

УДК 656.259.12:621.332.3

В. І. ЩЕКА – к.т.н., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, shcheka_v@mail.ru, ORCID 0000-0002-2184-2827

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ РЕЙКОВИХ КІЛ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

Вступ

З метою підвищення конкурентоздатності пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні прийнято рішення щодо підвищення швидкості та комфортності перевезень зокрема за рахунок впровадження в експлуатацію сучасного електрорухомого складу (ЕРС) з асинхронним тяговим приводом (АТП). Проте для ефективного використання швидкісних поїздів необхідно подбати про відповідну інфраструктуру залізниці та забезпечити сумісність сучасного електрорухомого складу з існуючими системами автоматичного регулювання рухом поїздів [1, 2]. Досвід ЕРС з АТП свідчить, що проблема його електромагнітної сумісності з системами залізничної автоматики існує та потребує теоретичних та експериментальних досліджень для її розв'язання.

Локомотив з АТП є потужним джерелом електромагнітних завад в смугах робочих частот апаратури СЦБ. Шлях проникнення завад в сигнальні кола автоматики та зв'язку може бути кондуктивний, електричний та магнітний, але незалежно від нього рівень електромагнітного впливу може бути досить високим, до небезпечного. Тому для забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті необхідно проводити захисні заходи, направлені на зниження наведених ЕРС та захист ліній СЦБ від електромагнітного впливу.

Мета та завдання

Метою роботи є розробка та дослідження математичної моделі системи захисту рейкових кіл (РК) від електромагнітних завад з боку контактної мережі (КМ) та ЕРС з АТП для формування наукового обґрунту-

вання методу забезпечення їх електромагнітної сумісності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним з відомих способів зниження електромагнітного впливу КМ на суміжні лінії є використання системи з екрануючим та підсилюючим проводами (ЕПП) [3, 4], огляд якої приведено в першому розділі. Проте така система не враховує реальний рівень та спектр завад в суміжних лініях, внаслідок чого захист не є досить ефективним, оскільки існує велика ймовірність недокомпенсації, або перекомпенсації завади в лініях [5, 6].

В Європі широко використовується система, в якій весь зворотній тяговий струм пропускається через додатковий провід [7], таким чином тяговий струм в рейках відсутній. Але в цьому випадку струм в додатковому проводі, як і в контактному, має приблизно постійне значення, отже такий спосіб розрахований в першу чергу на захист ізольованих від землі ліній (кабелів, ліній зв'язку), що мають постійний рівень напруги по всій своїй довжині, або на підвищення безпеки праці персоналу залізниці. Рейкова лінія має сполучення з землею через опір ізоляції, тобто рівень струму в рейковій лінії змінюється в залежності від місцезнаходження рухомого складу. Таким чином описаний спосіб не дозволяє в достатній мірі зменшити електромагнітний вплив на рейкові кола.

Враховуючи переваги та недоліки існуючих способів захисту в роботі запропоновано використання системи захисту з активним екрануючим проводом (АЕП), який дозволяє збільшити ефективність захисту

та як наслідок підвищити безпеку функціонування РК [8–10].

Система передбачає пропуск зворотного тягового струму через АЕП за допомогою додаткових регулюючих пристроїв. Задача системи захисту РК від електромагнітних завад полягає у забезпеченні рівнів завад в діапазоні всіх робочих частот РК в припустимих межах, визначених [11–13]. Проте рівні струмів завад нормуються для гармонік струму електровоза. Струм завади на вході пристроїв СЦБ буде максимальним і рівним струму завади від електровоза у разі його безпосереднього розташування в точці підключення апаратури РК. У такому випадку контролювати струм завади, спираючись на нормативні документи, доцільно в блоці пристрою узгодження та захисту (ПУЗ), який встановлено в точках під'єднання колійних приймачів (див. рис. 1). Крім того для ефективної роботи системи з АЕП достатньо компенсувати завади лише в полосах робочих струмів РК, тобто застосовувати селективний відбір струму в АЕП.

