що створює вплив, виступає опір взаємоіндукції $Z_{iv} = \omega \cdot M_{iv}$, де M_{iv} – коефіцієнт взаємоіндукції між двома лініями, що розглядаються [2, 6, 10].

Одним з основних джерел завад на залізницях, як зазначалось вище, виступає повністю несиметрична лінія контактної мережі, іншими словами контур КП – земля. Приймачем завад в свою чергу є рейкові кола, а саме контур рейка – земля. Отже, під час дослідження впливу КМ на РК необхідно розглядати опір взаємоіндукції між КП та рейками, на який суттєвий вплив створює провідність землі. В реальній ситуації земляний шар є неоднорідним, а його провідність залежатиме від геологічної породи та кліматичних умов. Це значною мірою ускладнює процес теоретичного дослідження магнітного впливу КМ, а отримані результати моделювання в свою чергу потребують перевірки експериментом.

В літературі [1–3, 6–11, 13–15] розглядається багато варіантів підрахунку коефіцієнта взаємоіндукції між двома проводами, але всі вони дають лише в тій чи іншій мірі наближення до дійсності. Найбільш розповсюдженим та оптимальним для низьких частот вважається запропонований Поллячеком вираз, який має такий вигляд:

$$M_{iv} = \left[1 + 2 \cdot \ln \frac{12,66}{\sqrt{f_k \sigma \cdot (a_{iv}^2 + (b_i - c_v)^2)}} - j \left(\frac{\pi}{2} + 11,87 \cdot \sqrt{f_k \sigma} \cdot e^{j\frac{3}{4}\pi} \cdot (b_i + c_v) \right) \right] \cdot 10^{-4}, (1)$$

де a_{iv} – відстань між проводами по горизонталі, м; b_i, c_v – висота проводів над землею, м; σ – питома провідність землі, См/м; f_k – частота струму, що впливає, кГц.

Основним недоліком усіх формул в [1–3, 6–11, 13–15] є можливість їх застосування тільки на низьких частотах, зокрема на частоті 50 Гц. Певний науковий інтерес становить дослідження розрахункової формули (1) на більш високих частотах, та особливо в частотному діапазоні тональних РК.

У зв'язку з цим в роботі виконано теоретичне та експериментальне дослідження магнітного впливу однієї лінії на іншу. Ступінь впливу можна оцінити за рівнем наведеної в ліній-приймачі ЕРС [1,3,5]:

$$E_v = -j\omega M_{iv} I_i l, (2)$$

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

Для дослідження наведеної ЕРС в проводі-приймачі було виконано експеримент, схема якого зображена на рис. 1. На рисунку зображено провід-джерело завад, який утворює впливаючий контур разом з рейкою (пунктиром вказані лінії на дальньому плані). Від генератора в провід-джерело подається струм завади фіксованого рівня. Провід-приймач знаходиться на відомій відстані від джерела та разом із зворотним проводом утворює приймальний контур, в який увімкнене вимірювальне обладнання. Позначення на рис. 1:

a – відстань між проводами по горизонталі;

a_r – відстань між проводом-джерелом та його зворотним проводом по горизонталі;

$a_{3\phi}$ – відстань між проводом-приймачем та його зворотним проводом по горизонталі;

h_1, h_2 – висота проводів над землею;

$h_r, h_{3\phi}$ – висота зворотних проводів над землею.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Задача експерименту полягала у фіксуванні рівнів наведеної в проводі-приймачі ЕРС на різних частотах при відомому струмі в проводі-джерелі.

Відстань між проводами бажано обрати невелику, що забезпечить більший рівень наведеної ЕРС (виходячи з (1) та (2)), та високе значення сигнал/шум на вимірювальній апаратурі. З цих самих причин довжину ділянки зближення між проводами доцільно обрати великою (виходячи з (2)). Оскільки в контурі приймачі, в наведеній схемі, можливо виміряти тільки різницю ЕРС, що наведені в проводі-приймачі та його зворотному проводі, розмір контуру доцільно збільшити, тобто обрати велике $a_{зв}$. Діапазон досліджуваних частот виберемо виходячи з частотного діапазону РК.

Під час виконання експериментального дослідження були обрані наступні параметри схеми: $a = 0,1\text{ м}$, $a_r = 2,9\text{ м}$, $a_{зв} = 10\text{ м}$, $h_1 = h_2 = 1,4\text{ м}$, $h_r = 0,1\text{ м}$, $h_{зв} = 0\text{ м}$, довжина ділянки зближення $l = 25\text{ м}$. Діапазон частот струму завади: 0–6000 Гц. Під час виконання вимірів для кожної частоти окремо фіксувалось значення струму завади.

