

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ВПЛИВУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ НА РЕЙКОВІ КОЛА

### Вступ

Впровадження швидкісного руху на залізниці зумовлює будівництво спеціалізованих колій, введення в експлуатацію нових видів електрорухомого складу, впровадження сучасних систем автоматики та сигналізації. Одним з аспектів швидкісного руху є організація потужної тяги поїздів, що потребує впровадження сучасних локомотивів, зокрема з асинхронним тяговим двигуном. Проте експлуатація нових локомотивів на залізниці можлива тільки за умови забезпечення їх електромагнітної сумісності з системами автоматики.

Найбільш відповідальним пристроєм залізниці є рейкове коло (РК), бо саме від його справної роботи залежить безпека руху на залізниці, цілісність вантажів та життя людей. Враховуючи, що рейки є не тільки провідниками сигнальних струмів рейкових кіл, але й зворотнім шляхом для тягового струму, можна сказати, що робота РК постійно проходить у потенційно несприятливих умовах, створених контактною мережею (КМ).

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

Метою роботи є виявлення та дослідження механізмів впливу КМ на РК, а

також проведення оцінки небезпечності цього впливу.

### Механізми впливу КМ на РК

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 [1,2]. Це загально відоме явище, що базується на законі електромагнітної індукції, знаходить прояв і в залізничному транспорті. Тут в якості провідника зі струмом виступає контактний провід (КП), що створює потужне електромагнітне поле, яке здатне викликати ЕРС індукції в усіх оточуючих металевих об'єктах: рейках, 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. Таким чином виникають різні завади та перебої в роботі пристроїв.

Будь яка модель, що описує електромагнітний вплив, 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.

При розгляді загальної системи джерело - приймач слід враховувати відстань між об'єктами, що мають електромагнітний зв'язок, тобто визначити знаходиться приймач в ближній чи дальній зоні відно-

сно джерела. 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 [1,4]. 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 створює свій механізм впливу на приймач.

Ступінь цього впливу залежатиме від симетричності впливаючих і схильних до впливу ліній. 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). Найбільший електромагнітний вплив створюють лінії з більшим ступенем несиметрії, оскільки напруженість електромагнітного поля біля такої лінії буде максимальною. 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 робо-

чому струму в КП, КМ можна віднести до повністю несиметричних ліній [1,2,7]. Отже є всі підстави вважати КМ потужним джерелом електромагнітних завад.

РК є основним колійним датчиком, що контролює положення потягу на перегоні та станції, цілісність рейкових ниток, а також виконує функції каналу передачі коду автоматичної локомотивної сигналізації від колійних пристроїв на локомотив. Рейкова лінія розташована поблизу КМ та виступає одним з її проводів, а отже малопотужне РК є потенційним приймачем електромагнітних завад з боку КМ.

При дослідженні 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 приймає 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 дуже 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.

При русі потягу в зоні колії утворюється низькочастотне магнітне поле, що зростає пропорційно збільшенню тягового струму в КМ, воно спрямоване перпендикулярно до осі колії. Під дією цього поля індуються заважаючі повздовжні електрорушійні сили (ЕРС) в рейкових лініях, кабелях зв'язку та інших лініях автоматички, прокладених вздовж колії. Повздовж-

ня ЕРС, при розподілі уздовж лінії, створює в ній напругу відносно землі, що змінюється по довжині лінії, а також викликає 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 (наприклад: неоднакові опори рейок, викликані обривом стикових з'єднувачів, неоднаковий опір ізоляції уздовж лінії) а також внаслідок неоднакової відстані до впливаючого проводу. В результаті цього з'являється струм асиметрії. Таким чином індуковані в рейках повздовжні ЕРС викликають протікання в них струмів завад, які можуть бути причиною відмов в роботі РК [9]. На відміну від ділянок з постійною тягою кондуктивні завади в рейках від електровозів змінного струму згасають швидше. Це викликано значно більшим опором рейок, отже на дільницях змінного струму суттєво більше значення мають індуктивні складові завад КМ, тому подальше дослідження буде присвячено саме їм.

### Дослідження магнітного впливу

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

Одним з основних джерел завад на залізниці, як зазначалось вище, виступає повністю несиметрична лінія тягової мережі, іншими словами контур КП - земля. Приймачем завад в свою чергу є рейкові кола, а саме контур рейка - земля. Отже при дослідженні 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 в значній мірі ускладнює процес теоретичного дослідження ма-

гнітного впливу КМ, а отримані результати моделювання в свою чергу потребують перевірки експериментом.