Під'єднання АЕП проводиться за допомогою елементів регулювання (ЕР), що контролюють відгалуження зворотного тягового струму з рейок в активний екрануючий провід за допомогою сигналів з блоку керування (БК). Забезпечення максимального захисту рейкових кіл досягається шляхом визначення зворотного тягового струму в АЕП виходячи з умови мінімуму електромагнітних завад в точці підключення колійних приймачів.

Розглянемо більш детально метод селективної компенсації завад у рейкових колах.

Відмінною рисою системи, що пропонується, є автоматична компенсація елект-

ромагнітних завад на ділянках, де це необхідно. Компенсація завад відбувається виходячи з безпосереднього рівня струму завади в рейках в точці підключення колійних приймачів [8–10, 14]. Для аналізу струму в рейках необхідно встановити первинний датчик, за допомогою якого цей струм повинен поступати до БК. В якості такого датчику доцільно використовувати датчик струму, що побудований на ефекті Холла [15, 16]. Такий датчик є безконтактним, а отже не впливає на роботу рейкових кіл, крім цього він є досить чутливим, надійним та недорогим.

Струм з датчику струму (ДС), що встановлений в ПУЗ (рис. 2), поступає до блоку фільтрів (Ф1 та Ф2), що складається з двох фільтрів, налаштованих на частоти f_1 та f_2 , які відповідають сигнальним частотам колійних приймачів, під'єднаних в цій точці. Таким чином із загального струму завади виділяють гармоніки, що потрапляють в смугу частот РК [9, 10, 14].

Далі отримані струми завад окремо для f_1 та f_2 випрямляються та потрапляють на інтегрувальні ланки (ІНТ), задача яких полягає у визначенні тривалості діючої завади (t_3) та порівнянні її з еталонним значенням тривалості завади (t_{3e}) при якій може спостерігатися вплив на роботу РК. Якщо тривалість діючої завади перевищує встановлене нормативне значення (0,3 с) [11, 12] то відбувається перевірка рівня завади, шляхом порівняння з еталонним значенням (t_{3e}) при якому може спостерігатися вплив на роботу РК. Отриманий сигнал розузгодження несе у собі інформацію на скільки діюче значення завади перевищує нормативно встановлене.

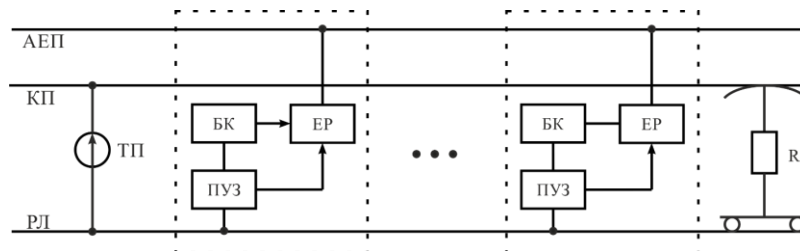


Рис. 1. Структурна схема системи захисту рейкових кіл

Після цього сформований керуючий сигнал підсилюється (П) та потрапляє на затвор IGBT, який виступає в ролі ЕР (керуваного опору), що визначає частину струму відгалуженого в АЕП [9, 10, 14]. Струм з рейок проходить через активний фільтр (АФ), задача якого підсилити, інвертувати та пропустити в АЕП струм завади тільки в робочій смузі РК. Коефіцієнт підсилення АФ та смуга його пропускання визначаються за сигналом з БК.

Таким чином в АЕП протікатиме струм, який є мінімально необхідним і достатнім для компенсації електромагнітних завад в РК.

Для захисту системи від короткого замикання в тяговій мережі, встановлюється амплітудний обмежувач (АО), що захистить АФ та ЕР від струмів короткого замикання. У випадку короткого замикання у тяговій мережі відгалуження струму з рейкової лінії в АЕП не відбувається, а система з АЕП перетворюється на звичайну пасивну систему з екрануючим проводом [9, 10, 14]. Застосування АО знижує вартість системи, оскільки в цьому випадку її елементи не потрібно розраховувати на струм короткого замикання.

У системі присутній зворотній зв'язок, так як чим більший струм завади в РЛ тим більший струм буде відгалужуватися в АЕП, а це в свою чергу призведе до зменшення завад в РЛ. В результаті такої побудови системи компенсація електромагнітних завад відбувається автоматично в реальному часі та по мірі необхідності, наявність зворотного зв'язку підвищує надійність та стабільність системи захисту, а також виключає можливість перекомпенсації [17].