Для інтерпретації отриманих експериментальних даних було виконано теоретичний розрахунок рівня наведеної ЕРС в колі приймача за параметрами експерименту. Оскільки схема є багатопровідною, при розрахунку необхідно врахувати взаємні зв'язки між: про-

водом джерелом та проводом-приймачем ($M_{дп}$), проводом джерелом та зворотним проводом приймача ($M_{дзв}$), зворотним проводом джерела (рейкою) та проводом-приймачем ($M_{пг}$), рейкою та зворотним проводом приймача ($M_{гзв}$). Розрахунок коефіцієнтів взаємодукції виконувався за (1), з урахуванням геометрії схеми вимірювання. Зв'язком між власними проводами контурів знехтуємо, оскільки між ними існує кондуктивний зв'язок, що значно більший. В результаті в контурі приймача наводиться ЕРС від кожного описаного вище зв'язку, яку можна знайти за (2). Тоді, з урахуванням знака, на вимірювальний прилад діятиме результуюча ЕРС:

$$E = E_{дп} - E_{дзв} - E_{пг} + E_{гзв}.$$

Окрім цього, виконаний натурний експеримент був відтворений в лабораторних умовах на модельному стенді в масштабі 7,45:1. Стенд повністю імітує виконаний експеримент та дозволяє отримувати рівні наведеної ЕРС в колі приймача при відомому струмі джерела. Присутність землі в стенді імітується суцільним металевим листом.

Результати виконаних досліджень зображено на рис. 2.