В літературі [1-5] 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 вираз, запропонований Поллячком, який має наступний вид:

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

де  $D_{ij}$  – відстань між проводами;

$r$  – радіус проводу, що знаходиться під впливом;

$\sigma$  – питома провідність землі;

$h_i, h_j$  – висота проводів над землею.

В роботі проведено теоретичне та експериментальне дослідження залежності коефіцієнту взаємоіндукції  $M$  від частоти впливаючого струму. При проведенні дослідження відстань між проводами була прийнята 4 м, висота підвісу 6 м, провідність землі  $9,49 \cdot 10^{-4}$  См/м, що є близьким до реальної ситуації на залізниці. Експериментальні дослідження проводилися в масштабі 40:1. На рис. 1 приведено результати дослідження, суцільною лінією показано теоретичний розрахунок, крапки відображають результати експерименту.

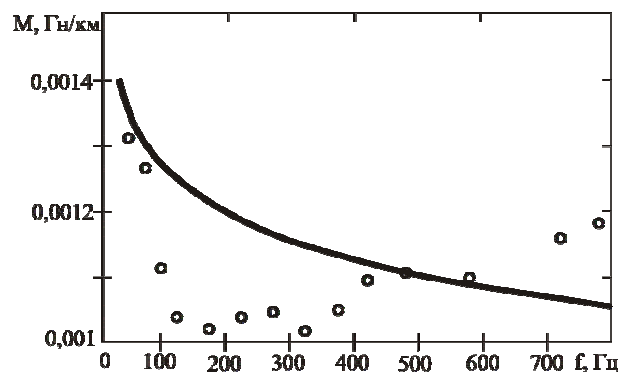


Рис. 1. Залежність коефіцієнту взаємоіндукції від частоти

Порівнявши теоретичні розрахунки з отриманими емпіричними даними, отримую-

емо середню відносну похибку, яка складає 3,8%. В зоні сигнальних частот РК (50, 420-780) середня відносна похибка складає 3,43%, що дає можливість з певною допустимою похибкою використовувати приведений теоретичний вираз для дослідження електромагнітних процесів на низьких частотах у смузі сигнальних струмів РК.

Якщо розглядати одноколіїну ділянку залізниці, то наведені повздовжні ЕРС у рейках будуть приблизно однаковими, бо контактний провід розташований симетрично відносно рейкової лінії. Таким чином магнітний вплив від контактного проводу своєї колії буде незначним. Але при розгляданні багатоколіїних ділянок (двох-, трьохколіїні перегони або станції) треба враховувати вплив контактного проводу однієї колії на рейкові лінії суміжних колій. В цьому випадку наведені повздовжні ЕРС матимуть різні значення, бо відстань від впливаючого контактного проводу до рейок суміжної колії буде різною, що призведе до появи різницевого струму в рейках суміжної колії, який може спричинити заважаючий, або навіть небезпечний вплив на роботу РК.

При аналізі магнітного впливу КМ рейкова лінія розглядається як дві однопровідні електричні лінії з опором  $Z_{p3}$ ,  $Z_{p4}$ , які зв'язані між собою взаємною індуктивністю та провідністю верхнього шару баласту. КМ на початку та в кінці кожної з цих однопровідних ліній індукуює неоднакові потенціали, різниця яких дає поздовжню індуквану в рейках ЕРС:

$$E_p = U_{pn} - U_{pk} = \frac{2\omega M_{кпр} I_{кп} \operatorname{th}\left(\gamma_p \frac{l}{2}\right)}{\gamma_p}. \quad (2)$$

Для визначення поздовжньої ЕРС необхідно конкретизувати параметри, що входять до (2). На практиці в більшості випадків простіше оперувати не відстанню між КП та рейкою суміжної колії, а поняттям міжколіїна відстань. Такі дані більш наглядні та інформативні, тому при дослідженні оберемо саме міжколіїну відстань як змінну величину. За допомогою геометричних співвідношень виразимо відстань

між КП та рейками суміжної колії через міжколіїну відстань:

$$D_{кпр3} = \sqrt{(h - h_p)^2 + (d - dp / 2)^2}$$

$$D_{кпр4} = \sqrt{(h - h_p)^2 + (d + dp / 2)^2}$$

де  $h$  – висота підвісу контактного проводу, 6,3 м;

$h_p$  – висота рейки над землею, 0,1 м;

$dp$  – відстань між рейками колії, 1,52 м;

$d$  – міжколіїна відстань.

