

УДК 621.317

В.І. ГАВРИЛЮК – д.ф.-м.н., професор, зав. кафедри «Автоматика та телекомунікації»,
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, vl.havryliuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ГАРМОНІЙНИХ ЗАВАД НА ПРИЙМАЧ ТОНАЛЬНОГО РЕЙКОВОГО КОЛА

1. Вступ

Дослідження впливу електричних завад від тягових підстанцій і електричного рухомого складу (ЕРС) на рейкові кола (РК) та методи захисту РК від завад описані в багатьох фундаментальних роботах [1-5]. Існуючі публікації з електромагнітної сумісності (ЕМС) системи тягового електропостачання з рейковими колами розглядають майже всі аспекти цієї проблеми [1-9]. Граничні рівні завад в рейковій лінії від ЕРС наведені у нормативах [10-12].

Підвищення швидкості руху поїздів та впровадження нових типів ЕРС з асинхронним тяговим приводом (АТП) та імпульсним регулюванням сприяли поновленню інтересу до електромагнітної сумісності рухомого складу з системами сигналізації та зв'язку внаслідок генерації новим типом рухомого складу неканонічних гармонійних завад у широкому діапазоні частот, що можуть попадати смугу пропускання захисних фільтрів РК [6, 9].

З урахуванням великої кількості різних типів рейкових кіл, а також особливостей умов їх експлуатації, нормами [10] пропонується доповнювати вимірювання завад від рухомого складу проведенням моделювання їх розповсюдження в тяговій мережі та аналізом їх впливу на колійні приймачі рейкових кіл.

Таким чином розробка комп'ютерних моделей, що дозволяють визначити параметри струму на вході колійного приймача РК в залежності від кількості, розташування, режимів роботи джерел електромагнітних завад (ЕМЗ) по довжині фідерної зони, осо-

бливостей каналізації зворотного тягового струму в рейках, параметрів передачі сигналу РК, впливу дестабілізуючих та інших факторів має практичну значимість.

Нормування допустимого рівня впливу гармонік тягового струму від електровозу на колійний приймач безстиківкового РК необхідно провадити з урахуванням перерахованих факторів [7-9].

Нові типи рухомого складу експлуатуються на дільницях одночасно із застарілими типами електровозів, до того ж різні дільниці можуть бути обладнані різними типами рейкових кіл, що також ускладнює задачу визначення можливих збоїв в роботі рейкових кіл і локомотивної сигналізації.

Розробка та застосування моделей розповсюдження завад в рейковій лінії і їх впливу на колійні приймачі РК може бути використано на етапі розробки та проектування нових систем електрорухомого складу та систем сигналізації і зв'язку.

Дослідження завадостійкості колійних приймачів тональних рейкових кіл (ТРК) шляхом подавання у фізичну модель рейкових кіл сигнального струму ТРК і електричних завад, що були синтезовані комп'ютерною програмою або тягового струму, що був зареєстрований в процесі випробувань нових типів рухомого складу, описані [7-9]. В результаті досліджень отримано значення допустимого рівня гармонійних завад для колійних приймачів, які випробувалися в роботі, а саме ПП1–8/8 і ПП1–8/12 на рівні -12 дБ, а для ПП1–9/8 на рівні -17 дБ, тобто 0,42 мА [8].

Нормативне граничне значення струму на вході колійного приймача ТРК типу ПП1

в нормальному режимі визначено на рівні 0,55 мА шляхом множення нормативного значення струму в рейковій лінії (0,35 мА) на коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця ТРК, що дорівнює $0,12 \cdot 0,5/38 = 1,58 \cdot 10^{-3}$ [8, 9]. Така оцінка є обґрунтованою для максимально допустимого рівня гармонійних завад на вході колійного приймача в нормальному режимі при найбільш несприятливих умовах, а саме для максимального коефіцієнту передачі сигналу в апаратурі релейного кінця.

Для аналізу впливу завад в конкретній рейковій лінії необхідно розраховувати коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця РК з урахуванням параметрів рейкового кола.

Для забезпечення електромагнітної сумісності ТРК з тяговим струмом при максимальній розрахунковій кількості поїздів в фідерній зоні, що допускається за ДСТУ, і при рівні гармонік від кожного електровозу 0,35 А, завадостійкість приймача ТРК в нормальному режимі, а саме, максимальний струм завади, що не приводить до збоїв в роботі ТРК, має бути не менше 0,7 мА [9].