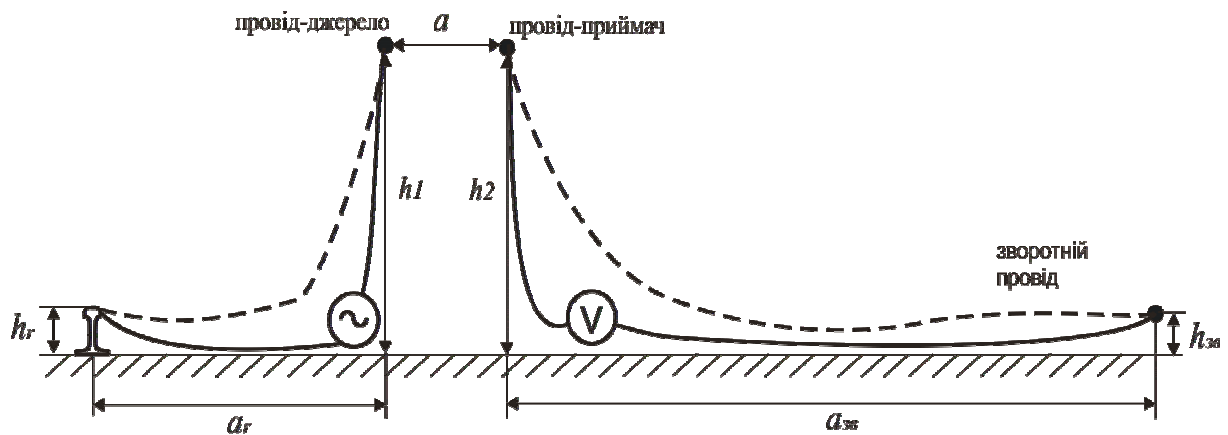


Рис. 1. Структурна схема експерименту

Fig. 1. Structural scheme of the experiment

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

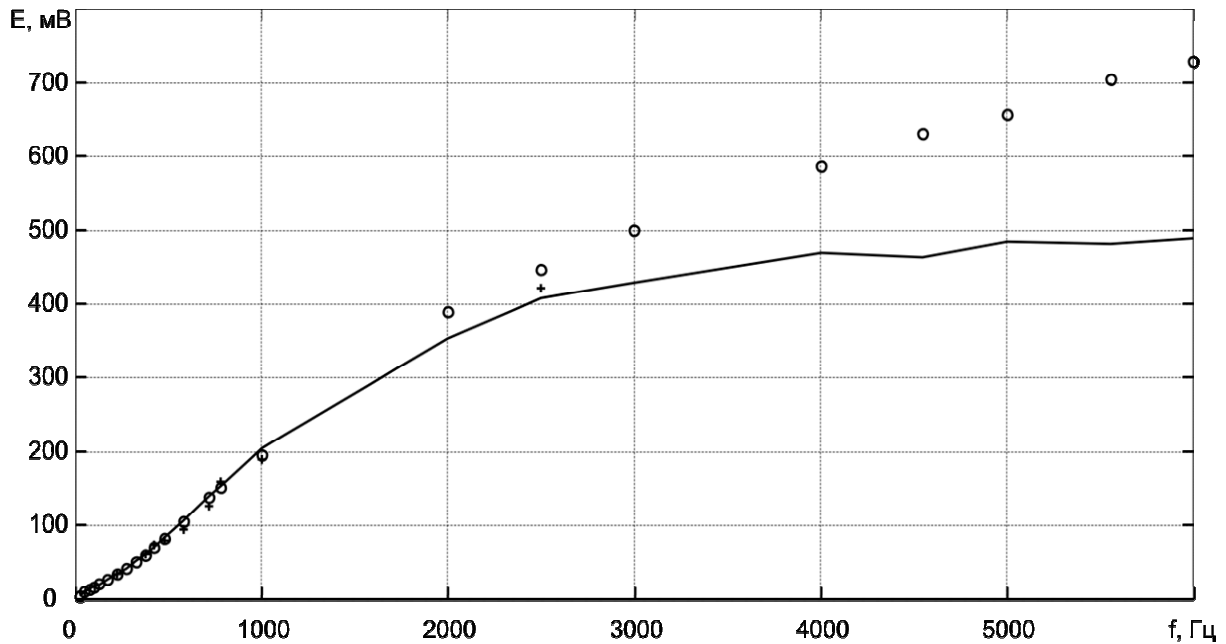


Рис. 2. Порівняльна діаграма результатів дослідження

Fig. 2. Comparative chart of the study results

Результати

На рис.2. зображено залежність наведеної в контурі-приймачі ЕРС від частоти струму завади. Суцільною лінією показано результат теоретичного розрахунку з використанням (1) та (2). Знаком «○» відмічені значення ЕРС, що отримані під час виконання натурального експерименту. Знаком «+» позначено ЕРС, що виміряно на модельному стенді з урахуванням масштабу. З рис. 2. видно, що рівні наведеної ЕРС, отримані різними способами, збігаються приблизно до частоти 1 000 Гц, при більш високих частотах значення теоретичної моделі значно нижчі від результатів експериментів. Середня відносна похибка на діапазоні частот до 6 000 Гц складає 11,12 %, причому у діапазоні 2 000–6 000 Гц вона становить 28,69 %, а на частоті 6 000 Гц 49 % [4] (рис. 3).

На рис. 3 спостерігається різке зростання відносної похибки, починаючи з частоти 1000 Гц, тому, з цієї причини, можна зробити впевнений висновок, що застосування наведеного математичного апарату на базі (1) та (2) в частотному діапазоні більше 1000 Гц є неможливим.

Розглянемо детальніше частотний діапазон до 1000 Гц, що наведений на рис. 4. Позначення на рис. 4 ідентичні до рис. 2.

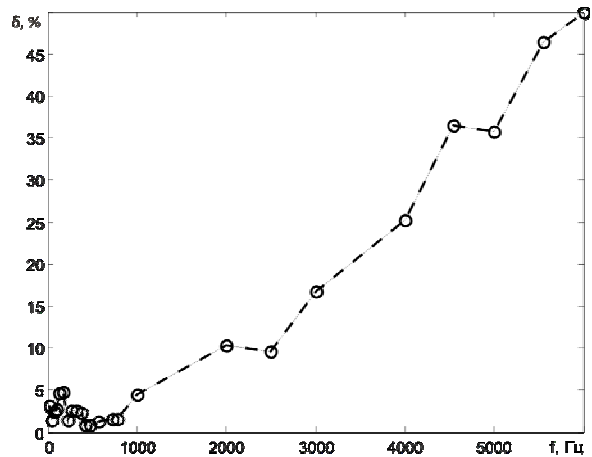


Рис. 3. Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти

Fig. 3. The dependence of the relative error (theory-experiment) from the frequency

З рис. 4 видно досить добрий збіг результатів визначення наведеної ЕРС різними способами. На низьких частотах результати експерименту трохи більші, ніж теоретичні, що пояснюється абсолютною похибкою вимірювання при низьких значеннях сигнал/шум. Це також призводить до отримання збільшеної відносної похибки на низьких частотах (рис. 5).