Первинні параметри рейкової лінії з урахуванням стикових з'єднувачів можна визначити за формулами [6]:

$$R_p = \frac{0,28}{P} \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f},$$

де  $P$  - периметр перерізу рейки;

$\rho$  - питомий опір рейкової сталі,

$0,21 \cdot 10^{-6}$  Ом·м [3];

$\mu$  - відносна магнітна проникність. Слід зазначити, що відносна магнітна проникність рейкової сталі залежить від рівня струму через рейку. Індуктивний опір рейок визначається як сума зовнішньої та внутрішньої індуктивностей. Перша з них визначається суто геометричними розмірами системи [6]:

$$Le = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{dp - r}{r}\right).$$

В даному випадку в якості радіусу  $r$  приймається радіус еквівалентного круга з довжиною кола, що дорівнює периметру перетину рейки. Внутрішня індуктивність залежить від активного опору рейок та частоти струму, що по них протікає. Тоді результуюча формула індуктивного опору однієї рейки матиме вигляд:

$$L_p = 0,5 \left( Le + 2 \cdot (0,0955 \cdot R_p / f + 1,27 \cdot 10^{-6}) \right).$$

Провідність ізоляції рейкової лінії візьмемо нормативну:  $G_p = 1$  См/км. Ємність ізоляції приймаємо:  $C_p = 1$  мкФ/км. Виходячи з первинних параметрів рейкового кола, можна визначити вторинні параметри, які також необхідні при розрахунках:

$$\gamma_p = \sqrt{(R_p + j\omega L_p) \cdot (G_p + j\omega C_p)}$$

Також для моделювання використовувались наступні параметри: струм в контакт-

ному проводі  $I_{\text{кп}} = 400 \text{ А}$ ; провідність землі  $9,49 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$ ; довжина ділянки, що моделюється  $l = 1 \text{ км}$ . В лабораторних умовах проведено експериментальне дослідження наведеної ЕРС задля чого було відтворено описану теоретично модель в масштабі 300:1. Присутність землі моделювалась за допомогою суцільного металевого листа. На рис. 2 приведено отримані теоретично (суцільна лінія) та експериментально (крапки) рівні наведеної ЕРС в залежності від міжколійної відстані.

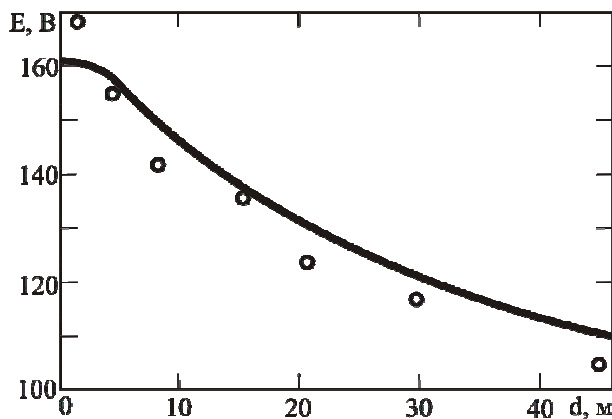


Рис. 2. Залежність наведеної в рейці ЕРС від міжколійної відстані

З приведенного графіку видно, що при обраних для моделювання вихідних даних в суміжній колії потенціал кожної з рейок може перевищувати 150 В. Приведені теоретичні результати дуже близькі до отриманих емпіричних даних, оскільки середня відносна похибка складає 3,81%, а розбіжність по окремим даним не перевищує 7,9%. Таким чином приведений математичний апарат можна з певною похибкою використовувати для оцінки магнітного впливу КМ.

Отримавши аналогічний (2) вираз для наведеної ЕРС у другій рейці суміжної колії знайдемо різницю цих двох наведених ЕРС:

$$\Delta E_p = E_{p3} - E_{p4} = \frac{2\omega(M_{\text{кпр}3} - M_{\text{кпр}4})I_{\text{кп}} \operatorname{th}\left(\gamma_p \frac{l}{2}\right)}{\gamma_p} \quad (3)$$

На рис. 3 зображено залежність різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС в залежності від міжколійної відстані. Суцільною лінією показано результати розра-

хунку для струму в КП 400 А, 50 Гц; пунктиром для струму 7 А, 420 Гц [8,9]. Саме під дією цієї різниці ЕРС у рейковому колі буде протікати різницевий струм, який здатний заповдіяти збої в роботі систем автоматики.

