

*Гаврилюк В. І., д-р фіз.-мат. наук, Щека В. І.,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна
(Дніпропетровськ, Україна)*

Дослідження особливостей роботи рейкових кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі

Ключові слова: залізничний транспорт, контактна мережа, рейкові кола, електромагнітний вплив, індуковані ЕРС, міжколійна відстань, провідність землі.

Вступ та постановка проблеми

Впровадження швидкісного руху на залізничному транспорті зумовлює будівництво спеціалізованих колій, введення в експлуатацію сучасного електрорухомого складу, впровадження нових систем автоматики та сигналізації. Сучасний електрорухомий склад споживає з контактної мережі (КМ) значну потужність, що викликає протікання в проводах мережі тягового струму високих рівнів, який здатен створювати несприятливу електромагнітну обстановку та викликати появу завад в усіх прилеглих електричних системах, зокрема в рейкових колах (РК) [2, 8, 10], що є найбільш відповідальним пристроєм залізничної автоматики. Саме від їх справної роботи залежить безпека руху на залізничному транспорті, цілісність вантажів та життя людей. Враховуючи, що рейки є не тільки провідниками сигнальних струмів рейкових кіл, але й зворотнім проводом для тягового струму, робота РК постійно проходить у потенційно несприятливих умовах, створених КМ [4, 6, 11].

Літературний огляд

При розгляді проблеми електромагнітного впливу контактної мережі у роботах [2, 4] більшість уваги спрямовано на лінії зв'язку та ка-

бельні мережі, а також дослідження кондуктивного впливу. Проте огляд сучасної літератури [8, 10, 11] свідчить про необхідність дослідження також індуктивного впливу контактної мережі та сучасного рухомого складу на пристрої інтервального регулювання рухом поїздів.

Метою роботи є подальше дослідження особливостей роботи РК в умовах електромагнітного впливу КМ.

Основний матеріал дослідження

Якщо розглядати одноколійну ділянку залізниці, то наведені повздовжні ЕРС у рейках будуть приблизно однаковими, бо контактний провід (КП) розташований симетрично відносно рейкової лінії. Таким чином магнітний вплив від контактного проводу своєї колії буде незначним. Але при розгляданні багатоколійних ділянок (двох-, трьохколійні перегони або станції) треба враховувати вплив контактного проводу однієї колії на рейкові лінії суміжних колій [3, 4, 7].

У цьому випадку наведені повздовжні ЕРС матимуть різні значення, бо відстань від впливаючого контактного проводу до рейок суміжної колії буде різною (рис. 1), що призведе до появи різницевого струму в рейках суміжної колії, який може спричинити заважаючий, або навіть небезпечний вплив на роботу РК.

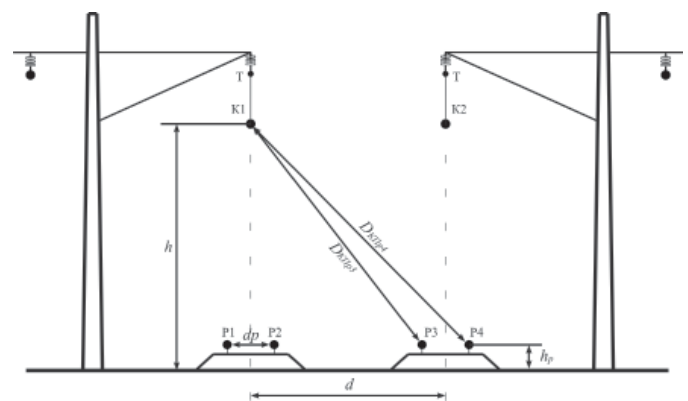


Рис. 1 – Структурна схема двоколійної ділянки

При аналізі магнітного впливу КМ рейки Р3 та Р4 розглядатимемо 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 (U_{rp}) та в кінці (U_{rk}) кожної з цих однопровідних ліній індукуює

неоднакові потенціали, різниця яких дає поздовжню індуковану в рейках ЕРС:

$$E_p = U_{\text{рп}} - U_{\text{рк}} = \frac{2\omega M_{\text{крп}} I_{\text{кп}} \operatorname{th}\left(\gamma_p \frac{l}{2}\right)}{\gamma_p} \quad (1)$$

де $I_{\text{кп}}$ – струм в контактному проводі, що створює вплив, А;

$M_{\text{крп}}$ – коефіцієнт взаємоіндукції між контактним проводом та рейкою;

γ_p – коефіцієнт розповсюдження хвилі в рейках, l – довжина ділянки зближення проводів, м.