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

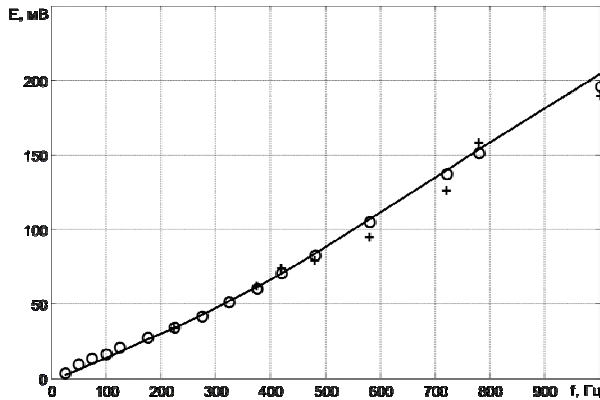


Рис. 4. Порівняльна діаграма результатів дослідження в частотному діапазоні до 1000 Гц

Fig. 4. Comparative chart of the study results in the frequency range up to 1000 Hz

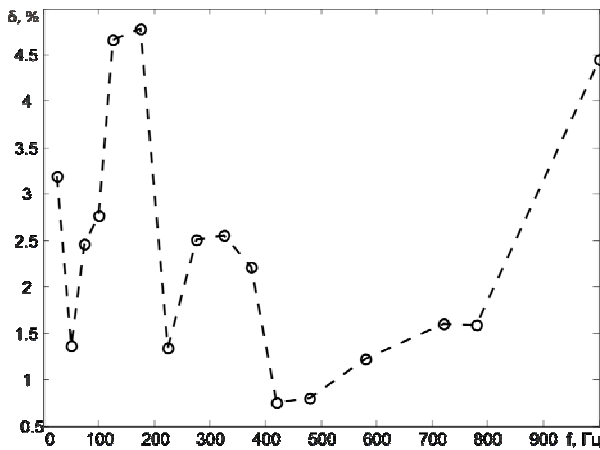


Рис. 5. Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти в діапазоні до 1000 Гц

Fig. 5. The dependence of the relative error (theory-experiment) from the frequency range up to 1000 Hz

Відносна похибка по окремих результатах не перевищує 5 %. Середня відносна похибка на діапазоні частот до 1000 Гц складає 2,33 %, при чому у діапазоні тональних РК 420–780 Гц вона становить 1,19 %. В роботі підтверджено адекватність математичного апарату отриманими експериментальними даними за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності [4]. Це дозволяє зробити висновок про можливість застосування математичного апарату на базі (1) та (2) в частотному діапазоні до 1000 Гц з досить невисокою відносною похибкою.

Наукова новизна та практична значимість

Результати виконаного експериментального та теоретичного дослідження магнітного впливу одного контуру на інший дають збіг у частотному діапазоні до 1000 Гц з середньою відносною похибкою 2,33 %; у діапазоні 2 000–6 000 Гц вона становить 28,69 %.

Підтверджено адекватність математичного апарату отриманими експериментальними даними за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності, що дозволяє в діапазоні до 1000 Гц застосовувати математичний апарат на базі (1) та (2) для дослідження електромагнітних процесів в багатопровідних лініях та системі КМ-РК-земля зокрема. Отримані результати можуть бути корисними під час проектування, дослідження та забезпечення електромагнітної сумісності рейкових кіл з системою тягового електропостачання.

Висновки

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження свідчать про те, що в системі КМ-РК-земля відстань між проводами системи є дуже малою порівняно з довжиною хвилі завади, тобто контур-приймач, а саме РК, знаходиться у ближній зоні, що дозволяє вважати електромагнітне поле завади стаціонарним та розглядати його як сукупність двох складових: електричної та магнітної, кожна з яких має свій механізм впливу на приймач.