Завадостійкість ТРК в шунтовому і контрольному режимах роботи дорівнює 0,4 мА при $K_{вн} = 0,58$ і 0,83 мА при $K_{вн}=0,483$ [7, 9].

З наведеного короткого літературного огляду видно, що вплив електричних завад в зворотній тяговій мережі на рейкові кола достатньо повно досліджено в літературі. Також достатньо повно досліджено вплив імпульсних і гармонійних завад на режими роботи тональних рейкових кіл.

Але незважаючи на те, що різні аспекти проблеми ЕМС тягового електропостачання з рейковими колами широко досліджено, задача розробки математичної і комп'ютерної моделі розповсюдження електромагнітних завад в рейковій лінії від ЕРС до колійного приймача і їх впливу на колійний приймач тональних рейкових кіл, що враховує тип і конкретні параметри РК, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт

асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати ЕРС, спектральний склад зворотного тягового струму, зареєстрований при випробуваннях ЕРС, відстань між тяговими підстанціями, від підстанцій до колійного приймача і інші параметри, в прямій постановці в літературі не описано.

Основою комп'ютерної моделі є узагальнення теоретичних і експериментальних досліджень, наведених в [1-6], а також дослідження, що були проведені авторами роботи [13-17]. Комп'ютерна модель була використана при випробуваннях нових типів електропоїздів з асинхронним тяговим приводом [16]. Оскільки для нових типів рухомого складу характерним є генерація гармонійних завад, в роботі розглянуто вплив на колійний приймач тональних рейкових кіл гармонійних завад.

2. Мета роботи

Метою роботи є розробка математичної та комп'ютерної моделі розповсюдження електромагнітних завад в рейковій лінії від електрорухомого складу до колійного приймача і їх впливу на колійний приймач тональних рейкових кіл, що враховує тип і конкретні параметри рейкового кола, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати рухомого складу, спектральний склад зворотного тягового струму.

Вплив гармонійних електричних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано шляхом знаходження сумарного струму на вході приймача як суму сигнального струму для нормального, шунтового і контрольного режиму роботи в найбільш несприятливих для цих режимів роботи умовах і максимально допустимого струму завад.

3. Модель розповсюдження завад в рейковому колі

Загальна еквівалентна схема рейкового кола може бути представлена у вигляді

трьох з'єднаних чотириполюсників Н, К та РК, що відповідають апаратурі живлячого і релейного кінця РК, а також рейковій лінії (рис. 1) [1]. До вхідних і вихідних виводів чотириполюсника РЛ під'єднані елементи, що відповідають імпедансам суміжних рейкових ліній для безстиківих РК. Схема заміщення і коефіцієнти передачі РЛ суттєво змінюються в залежності від режиму роботи (нормальний, шунтовий, контрольний), а також внаслідок зміни поперечної провідності (імпедансу) ізоляції баласту ($Var(Y_i)$) і повздожньому опорі рейкових ліній ($Var(Z_r)$) (що відбувається, головним чином, внаслідок зміни опорі рейкових з'єднувачів). Модель має враховувати також зміни напруги живлячого генератора і, за необхідності, також зміни параметрів елементів. Поряд із сигнальним струмом на колійний приймач РК впливають електромагнітні завади (ЕМЗ).

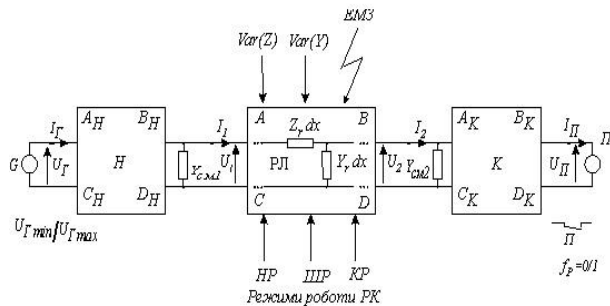


Рис. 1. Загальна еквівалентна схема тонального рейкового кола

Для аналізу впливу електричних завад на колійний приймач, в моделі необхідно визначити сумарний струм на вході колійного приймача від джерела живлення РК при найбільш несприятливих умовах передачі струму для режиму роботи рейкового кола, що аналізується, а також струм гармонійних завад від електрорухомого складу з частотою в смузі пропускання вхідного фільтра колійного приймача. Тривалість гармонійних електричних завад має бути

достатньою для того, щоби викликати збій в роботі РК.