Моделювання системи з активним екрануючим проводом

Для формування наукового обґрунтування використання АЕП проведемо моделювання роботи системи з АЕП для двоко-

лійного перегону, на ділянці «ТП-локомотив» у порівнянні з системою з пасивним екрануючим проводом (ЕПП) та для випадку відсутності будь-якої системи захисту.

Розповсюдження зворотного тягового струму в рейках опишемо за допомогою системи диференціальних рівнянь першого порядку для ділянки колії довжиною dx [18, 19]:

$$-\frac{du_p(x)}{dx} = (R_p + j\omega L_p) \cdot i_{pm}(x) + j\omega L_{кр} \cdot i_k + R_{кр} \cdot i_k,$$

$$\frac{di_{pm}(x)}{dx} = (G_p - j\omega C_p) \cdot u_p - (G_{кр} - j\omega C_{кр}) \cdot (u_k - u_p),$$

де u_p , i_{pm} – миттєві значення напруги та струму в рейковій лінії; R_p , L_p , G_p , C_p – первинні параметри рейкової лінії; u_k , i_k – миттєві значення напруги та струму в контактному поводі.

Розв'язки приведеної системи дають можливість визначити струм в рейковій лінії та потенціал рейок відносно землі в будь-якій точці заданої ділянки.

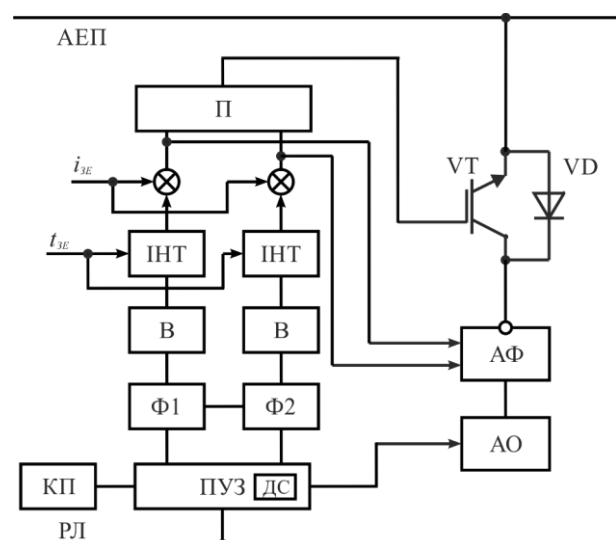


Рис. 2. Функціональна схема пункту підключення елемента регулювання

При проведенні моделювання вважаємо рейкову колію двопровідною лінією, що дає можливість досліджувати різницю наведених ЕРС та індукованих струмів, а також враховувати поздовжню та поперечну асиметрію опорів рейкових ліній [20-25]. Для відображення тільки електромагнітного впливу контактної мережі асиметрією знехтуємо, вважаючи опори рейок рівними, однак зазначимо, що наявність асиметрії збільшуватиме різності струмів та ЕРС, погіршуючи умови роботи РК.

Окрім контактного проводу та рейок (P1, P2) в системі також присутні рейки суміжної колії (P3, P4) та активний екрануючий провід.

За допомогою коефіцієнта взаємоіндукції встановимо індуктивний зв'язок між всіма проводами системи, наприклад, коефіцієнта взаємоіндукції між контактним проводом та рейкою P1 [20-23]:

$$M_{kp1}(d) = 10^{-4} \cdot 2 \times \left[\ln \left(\frac{12,66}{\sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000} \cdot \left[(a_{kp1}(d))^2 + (h_k - h_p)^2 \right]}} \right) + 1 - j \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 11,87 \cdot \sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000}} \cdot e^{\frac{j^3 \pi}{4}} \cdot (h_k + h_p) \right) \right],$$

де $\sigma = 10^{-3}$ См·км – питома провідність землі; h_k – висота підвісу контактного проводу над землею; h_p – висота рейки над землею; a_{kp1} – відстань по горизонталі від контактного проводу по першій рейки, що визначена через міжколійну відстань (d).