Виконаний порівняльний аналіз результатів дослідження частотної залежності наведеної ЕРС в проводі-приймачі показує достатню для інженерних розрахунків точність даних, отриманих за допомогою математичного апарату на базі (1) та (2) в діапазоні до 1кГц. При збільшенні частоти струму завади спостерігається зростання середньої відносної похибки між розрахованими та виміряними значеннями наведеної у проводі-приймачі ЕРС. Це дозволяє зробити висновок про можливість застосування наведеного математичного апарату в частотному діапазоні до 1кГц з досить невисокою відносною похибкою.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – Москва : УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Завгородний, А. В. Сравнительный анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог / А. В. Завгородний // Информ.-управл. системы на ж.-д. трансп. – 2010. – № 2. – С. 49–53.
3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Романов, В. Н. Теория измерений. Анализ и обработка экспериментальных данных : учеб. пособие / В. Н. Романов, В. В. Комаров. – Санкт-Петербург : СЗТУ, 2002. – 127 с.
5. Справочник по электроснабжению железных дорог : в 2 т. / под ред. К. Г. Марквардта. – Москва : Транспорт, 1980 – 1981. – 238 с.
6. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике : пер. с нем. / И. П. Кужекин ; под ред. Б. К. Максимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
7. 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. – Вип. 42. – С. 24–28.
8. Щека, В. І. Дослідження магнітного впливу електрорухомого складу на тональні рейкові кола / В. І. Щека // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті : тези III міжнар. наук.-практ. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 52–53.
9. 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. – Вип. 36. – С. 156–160.
10. Carson, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return / J. R. Carson // Bell Systems Technical J. – 1926. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 539–554. doi: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
11. Gavrilyuk, V. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonic / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnij, A. Myrgorodska // Archives of Transport System Telematics. – 2009. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 33–37.
12. Mohamed, F. P. A novel approach in the measurement of high frequency disturbances from very large electrical systems / F. P. Mohamed, W. H. Siew, K. Y. Liu // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2014. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 46–50. doi: 10.1109/MEMC.2014.6849-543.
13. Ogunsola, A. Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 528 p.
14. Olsen, R. G. Electromagnetic Wave Propagation on a Thin Wire Above Earth / R. G. Olsen, J. L. Young, D. C. Chang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Vol. 48, № 9. – P. 1413–1419.
15. Rhee, E. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem / E. Rhee, K. Changjae // Intern. J. of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

В. І. ЩЕКА^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка і зв'язь», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 647 54 80, ел. пошта shcheka_v@mail.ru, vm.dp.mail@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА РЕЛЬСОВЫЕ ЦЕПИ

Цель. В работе необходимо исследовать электромагнитные процессы в системе «контактная сеть-рельсы-земля» с целью обеспечения электромагнитной совместимости рельсовых цепей с системой тягового электроснабжения и, как следствие, повышения безопасности движения на железнодорожном транспорте. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы научного анализа, математического моделирования, экспериментального исследования, масштабного моделирования. **Результаты.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что при исследовании элек-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

ромагнитных процессов в системе «контактная сеть-рельсы-земля» в диапазоне частот до 1 МГц можно считать, что рельсовая цепь (РЦ), как приемник помех, расположена в ближней зоне. Это позволяет говорить об электромагнитном поле помех как о стационарном и рассматривать его как совокупность двух составляющих (электрической и магнитной), каждая из которых имеет свой механизм воздействия на приемник. В результате исследования получена теоретическая и экспериментальная зависимость наведенной в проводе-приемнике электродвижущей силы (ЭДС) от частоты тока помехи. Получена частотная зависимость относительной погрешности по данным «теория-эксперимент». Доказана адекватность примененной математической модели экспериментальным данным по критерию Вилкоксона. **Научная новизна.** Результаты проведения экспериментального и теоретического исследований магнитного воздействия одного контура на другой дают совпадение в частотном диапазоне до 1000 Гц со средней относительной погрешностью 2,33 %. При увеличении частоты тока помехи наблюдается уверенный рост средней относительной погрешности между рассчитанными и измеренными значениями наведенной в проводе-приемнике ЭДС. **Практическая значимость.** Подтверждена адекватность математического аппарата полученным экспериментальным данным по критерию Вилкоксона на уровне значимости 5 %, что позволяет в диапазоне до 1000 Гц использовать примененный математический аппарат для исследования электромагнитных процессов в многопроводных линиях и в системе «контактная сеть-рельсы-земля» в частности. Полученные результаты могут быть полезными при проектировании, исследовании и обеспечении электромагнитной совместимости рельсовых цепей с системой тягового электроснабжения.

Ключевые слова: контактная сеть; рельсовые цепи; кондуктивное влияние; магнитное влияние; наведенная ЭДС

V. I. SHCHEKA^{1*}

^{1*}Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 647 54 80, e-mail shcheka_v@mail.ru, vm.dp.mail@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