Вихідними даними моделі є електрична схема і параметри РК, мінімальне і максимальне значення напруги живлення $U_{Г\max}$, $U_{Г\min}$, середнє квадратичне (СКЗ) значення струму гармонійних завад що віддаються ЕРС в рейкову лінію на частотах в смузі пропускання вхідного фільтра колійного приймача, їх частоти і тривалість, координати ЕРС, схема каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту. Також в залежності від глибини аналізу, модель може включати деякі інші параметри.

Струм на вході колійного приймача рейкового кола визначається як сума сигнального струму і струму завад

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{zn}(t), \quad (1)$$

де i_{cn} і i_{zn} є, відповідно, значення сигнального струму і струму завади и на вході КП.

Значення струмів i_{cn} і i_{zn} знаходять за відомими рівняннями теорії рейкових кіл [1-5]. Оскільки зсув фаз між сигнальним струмом і завадою може значно вплинути на роботу колійного приймача, в моделі зсув фаз може варіюватися в процесі дослідження.

Струм на вході колійного приймача визначається за фактичними ($\dot{U}_{Г\text{факт}}$, $\dot{I}_{Г\text{факт}}$) або граничними ($\dot{U}_{Г\max}/\dot{U}_{Г\min}$, $\dot{I}_{Г\max}/\dot{I}_{Г\min}$) значеннями напруги і струму генератора згідно до рівняння [1-5]

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{cn} \\ \dot{I}_{cn} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{Г\text{факт}} \\ \dot{I}_{Г\text{факт}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де \mathbf{M}_0 – матриця в А-параметрах для схеми рис. 1, що є добутком всіх матриць між генератором і колійним приймачем

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{M}_H \cdot \mathbf{M}_{CMPL1} \cdot \mathbf{M}_{PL} \cdot \mathbf{M}_{CMPL2} \cdot \mathbf{M}_K, \quad (3)$$

де \mathbf{M}_{CMPL1} , \mathbf{M}_{CMPL2} - матриці, що відповідають адмітансу суміжних рейкових ліній на початку і в кінці РЛ.

Схему чотириполюсника РК і параметри матриці \mathbf{M}_{PL} визначають відповідно до режиму роботи РК з урахуванням найбільш несприятливих умов для його виконання.

Для визначення струму, можна використати формулу [1-5]

$$\dot{I}_{cn} = [\underline{A}_0 \underline{Z}_p + \underline{B}_0]^{-1} \dot{U}_{Г\text{факт}}, \quad (4)$$

де \underline{C}_0 і \underline{D}_0 є елементами другої строки матриці \mathbf{M}_0 .

Визначення струму заводів в рейковій лінії від декількох одиниць ЕРС проаналізовано в [17]. Наведені формули дозволяють визначити струм заводів в кінці рейкової лінії в точці підключення апаратури релейного кінця РК. Відповідно струм електричних заводів на вході колійного приймача визначається через струм заводів в кінці рейкового кола і коефіцієнт передачі струму гармонічних заводів апаратурою кінця рейкового кола за формулою

$$\dot{I}_{zn} = \underline{K}_{nk} \dot{I}_{zk}, \quad (5)$$

де \dot{I}_{zk} – СКЗ струму заводів в двох рейках в кінці рейкового кола

$$\dot{I}_{zk} = \dot{I}_{zk1} + \dot{I}_{zk2}. \quad (6)$$

При відсутності насичення магнітної системи колійного трансформатора тяговим струмом можна прийняти, що коефіцієнти чотириполюсника апаратури кінця рейкового кола для гармонік тягового струму дорівнюють відповідним коефіцієнтам для сигнального струму. Таким чином вираз для коефіцієнта передачі струму гармонічних заводів запишемо у вигляді

$$\underline{K}_{nk} = 0,5 \cdot [\underline{C}_k \underline{Z}_r + \underline{D}_k]^{-1} K_a \quad (7)$$

де \underline{C}_k і \underline{D}_k є елементами другої строки матриці \mathbf{M}_k , \underline{Z}_p – опір колійного приймача, K_a – коефіцієнт асиметрії РЛ в кінці РК.

$$K_a = \left| \frac{\dot{I}_{zk1} - \dot{I}_{zk2}}{\dot{I}_{zk1} + \dot{I}_{zk2}} \right|. \quad (8)$$

4. Визначення сумарного струму на вході колійного приймача

Сумарний струм на вході колійного приймача складається із сигнального струму з несучою частотою f_c і струму завади з частотою f_z , яка у загальному випадку відрізняється від частоти f_c . Завади, що можуть викликати збій в роботі колійного приймача, мають бути в смузі пропускання вхідного фільтра КП. Оцінку їх впливу на колійний приймач необхідно провадити з урахуванням ослаблення амплітуди гармонічних заводів відповідно до амплітудно-частотної характеристики вхідного фільтру [7, 13].

