

## УДК 656.259.12:621.332.3-026.66

В. І. ЩЕКА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>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 виміряними 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;  $\sigma$  – 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 лінії-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 взаємодуктивні 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.

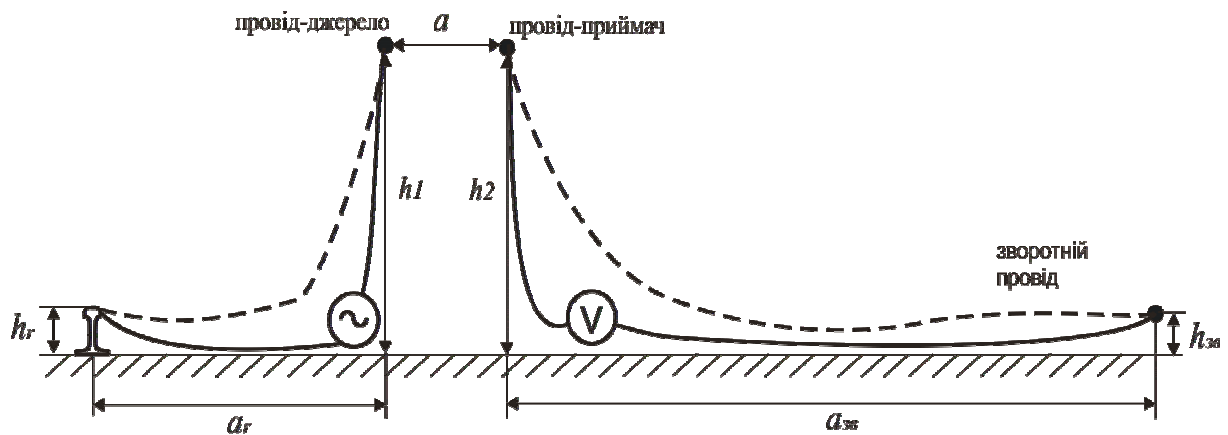


Рис. 1. Структурна схема експерименту

Fig. 1. Structural scheme of the experiment

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

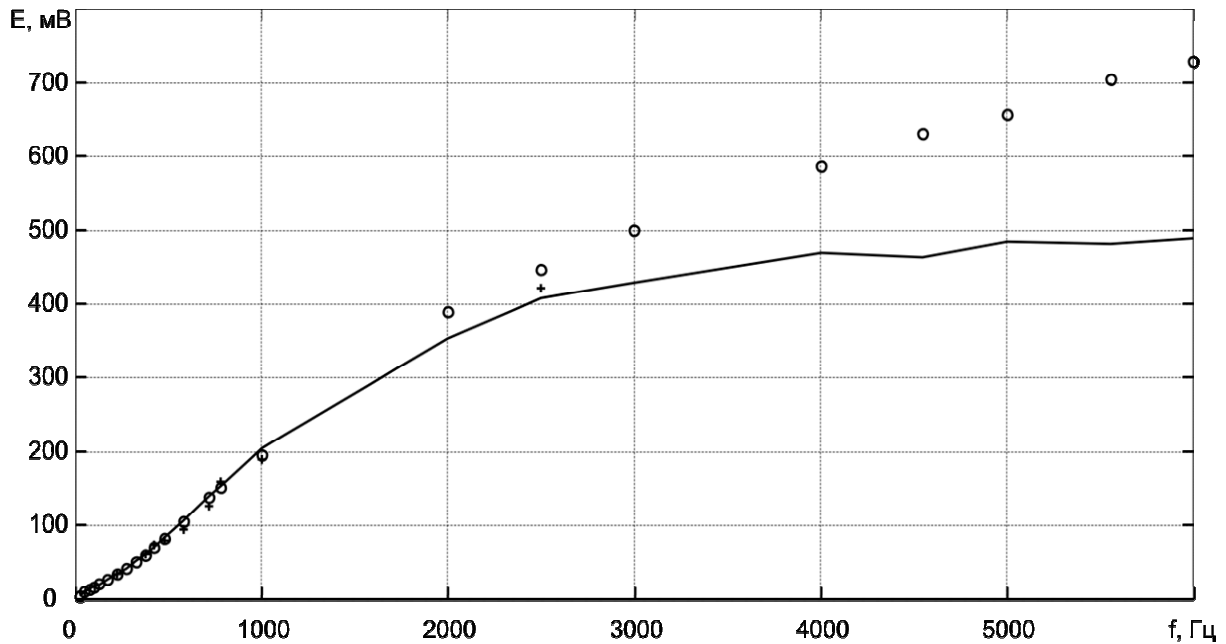


Рис. 2. Порівняльна діаграма результатів дослідження

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 « $\circ$ » 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.

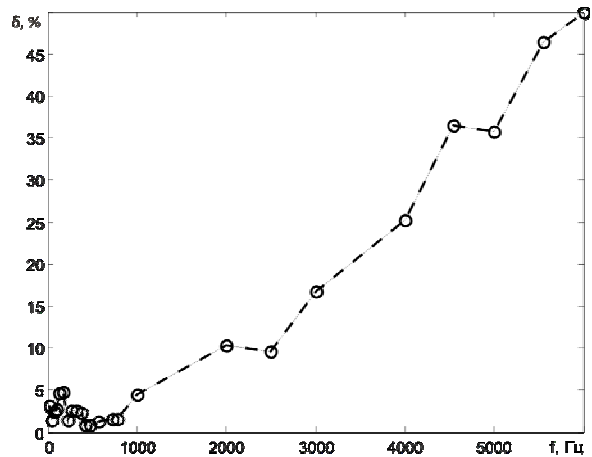


Рис. 3. Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти

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

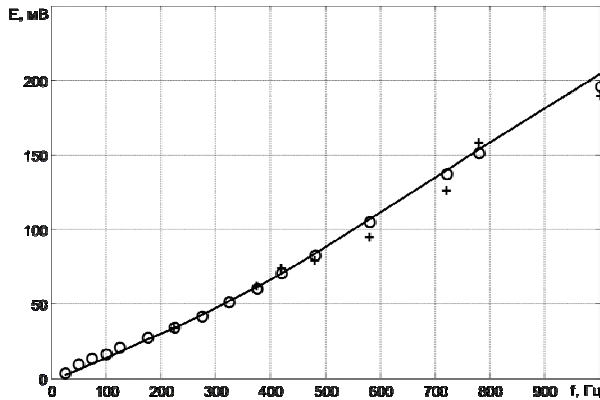


Рис. 4. Порівняльна діаграма результатів дослідження в частотному діапазоні до 1000 Гц

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

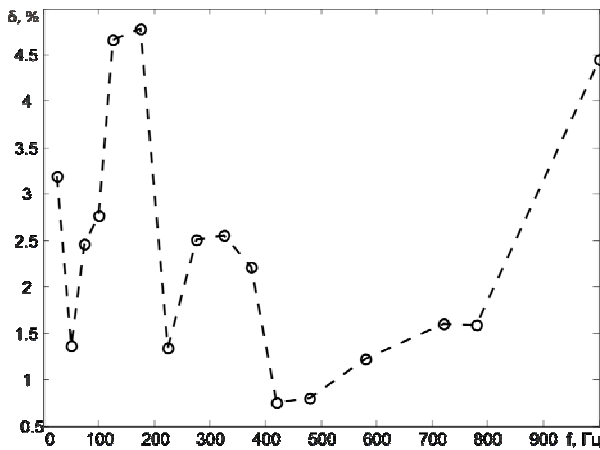


Рис. 5. Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти в діапазоні до 1000 Гц

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. Яшук // 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<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>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<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>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