Тоді струм в АЕП, наведений контактним проводом (якщо АЕП працює як пасивний провід) [9]:

$$I_{ке}(d) = -0,5m_{ке}(d)I_k,$$

де $m_{ке}(d) = Z_{m_{ке}}(d)/Z_e$ – параметр зв'язку:

$Z_{m_{ке}}(d) = j \cdot \omega \cdot M_{ке}(d)$; Z_e – опір екрануючого проводу; I_k – струм в контактному проводі.

Струм в рейках P1 та P2 визначаємо з урахуванням впливу екрануючого проводу та системи активної компенсації завад:

$$I_{p1}(x) = \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5m_{ep1}(d)I_{ке}(d) \right) \times \left(1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right),$$

$$I_{p2}(x) = \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5m_{ep2}(d)I_{ке}(d) \right) \times \left(1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right).$$

При визначенні струмів в рейках P3, P4 враховуємо індукований струм від контактного та екрануючого проводу, екрануючу дію рейок P1, P2 та вплив системи активної компенсації завад:

$$I_{p3}(x) = 0,5 \cdot \left(-m_{kp3}(d)I_k - m_{p1p3}(d)I_{p1}(x) - m_{p2p3}(d)I_{p2}(x) - m_{ep3}(d)I_{ке}(d) - m_{ep3}(d)I_e(x) \right),$$

$$I_{p4}(x) = 0,5 \cdot \left(-m_{kp4}(d)I_k - m_{p1p4}(d)I_{p1}(x) - m_{p2p4}(d)I_{p2}(x) - m_{ep4}(d)I_{ке}(d) - m_{ep4}(d)I_e(x) \right).$$

Отже математична модель роботи системи з АЕП для двоколійного перегону матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{dU_p(x)}{dx} &= (R_p + j\omega L_p) \cdot I_{pm}(x) + j\omega L_{кр} \cdot I_k + R_{кр} \cdot I_k, \\ \frac{dI_{pm}(x)}{dx} &= (G_p - j\omega C_p) \cdot U_p - (G_{кр} - j\omega C_{кр}) \cdot (U_k - U_p), \\ I_{p1}(x) &= \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5m_{ep1}(d)I_{ке}(d) \right) \cdot \left(1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right), \\ I_{p2}(x) &= \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5m_{ep2}(d)I_{ке}(d) \right) \cdot \left(1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right), \\ I_{p3}(x) &= 0,5 \cdot (-m_{кр3}(d)I_k - m_{p1p3}(d)I_{p1}(x) - m_{p2p3}(d)I_{p2}(x) - m_{ep3}(d)I_{ке}(d) - m_{ep3}(d)I_e(x)), \\ I_{p4}(x) &= 0,5 \cdot (-m_{кр4}(d)I_k - m_{p1p4}(d)I_{p1}(x) - m_{p2p4}(d)I_{p2}(x) - m_{ep4}(d)I_{ке}(d) - m_{ep4}(d)I_e(x)), \\ I_{ке}(d) &= -0,5m_{ке}(d)I_k. \end{aligned} \right.$$

За алгоритмом роботи струм в АЕП відгалужується лише в разі перевищення струмом завади порогового значення, визначеного за нормативними документами. Для підвищення надійності роботи системи та увімкнення завчасної компенсації нормативне значення струмів завад береться з коефіцієнтом запасу 0,9. При вирішенні диференціальних рівнянь враховуємо, що точці з координатою $x = 0$ струм в рейках дорівнює струму тягової підстанції, а в точці $x = l$ – струму локомотиву. Тоді отримуємо граничні умови математичної моделі у формі:

$$\left\{ \begin{aligned} I_e(x) &= \begin{cases} 0 & \text{if } |\Delta I_{34m}(x)| \leq I_{norm}, \\ (k_i \cdot \Delta I_{34m}(x)) & \text{if } |\Delta I_{34m}(x)| > I_{norm}, \end{cases} \\ I_{pm}(0) &= I_{тп}, \\ I_{pm}(l) &= I_{лок}. \end{aligned} \right.$$

Дослідження моделі системи з активним екрануючим проводом

Для моделювання прийmemo наступні параметри: струм локомотива 450 А 50 Гц, довжина ділянки «ТП-локомотив» 20 км. Площиною позначено максимально допустимий струм завади на частоті 50 Гц: 1,3 А [9, 10]. Приведемо деякі проміжні результати роботи моделі (рис. 3–5).