Сумарний струм на вході колійного приймача, що складається із сигнального струму і струму гармонійної завади можна представити у вигляді

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{zn}(t) = I_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + I_z \cos(\omega_z t + \varphi_z) \quad (9)$$

де I_c , ω_c , φ_c , I_z , ω_z , φ_z – відповідно, амплітудне значення, кругова частота й початкова фаза, сигнального струму й гармонійної завади.

Сумарний струм двох гармонічних струмів змінюється у часі з частотою, що дорівнює середньому арифметичному значень частот сигнального струму ω_c й завади ω_z і має биття за амплітудою і фазою відповідно до виразу

$$i_o = I_o \sin \left[\frac{\omega_c + \omega_z}{2} t + \frac{\varphi_c + \varphi_z}{2} + \varphi(t) \right], \quad (10)$$

де:

$$I_o = \left[I_c^2 + I_3^2 + 2I_c I_3 \cos[(\omega_c - \omega_3)t + \varphi_c - \varphi_3] \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{I_c - I_3}{I_c + I_3} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c - \omega_3}{2} t - \frac{\varphi_c - \varphi_3}{2} \right) \right] \quad (12)$$

5. Аналіз завадостійкості тональних рейкових кіл

Вплив гармонійних електричних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано для нормального, шунтового і контрольного режимів роботи для максимально допустимих значень струму завад, що дозволило порівняти результати аналізу з результатами, наведеними в літературі [7-9].

5.1. Нормальний режим

При проведенні моделювання струму на вході ТРК, що знаходиться у нормальному режимі, для граничних значення струму для цього режиму, СКЗ сигнального струму на вході колійного приймача ТРК взято на рівні 3 мА, що відповідає мінімальному розрахунковому значенню безперервного струму, яке забезпечує надійне спрацювання колійного приймача і приймається при розрахунках регулювальних таблиць ТРК [7-9, 13].

СКЗ завад для моделювання взяті на рівні гранично допустимих значень, тобто 0,55 і 0,7 мА [7-9].

Формули (9)-(12) дозволяють визначати сумарний струм на вході колійного приймача за значеннями гармонійних завад від ЕРС в рейковій лінії.

Порівняння середне-квадратичного значення сумарного струму на вході КП зі струмом спрацювання ($f_n = 1$) або відпускання ($f_n = 0$) колійного приймача дозво-

ляє визначати стан колійного приймача при різних варіаціях параметрів моделі і визначити причини можливих збоїв в роботі РК

Моделювання проведено для сигнального струму з несучою частотою 420 Гц і частотою маніпуляції 8 і 12 Гц ідеальної форми. Дослідження на одній частоті не обмежує придатність висновків для інших частот сигнального струму ТРК, оскільки як буде на результати аналізу впливає різниця частот сигнального струму і струму завади, яка визначає період биття (коливання) амплітуди сумарного сигналу на вході колійного приймача.

На рис. 2 наведено часову залежність сумарного струму на вході приймача ТРК, отриманого підсумуванням сигнального струму із СКЗ 3 мА із завадою із СКЗ 0,7 мА.

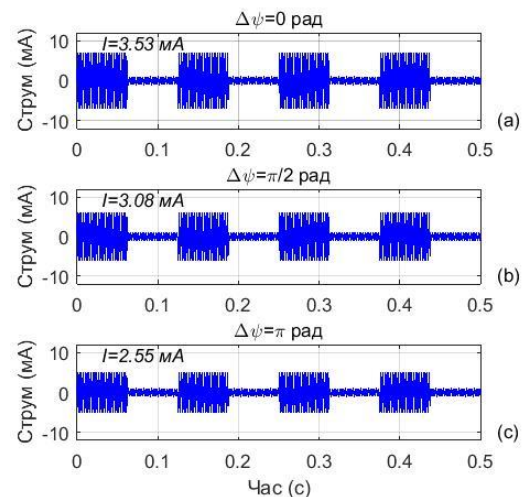


Рис. 2. Струм на вході приймача ТРК при СКЗ завади 0,7 мА

Як видно з рисунку при збільшенні зсуву фаз $\Delta\psi$ в ряду $0, \pi/2, \pi$ СКЗ сумарного струму зменшується і при найбільш несприятливому зсуві фаз, що дорівнює $\Delta\psi = \pi$, СКЗ зменшується до 2,55 мА, що менше струму спрацювання колійного приймача. Внаслідок цього можливий збій нормального режиму ТРК.