Розрахунок коефіцієнта взаємоіндукції між двома проводами проводимо за формулою Поллячека, яка дає невелику похибку в діапазоні робочих частот РК [1-4,7-9]:

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

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.

Для визначення поздовжньої ЕРС необхідно конкретизувати параметри, що входять до (1). На практиці у більшості випадків простіше оперувати не відстанню між КП та рейкою суміжної колії, а поняттям міжколійна відстань (d). Такі дані більш наглядні та інформативні, тому при дослідженні оберемо саме міжколійну відстань як змінну величину. За допомогою геометричних співвідношень виразимо відстань між КП та рейками суміжної колії через міжколійну відстань:

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

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

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 – міжколійна відстань.

Первинні параметри рейкової лінії з урахуванням стикових з'єднувачів можна визначити за формулами [1]:

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

де p – периметр перерізу рейки;

ρ – питомий опір рейкової сталі,

$0,21 \cdot 10^{-6}$ Ом·м[5]; μ – 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 [1]:

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

У 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 [1]:

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

Провідність ізоляції рейкової лінії відносно землі можна взяти нормативну: $G_p = 1$ см/км. Ємність ізоляції приймаємо рівною $C_p = 1$ мкФ/км. Виходячи з первинних параметрів рейкового кола, можна визначити необхідні для розрахунків вторинні параметри [1-4]:

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

$$Z_{vp} = \sqrt{\frac{R_p + j\omega L_p}{G_p + j\omega C_p}}.$$

Також для моделювання використовувались наступні параметри: струм в контактному проводі $I_{\text{кп}} = 400$ А; провідність землі $9,49 \cdot 10^{-4}$ См/м; довжина ділянки, що моделюється $l = 1$ км.

У лабораторних умовах проведено експериментальне дослідження наведеної ЕРС, для чого було відтворено описану теоретично модель у масштабі 300:1. Присутність землі моделювалась за допомогою суцільного металевго листа. На рис. 2

приведено отримані теоретично (суцільна лінія) та експериментально (крапки) рівні наведеної ЕРС в залежності від міжколіїної відстані.

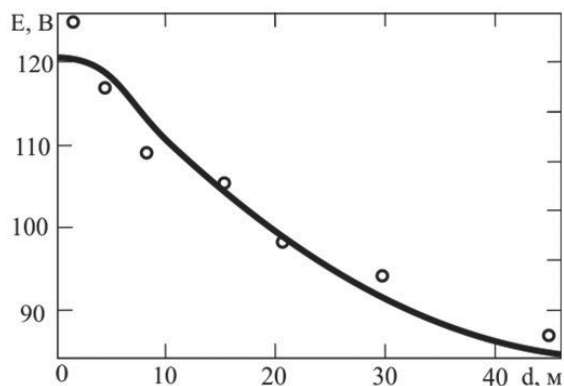


Рис. 2 – Залежність наведеної в рейці ЕРС від міжколіїної відстані

З приведенного графіку видно, що при обраних для моделювання вихідних даних в суміжній колії потенціал кожної з рейок може перевищувати 110 В. Приведені теоретичні результати дуже близькі до отриманих емпіричних даних, оскільки середня відносна похибка складає 3,81%. У роботі підтверджено адекватність застосованого математичного апарату отриманим експериментальним даним за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності. Таким чином приведений математичний апарат можна з невеликою похибкою використовувати для оцінки магнітного впливу КМ.

Отримавши аналогічний до (1) вираз для наведеної ЕРС у другій рейці суміжної колії знайдемо різницю цих двох наведених ЕРС:

$$\Delta E_p = E_{p3} - E_{p4} = \frac{2\omega(M_{кпр3} - M_{кпр4})I_{кп} \operatorname{th}\left(\gamma_p \frac{l}{2}\right)}{\gamma_p}. \quad (2)$$

На основі отриманої математичної моделі проведено дослідження характеру зміни різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС в залежності від міжколіїної відстані та частоти впливаючого струму (рис. 3), а також від висоти розташування КП та провідності землі (рис. 4). Саме під дією цієї різниці ЕРС у РК буде протікати різницевий струм, який здатен стати причиною збоїв у роботі систем автоматики.