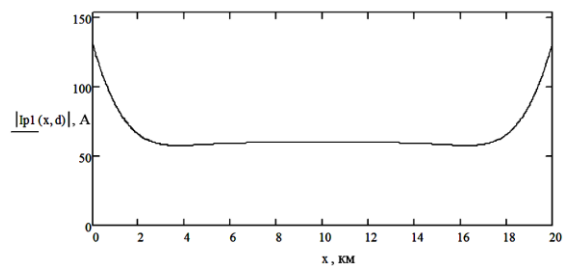


Рис. 3. Струм у рейці P1

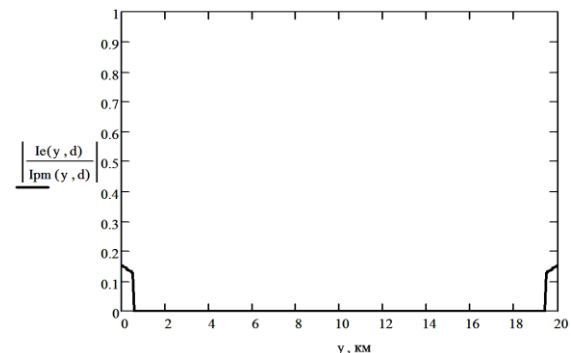


Рис. 4. Частина струму в рейках, що відгалужується в АЕП

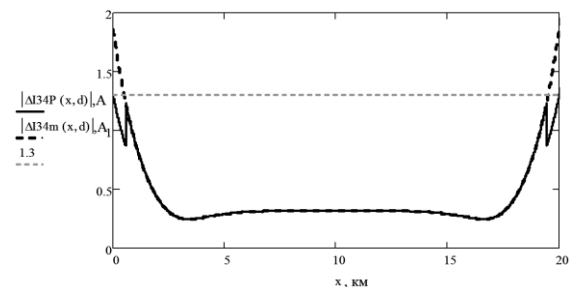


Рис. 5. Різниця струмів в суміжній колії при $d = 4,1$ м суцільна – при АЕП; пунктирна – при ЕПП

На рис. 4 помітно, що струм в АЕП відгалужується тільки тоді, коли струм завади перевищує допустимі значення, а його частка не перевищує 15 % від струму в рейках.

На діаграмах (рис. 6) побудована залежність різниці наведених струмів в рейках суміжної колії від міжколійної відстані d на ділянці «ТП-локомотив» для випадку відсутності будь-якої системи захисту (а), з системою з пасивним екрануючим проводом (б), для системи з АЕП (в).

При відсутності систем захисту помітно (рис. 6 а) великий рівень наведеної складової між локомотивом та ТП (біля 1 А) й перевищення струмом завади допустимого рівня 1,3 А біля ТП та ЕРС.

На нижній діаграмі (рис. 6 в) проілюстровано результат дії системи захисту з АЕП, яка включається в роботу на ділянці біля ТП та ЕРС та знижує рівень завади в РК до припустимого значення, забезпечую-

чи тим самим електромагнітну сумісність РК з КМ та ЕРС з АТП.

Висновки

Розроблено наукове обґрунтування методу селективної компенсації завад в РК, суть якого полягає в зменшенні в РК тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів РК, що дозволяє підвищити безпеку функціонування РК та значно зменшити електроспоживання та потужність компенсуючих пристроїв.

Застосування системи з ЕПП зменшує абсолютні значення наведених струмів в рейках, але їх різниця біля ТП та ЕРС збільшується до 1,7 А. Таке явище пояснюється врахованою в моделі екрануючою дією рейок, що залежить від струму в них та багатопровідністю досліджуваної системи.