При нерівності частоти завади і частоти сигнального струму, згідно з (9)-(12) вини-

кає биття (коливання) амплітуди сумарного струму з періодом

$$T_B = \frac{2\pi}{|\omega_c - \omega_s|}$$

Биття амплітуди струму на вході колійного приймача ТРК може вплинути на роботу приймача в нормальному режимі, якщо СКЗ струму на інтервалі тривалістю більше, ніж 0,6 с зменшиться нижче СКЗ струму надійного спрацьовування приймача. Період коливань амплітуди більше 0,6 с виникає при різниці частот сигналу і завади менше ніж 1,6 Гц. Відповідно дослідження було проведено для двох значень різниці частот сигнального струму і струму гармонійної завади $\Delta f = 0,5$ і 1 Гц, а також для двох значень СКЗ струму завади, – 0,55 і 0,7 мА (рис. 3 і рис. 4).

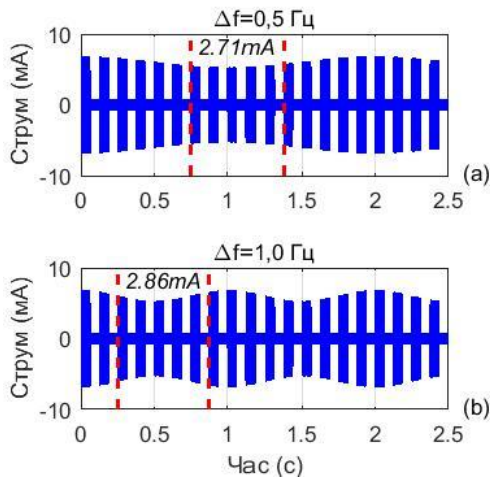


Рис. 3. Часова залежність струму на вході КП ТРК при СКЗ гармонійної завади 0,55 мА

Внаслідок коливань амплітуди сумарного струму на вході колійного приймача на його часовій залежності спостерігаються ділянки, в яких амплітуда значно зменшується. В межах цих ділянок були вибрані сегменти тривалістю $5 \times 0,125 = 0,625$ с.

Межі обраних сегментів позначені вертикальними лініями (рис. 3, 4) і для них підраховано СКЗ сумарного струму. Отримано такі результати. Для завади із СКЗ 0,7 мА при $\Delta f = 0,5$ Гц на інтервалі трива-

лістю більше 0,6 с СКЗ струму на вході колійного приймача дорівнює 2,65 мА. Це значення є меншим ніж струм надійного спрацьовування колійного реле (3 мА) і впритул наближено до струму спрацьовування колійного приймача ТРК 2,6...2,61 мА [13].

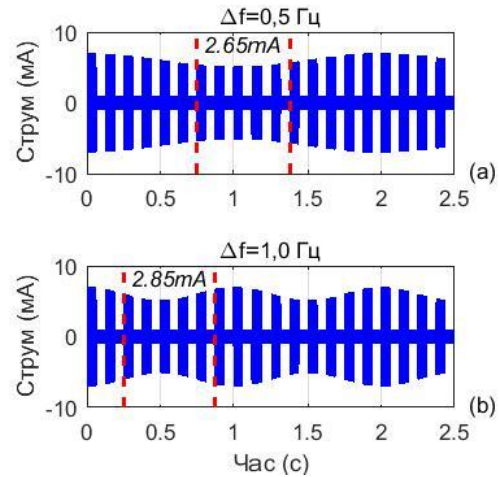


Рис. 4. Часова залежність струму на вході КП ТРК при СКЗ гармонійної завади 0,7 мА

Таким чином отримано, що під дією електричної гармонійної завади з максимально допустимим для нормального режиму СКЗ струму 0,7 мА при різниці фаз сигнального струму і струму гармонійної завади в інтервалі від 0 до 0,5 Гц при несприятливих умовах можливе виникнення в струмі на вході колійного приймача сегментів тривалістю більше 0,6 с, що періодично повторюються, СКЗ яких може бути меншим за СКЗ надійного спрацьовування колійного приймача, що може викликати збій в роботі ТРК в нормальному режимі. Такі результати узгоджуються з запропонованим в [9] граничним значенням завадостійкості приймача ТРК в нормальному режимі.