З рис.3 видно наявність екстремуму, тобто при розташуванні суміжних колій на відстані 5,9 м. контактна мережа буде створювати найбільший

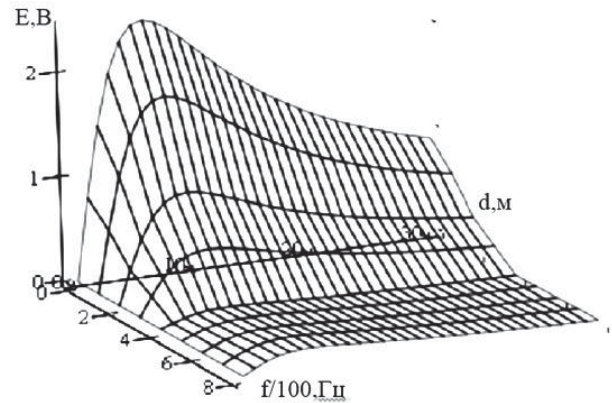


Рис. 3 – Залежність різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС від міжколіїної відстані та частоти впливаючого струму

вплив на РК. Різниця наведених ЕРС у цьому випадку складатиме 2,42 В для струму 50 Гц та 0,125 В для струму 420 Гц. Отже при проектуванні ділянок з електричною тягою бажано уникати розташування суміжних колій на відстані 5,9 м. При подальшому збільшенні міжколіїної відстані рівень ЕРС спадає, але при розрахунку наведених у рейках струмів та ЕРС потрібно враховувати вплив КП двох-трьох суміжних колій [2-4, 7] за методом суперпозиції. Також рівень наведеної ЕРС значно зменшується при збільшенні частоти завади за рахунок зменшення струму завади на високих частотах.

Збільшення висоти підвісу КП збільшує відстань від КП до рейок і, як наслідок, наведені ЕРС і їх різниця зменшується. Збільшення провідності землі посилює її екрануючі властивості, що також призводить до зменшення рівнів наведених ЕРС.

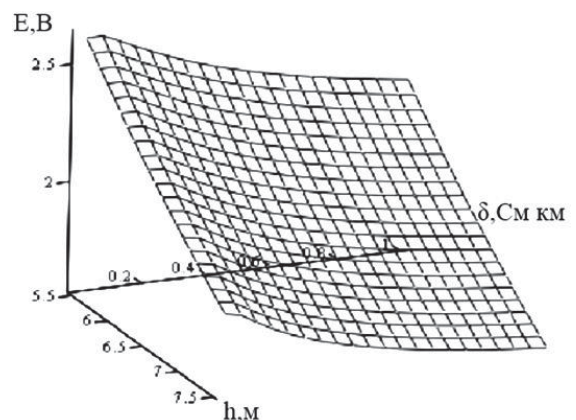


Рис. 4 – Залежність різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС від висоти розташування КП та провідності землі

Висновки

У результаті проведених досліджень виявлено, що найбільш несприятливі умови для роботи РК виникають при розташуванні суміжних колії на відстані 5,9 м, низькому підвісі КП (наприклад, у районі штучних споруд) та низькій провідності землі (сухий кам'янистий ґрунт). За таких умов у рейках індукуються поздовжні ЕРС, різниця яких досягає найбільших значень, що може створювати заважаючий, або навіть небезпечний вплив на роботу РК. Отримані результати можуть бути корисними при проектуванні, дослідженні та забезпеченні електромагнітної сумісності РК з системою тягового електропостачання.

Література

1. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
2. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС, 2002. – 638 с.
3. Завгородний А. В. Методи розрахунку імпедансу ліній електрифікованих залізниць / А. В. Завгородний // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – №1. – С. 96–101.
4. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
5. Справочник по электроснабжению железных дорог: в 2 т. / под ред. К. Г. Марквардта. – М. : Транспорт, 1980–1981. – 238 с.
6. Щека В. І. Розробка системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу контактної мережі суміжної колії / В. І. Щека, О. В. Завгородній // Вісник ДПТУ ім. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 36. – С. 157–161.
7. Щека В. І. Дослідження механізмів впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека // Наука та прогрес транспорту – 2015. – Вип. 57. – С. 19–27.
8. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti // Springer-Verlag. – Berlin, 2013. – 528 p.
9. 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. – Vol. 48, No. 9. – September 2000.
10. Hatsukade S. Calculation of interference between railway traction inverters and balises / S. Hatsukade, A. Yamanaka // Electromagnetic Compatibility. – Tokyo (EMC'14/Tokyo). – 2014. – pp.65-68.
11. Petkova M. Compatibility between Rolling Stock and Train Detection Systems / M. Petkova // IET Seminar on EMC in Railways. – 2006. Petkova M. pp. 71–82.