IMPACT MECHANISMS RESEARCH IN THE CONTACT NETWORK ON RAIL TRACK CIRCUITS

Purpose. Electromagnetic processes in «contact network-rails-earth» system should be researched for the purpose of electromagnetic compatibility rail circuits with traction power supply system providing and improving traffic safety on railway transport. **Methodology.** The methods of scientific analysis, mathematical modeling, experimental investigation, scale modeling have been applied to achieve this goal. **Findings.** Conducted theoretical and experimental investigations, indicate that electromagnetic processes in the «contact network-rails-earth» system in nearest zone in frequency range up to 1 MHz and it give us an opportunity to consider, that electromagnetic field of hindrance consists of two components: electric and magnetic. Each of them has its own mechanism to influence the rail circuits. In consequence of research the theoretical and experimental dependences of electromotive force induced in wire-receiver from the hindrance current frequency have been received. The frequency graph of relative error according to data «theory-experiment» has been received. The adequacy by Wilcoxon criterion of mathematical model to experimental data has been proved. **Originality.** The results of theoretical and experimental investigations of magnetic influence between two contours gives us a concurrence in frequency range up to 1000 Hz with average relative error 2, 33 %. With hindrance current frequency one can observe certain increasing the average relative error between calculated and measured values of electromotive force induced in the wire-receiver. **Practical value.** The adequacy by Wilcoxon criterion of mathematical model to experimental data has been proved on significance level 5 %. It gives an opportunity to use this mathematical apparatus for the investigation of electromagnetic processes in lines with plenty of wires and in «contact network-rails-earth» system in range up to 1000 Hz. The obtained results can be useful in designing, researching and providing electromagnetic compatibility of rail circuits with traction power supply system.

Keywords: contact network; rail circuits; conducted influence; magnetic influence; induced electromotive force

REFERENCES

1. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovместimost* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy kompleks Ministerstvo putey i soobshcheniy Publ., 2002. 638 p.
2. Zavgorodniy A.V. Sravnitelnyy analiz metodov rascheta impedansa liniy elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Comparative analysis of calculation methods of the impedance the of electrified railway lines]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy na zhelezno-dorozhnom transporte – Information and Control Systems on Railway Transport*, 2010, issue 2, pp. 49-53.
3. Markvardt K.G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [The power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
4. Romanov V.N., Komarov V.V. *Teoriya izmereniy. Analiz i obrabotka eksperimentalnykh dannykh* [Measurement theory. Analysis and processing of experimental data]. Saint-Petersburg, Severo-zapadnyy tekhnicheskii universitet Publ., 2002. 127 p.
5. Markvardt K.G. *Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog* [Handbook of railway power supply]. Moscow, Transport Publ., 1980-1981. 238 p.
6. Khabiger E., Kuzhekin I.P., Maksimova B.K. *Elektromagnitnaya sovместimost. Osnovy yeye obespecheniya v tekhnike* [Electromagnetic compatibility. The basics of it security in the technique]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 304 p.
7. Shcheka V.I., Romantsev I.O., Yashchuk K.I. Doslidzhennia vplyvu zvorotnoho tiahovoho strumu na rezhymy roboty tonalnykh reikovykh kil [The investigation of reverse traction current influence on tone track circuit modes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 24-28.
8. Shcheka V.I. Doslidzhennia mahnitnoho vplyvu elektrorukhomoho skladu na tonalni reikovi kola [Study of the magnetic influence of electric rolling stock on tonal track circuit]. *Tezy III mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Elektromahnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti»* [Proc. of the III Intern. Sci. and Practical Conf. «Electromagnetic compatibility and safety in railway transport»]. 2010, pp. 52-53.
9. Shcheka V.I., Zavhorodnii O.V. Rozrobka systemy zakhystu reikovykh kil vid elektromahnitnoho vplyvu kontaktnoi merezhi sumizhnoi kolii [The development of safety system for track circuits from electromagnetic influence in overhead system of adjacent track]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 156-160.
10. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell Systems Technical Journal*, 1926, vol. 5, issue 4, pp. 539-554. doi: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
11. Gavrilyuk V., Zavgorodnij A., Myrgorodska A. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonic. *Archives of Transport System Telematics*, 2009, vol. 2, issue 1, pp. 33-37.
12. Mohamed F.P., Siew W.H., Liu K.Y. A novel approach in the measurement of high frequency disturbances from very large electrical systems. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2014, vol. 3, issue 2, pp. 46-50. doi: 10.1109/MEMC.2014.6849543.
13. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2013. 528 p.
14. Olsen R.G., Young J.L., Chang D.C. Electromagnetic Wave Propagation on a Thin Wire Above Earth. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, vol. 48, no. 9, pp. 1413-1419.
15. Rhee E., Changjae K. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem. *International Journal of Software Engineering & Its Applications*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 115–126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Україна); д.фіз.-мат.н., проф. О. В. Коваленком (Україна)

Надійшла до редколегії 23.03.2015

Прийнята до друку 14.06.2015