5.2. Шунтовий і контрольний режим

Аналіз впливу сумарного сигнального струму і струму завади на роботу колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимах проведено також для граничного для цих режимів значення струму на вході колійного приймача. Залишкова напруга на

вході колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимах не може перевищувати 0,23 В, що відповідає струму 1,4 мА [13]. Відповідно СКЗ сигнального струму 1,4 мА на вході приймача взято як граничне значення для найбільш несприятливих для шунтового і контрольного режимів умов.

Граничне значення СКЗ гармонійної завади взято на рівні 0,4 мА при $K_{BH} = 0,58$ [7-9]. Моделювання сумарного струму на вході колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимі проведено для двох значень різниці частот сигнального струму і завади $\Delta f = 0,5$ і 1 Гц (рис. 5). Внаслідок биття амплітуди на часовій залежності струму в шунтовому або контрольному режимі спостерігаються сегменти тривалістю $5 \times 0,125 = 0,625$ с, що періодично повторюються, амплітуда яких суттєво зростає. Межі обраних сегментів позначені вертикальними лініями (рис. 5). Для них підраховано СКЗ сумарного струму на вході колійного приймача.

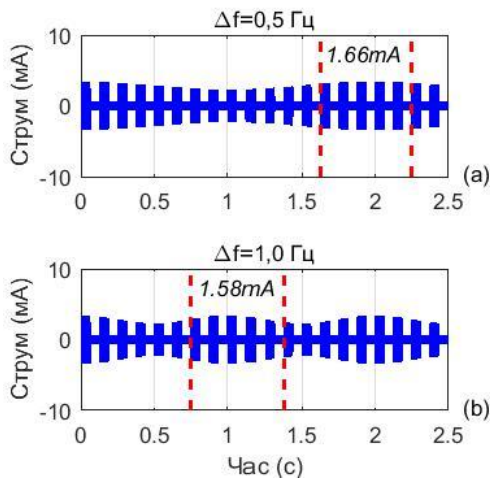


Рис. 5. Часова залежність струму на вході КП ТРК в шунтовому режимі при СКЗ гармонійної завади 0,4 мА

Для $\Delta f = 0,5$ Гц СКЗ струму на вході приймача дорівнює 1,66 мА, а для $\Delta f = 1$ Гц СКЗ дорівнює 1,58 мА. Ці значення перевищують граничне значення

1,4 мА для шунтового або контрольного режимів. Таким чином, під дією електричної гармонійної завади з максимально допустимим для шунтового або контрольного режимів СКЗ струму (0,4 мА) при несприятливих умовах можливе виникнення в струмі на вході колійного приймача ТРК сегментів тривалістю більше 0,6 с, що періодично повторюються, СКЗ яких перевищує граничне значення, внаслідок чого може виникнути небезпечна відмова в роботі тональних рейкових кіл.

Висновки

У роботі досліджено вплив гармонійних завад на приймач тонального рейкового кола на основі розробленої математичної та комп'ютерної моделі, що описує поширення електромагнітних завад у рейках від електрорухомого складу до колійного приймача, а також їх вплив на приймач. Модель враховує тип і конкретні параметри рейкового кола, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати рухомого складу, спектральний склад зворотного тягового струму. Вплив гармонійних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано шляхом знаходження сумарного струму на вході приймача у вигляді суми сигнального струму для нормального, шунтового і контрольного режимів роботи рейкового кола в найбільш несприятливих для цих режимів роботи умовах і максимально допустимому струму завад.