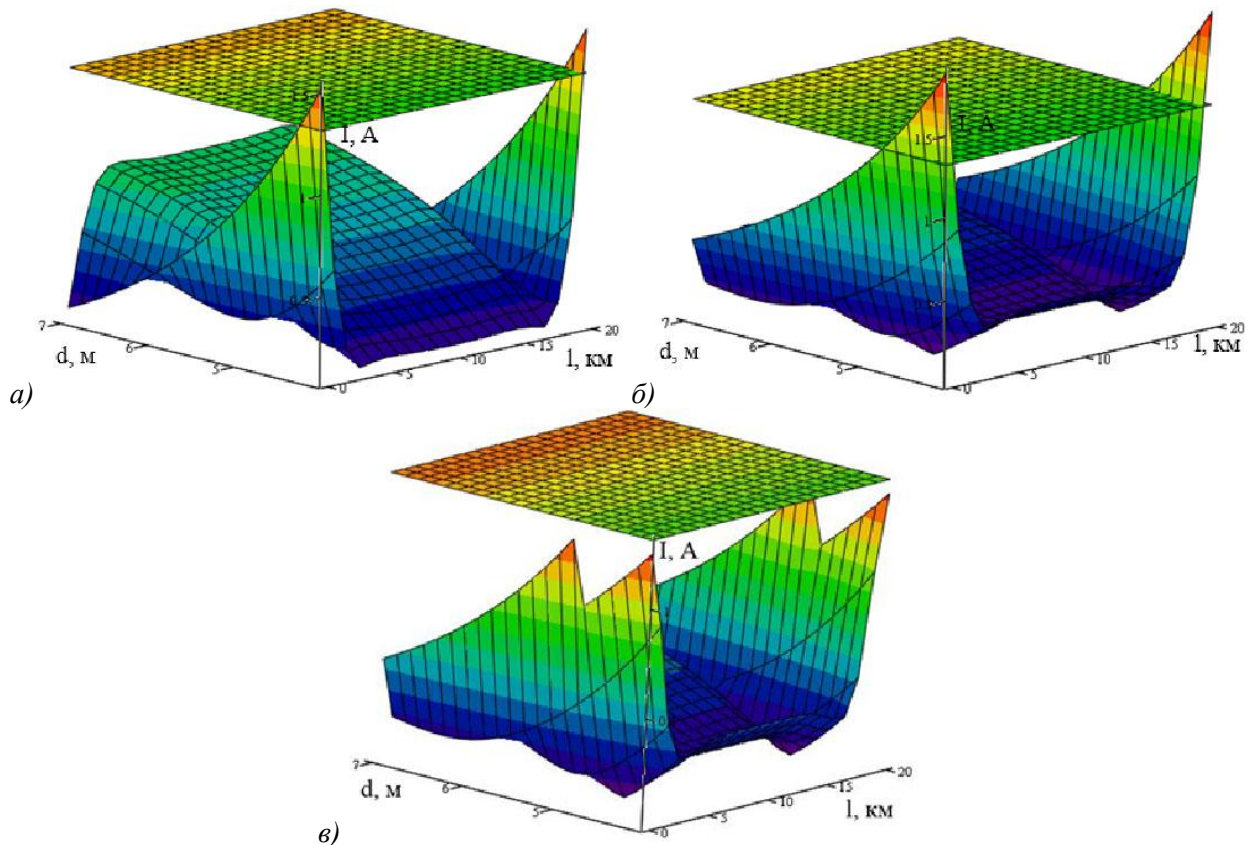


Рис. 6. Порівняльні результати роботи пропонованої системи захисту РК
а) без системи компенсації; б) система з ЕПП; в) система з АЕП