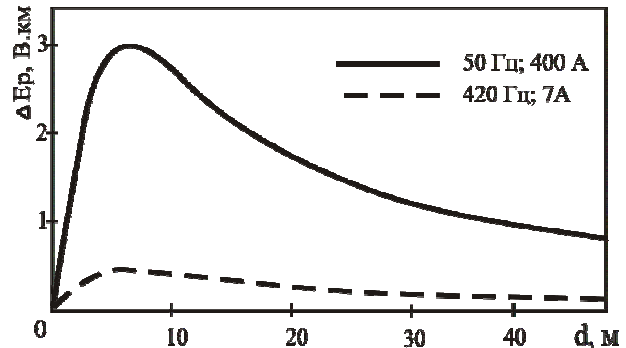


Рис. 3. Залежність різниці наведеної в рейках ЕРС від міжколійної відстані

З приведених графіків видно наявність екстремуму, тобто при розташуванні суміжних колій на відстані 6,3 м. контактна мережа буде створювати найбільший вплив на РК. Різниця наведених ЕРС в цьому випадку складатиме 3 В для струму 50 Гц та 0,448 В для струму 420 Гц. Отже при проектуванні ділянок з електричною тягою бажано уникати розташування суміжних колій на відстані 6,3 м. При подальшому збільшенні міжколійної відстані рівень ЕРС спадає, але при розрахунку наведених в рейках струмів та ЕРС слід за методом суперпозиції враховувати вплив КП двох трьох суміжних колій.

Визначивши різницю ЕРС в рейках складно однозначно робити висновок про небезпечність впливу КМ, оскільки в документах [10] нормується струм завади. Проте замінивши рейкову петлю довжиною 1 км еквівалентним опором знаємо питоме падіння напруги завади на ньому, яке дорівнює наведеній поздовжній ЕРС. Таким чином, задавшись нормативним струмом завади, можна визначити граничний повний питомий опір рейкової лінії при якому КМ починає створювати небезпечний або заважаючий струм. Для випадку екстремуму цей опір складатиме 2,3 Ом/км для струму 50 Гц та 4,48 Ом/км для струму 420 Гц. Реальний опір рейкової петлі може бути значно меншим, а отже струми завад від КМ

досягатимуть рівнів, достатніх для створення заважаючого та навіть небезпечного впливу на роботу РК.

### Висновки

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження свідчать про те, що рейки на ділянках з електротягою постійно знаходяться під високими потенціалами відносно землі, які обумовлені магнітним впливом КМ. А наявність негативних факторів, таких як критичне розташування відносно КП суміжної колії, асиметрія рейкових ліній, інтенсивний рух швидкісних та важких потягів, наявність у фідерній зоні декількох потягів, несприятливі погодні умови і т.п. призводить до утворення різницевої ЕРС між рейками колії, дія якої може спричинити заважаючий та навіть небезпечний вплив на роботу РК.

### Бібліографічний список

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог - 4-е изд., перераб. и дополн [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. К. Г. Марквардт. - М.: Транспорт, 1982. - 528 с.
3. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст]: в 2 т. / под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980-1981. – 238 с.
4. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике [Текст] : пер. с нем. / И. П. Кужекин; под ред. Б. К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304.
5. Завгородний, А. В. Сравнительный анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог [Текст] / А. В. Завгородний // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2010. – №2. – С. 49 – 53.

6. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание [Текст] / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.

7. Косарев, А. Б. Гальваническое влияние тяговых сетей с неоднородными электрическими параметрами рельсовых цепей [Текст] / А. Б. Косарев, А. А. Наумов // Вестник ВНИИЖТ. – 2001. – № 4. – С. 38 – 39.

8. Щека, В. І. Дослідження магнітного впливу електрорухомого складу на тональні рейкові кола / В. І. Щека // Тези III міжнародної науково-практичної конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті”. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 52 – 53.

9. Щека, В. І. Розробка математичної для дослідження електромагнітних заводів від тягових перетворювачів з асинхронним двигуном [Текст] / В. І. Щека, В. І. Гаврилюк // Вісник ДІПТу ім. В. Лазаряна. – 2010. – № 31. – С. 221 – 225.

10. НБЖТ ЦТ 03-98. Нормы безопасности железнодорожного транспорта. Электропоезда. Требования по сертификации. – М.: МПС, 1998. – 54 с.

**Ключові слова:** контактна мережа, рейкові кола, кондуктивний вплив, магнітний вплив, індуковані ЕРС, заважаючий та небезпечний вплив.

**Ключевые слова:** контактная сеть, рельсовые цепи, кондуктивное влияние, магнитное влияние, индуцированные ЭДС, мешающее и опасное влияние.

**Key words:** contact system, track circuits, conductive influence, magnetic influence, electromotive force inducing, disturbing influence, dangerous influence.

Надійшла до редколегії 15.09.2011.

Прийнята до друку 16.09.2011.