Значення сигнального струму в запропонованій моделі визначається через напругу генератора і коефіцієнт передачі струму, який згідно з відомими формулами знаходиться через матриці чотиріполюсників загальної еквівалентної схеми рейкового кола. Середнє квадратичне значення сумарного струму завад на вході колійного приймача від усіх одиниць електрорухомого складу в межах фідерної зони моделі визначається за запропонованою методикою з

урахуванням коефіцієнта передачі апаратури кінця рейкового кола. Адекватність розробленої моделі була експериментально перевірена шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними результатами, отриманими при реєстрації струму на вході колійного приймача при подачі на нього сигнального струму від генератора ГПУ та гармонійної завади від керованого генератора. Для моделювання струму на вході колійного приймача в нормальному режимі граничні значення струмів на його вході взяті з технічної документації, а саме: середньоквадратичне значення сигнального струму на вході приймача взято на рівні 3 мА; середньоквадратичне значення завади взято на рівні 0,55 і 0,7 мА. З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що завади на вході приймача з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц що-до частоти сигнального струму викликають появу періодичних змін струму нижче рівня його надійного спрацьовування з тривалістю більше 0,6 с, що може призвести до збою в роботі рейкового кола у нормальному режимі. Для моделювання струму на вході колійного приймача у шунтовому та контрольному режимах граничні значення струму на його вході прийняті такими: залишкове напруга на вході приймача 0,23 В; середньоквадратичне значення гармонійної завади – 0,4 мА. В результаті зроблено висновок, що завади на вході приймача з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц щодо частоти сигнального струму викликають підвищення струму на його вході вище за рівень надійного відпускання приймача з тривалістю більше 0,6 с, що може призвести до збою в роботі ТРК у шунтовому та контрольному режимах.

Бібліографічний список

1. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник – 3-е издание, переработанное и дополненное [Текст] / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. – М.: ООО Миссия-М, 2006. – 496 с.
2. 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.
3. Брылеев, А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей [Текст] / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М.: Транспорт, 1978. - 344 с.
4. Путевая блокировка и авторегулировка: Учебник для вузов [Текст] / Н. Ф. Котляренко, А. В. Шишляков, Ю. В. Соболев и др. Под ред. Н. Ф.Котляренко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
5. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов железнодорожного транспорта [Текст] / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
6. Ogunsola, A. Electromagnetic compatibility in railways. Analysis and management. [Text] / A. Ogunsola, A. Mariscotti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – 528 p.
7. Бестемьянов, П. Ф. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом [Текст] / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – №. 1. – С. 87-92.
8. Кравцов, Ю. А. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей [Текст] / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Мащенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2009. – №. 1. – С. 86-91.
9. Кравцов, Ю. А. Методика проверки помехоустойчивости приёмников тональных рельсовых цепей [Текст] / Ю. А.

- Кравцов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – №. 6. – С. 102-109.
10. CENELEC CLC/TR 50507. (2005). Railway applications – Interference limits of existing track circuits used on European railways.
 11. CENELEC CLC/TS 50238-2, (2010). Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems – Part 2: Compatibility with track circuits.
 12. CENELEC EN 50388. (2005). Railway applications – Power supply and rolling stock – Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability.
 13. Кулик, П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности [Текст] / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. К.: Изд. дом «Мануфактура. – 2004.
 14. Анохов, И.В. Про електромагнітну сумісність електрифікованих залізничних ліній постійного струму [Текст] / И. В. Анохов, М. М. Бадер, В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Залізничний транспорт України. 2002. № 2. С. 10-12.
 15. Гаврилюк, В.І. Аналіз електромагнітного впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл [Текст] // Вісник Дніпропетровського національн. ун-ту ім. В. Лазаряна. 2003. № 1. С. 3-7.
 16. Gavrilyuk, V. The modelling of electromagnetic influence of traction electrosupply system on track circuits [Text] / V. Gavrilyuk, A. Zavorodnij // Transport Systems Telematics, IV Intern. Conf., Katowice-Ustron. pp. 18-19, 2004.
 17. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи [Текст] / В. И.

- Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5(59). – С. 7–15.
18. Havryliuk, V. Modelling of the Return Traction Current Harmonics Distribution in Rails for AC Electric Railway System [Text] // 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). – IEEE, 2018. – P. 251-254.

Ключові слова: тональні рейкові кола, тяговий струм, електромагнітна сумісність.

Ключевые слова: тональные рельсовые цепи, тяговый ток, электромагнитная совместимость.

Keywords: tonal track circuits, traction current, electromagnetic compatibility.

Рецензенти:

д.т.н., проф. А. Б. Бойнік,

д.т.н., проф. А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 15.09.2019 р.

Прийнята до друку 30.09.2019 р.