Бібліографічний список

1. Гаврилюк, В. І. Аналіз впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл / В. І. Гаврилюк, А. В. Завгородній // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 2. – С. 37–39.
2. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2015. – № 5 (59). – С 7–15.
3. Бочев, А. С. Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводами / А. С. Бочев, В. В. Мунькин, Е. П. Фигурнов // Железные дороги мира. – 1997. – № 11. – С. 8–12.
4. Бочев, А. С. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного тока / А. С. Бочев, Т. П. Добровольскис, В. А. Мишель // Вестн. ВНИИЖТа. – 1990. – № 8. – С. 17–20.
5. Гаврилюк, В. І. Дослідження особливостей роботи рейкових кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека // Залізничний транспорт України. – 2015 – № 3. – С. 16 – 19.
6. Гаврилюк, В. І. Електроживлення систем залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку: монографія / В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко, Т. М. Сердюк ; за заг. ред. В. І. Гаврилюка; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2016. – 193 с.
7. Tuttas Ch. AC-Bahnen mit aktivem Rückleiter / Ch. Tuttas. // Elektrische Bahnen. – 2001. – № 7. – S. 262–267.
8. Гаврилюк, В. І. Моделирование электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на рельсовую линию в присутствии экранирующего провода // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 4. – С. 99 – 103.
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. – 2011. – № 36. – С. 156–160.
10. Щека, В. І. Організація захисту рейкових кіл від електромагнітних завад з боку контактної мережі / В. І. Щека // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – С. 84–90.
11. НБ ЖТ ЦТ 04-98. Нормы безопасности железнодорожного транспорта. Электropоезда. Требования по сертификации. – Москва: МПС, 1998. – 54 с.
12. ГСТУ 3-14-23-94. Електровози. Методи оцінки рівня якості.
13. ДСТУ 4151-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Електромагнітна сумісність. Вимоги та методи випробовування. Національний стандарт України. – Надано чинності 01.01.2004. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 16 с.
14. Пат. 56336 Україна, МПК (2009) В61L 25/06. Спосіб зменшення електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму на рейкові кола суміжної колії / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека, О. В. Завгородній, А. І. Миргородська; заявник і патенто-власник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2010 07796; заявл. 21.06.10; опубл. 10.01.11, Бюл. № 1.
15. Дмитренко, И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / И. Е. Дмитренко, В. В. Сапожников, Д. В. Дьяков. – Москва: Транспорт, 1994. – 263 с.
16. Портной, Г. Современные магниточувствительные датчики Холла и приборы на их основе / Г. Портной. // Вестник Автоматизации. – 2013. – № 1. – С. 7–12.
17. Щербак, Я. В. Замкнутые системы компенсации неканонических гармоник полупроводниковых преобразователей / Я. В. Щербак. – Харьков: Транспорт Украины, 1999. – 255 с.
18. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва: Транспорт, 1982. – 528 с.
19. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – Москва: УМК МПС, 2002. – 638 с.

20. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва: Транспорт, 1991. – 296 с.
21. Sichenko, V. G. The theoretical and experimental researches of electromagnetic influence from a traction electrosupply system on a railway circuits / V. G. Sichenko, V I. Gavrilyuk // Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 2005. IEEE 6th International Symposium on. – IEEE, 2005. – P. 41–43.
22. Gavrilyuk, V. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electronic power system harmonics / V. Gavrilyuk, A. Zavorodnij, A. Myrgorodska // Archives of transport system telematics. – 2009. – V. 2. – P. 33–37.
23. 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. – 2012. – № 42. – С. 24–28.
24. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах / А. Б. Бойник [и др.]. – Харьков: УкрГАЗТ, 2005. – 256 с.
25. Serdyuk, T. Distribution of harmonics of return traction current on feeder zone and evaluation of its influence on the work of rail circuits / T. Serdyuk, V. Gavrilyuk // 18th

Intern. Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility EMC 2006. – Wroclaw (Poland), 2006. – P. 467–470.

Ключові слова: математичне моделювання, рейкові кола, електромагнітна сумісність, електрорухомий склад з асинхронним тяговим приводом, контактна мережа, активний екрануючий провід, компенсація електромагнітних завад.

Ключевые слова: математическое моделирование, рельсовые цепи, электромагнитная совместимость, электроподвижной состав с асинхронным тяговым приводом, контактная сеть, активный экранирующий провод, компенсация электромагнитных помех.

Keywords: simulation, track circuits, electromagnetic compatibility, rolling stock with asynchronous traction drive, contact network, active screening wire, electromagnetic hindrance compensation.

Рецензенти:

д. т. н., проф., А. М. Муха,
д. ф.-м. н., проф., В. І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 12.10.2016.
Прийнята до друку 28.10.2016.