

## УДК 656.259.2

В. І. ГАВРИЛЮК, д.ф.-м.н., професор, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, v.l.havryliuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478

# МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ ЗАВАД ВІД ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ У НЕСИМЕТРИЧНІЙ РЕЙКОВІЙ ЛІНІЇ

## Вступ

Проблема забезпечення електромагнітної сумісності тягового електропостачання з системами сигналізації та зв'язку достатньо повно досліджена у багатьох роботах вітчизняних та закордонних дослідників, починаючи з часів розробки та впровадження електрифікованих на змінному струмі залізниць [1-6]. Необхідність поєднання вимірювань електромагнітних завад в рейкових колах від нових типів електро рухомого складу (ЕРС) під час їх тестових випробуваннях з моделюванням електромагнітного впливу електричного обладнання рухомого складу на рейкові кола обговорювалося у багатьох роботах у тому числі в роботах автора статті [7-9]. Проблема полягає у тому, що нові типи електро рухомого складу функціонують на дільницях з застарілими системами електропостачання та сигналізації разом із локомотивами та електропоїздами, які також випрацювали свій ресурс і потребують заміни. Тому не поодинокі випадки, коли на певних дільницях залізниці можуть фіксуватися збої автоматичної локомотивної сигналізації (АЛСН) під час руху поїздів нового типу, що обладнані тяговим приводом з широтно-імпульсними перетворювачами. Аналіз причин та усунення збоїв в роботі АЛСН потребує додаткових досліджень [10]. В роботі [11] показано, що при обертанні в межах фідерної зони трьох і більше одиниць ЕРС при поєднанні несприятливих обставин на певних дільницях фідерної зони можуть виникнути завади, що переви-

щують максимально допустимий за вимогами нормативних документів рівень.

За умови, що тяговий струм не перевищує граничне значення, при якому відбувається насичення осереддя дросель-трансформаторів та колійних трансформаторів рейкових кіл, основний вплив на роботу систем автоблокування та автоматичної локомотивної сигналізації здійснюють електромагнітні завади різницевого струму в двох рейках. Причиною появи різницевого струму є електрична асиметрія рейкової лінії.

Розрахунок розподілу тягових струмів і напруг у несиметричній рейковій лінії від ЕРС базується на загальновідомих рівняннях протікання струмів у багатопровідних лініях. Аналітичне рішення цих рівнянь для одноколійної дільниці при одній одиниці ЕРС у фідерній зоні наведено у літературі [1,3, 12-14]. Вирази для струмів і напруг у несиметричній рейковій лінії є достатньо громіздкими, містять низку констант, що залежать від первинних параметрів РЛ. Для приблизної оцінки різницевого струму в рейковій лінії на практиці використовують моделі з представленням ліній тягового електропостачання у вигляді системи з елементами із зосередженими параметрами. З урахуванням, що асиметрія струму в рейковій лінії за нормативами не має перевищувати 3...4 %, рішення рівнянь для несиметричної рейкової лінії можуть бути спрощені [3, 12].

### Мета та завдання досліджень

Метою роботи є розробка моделі розповсюдження гармонійних завад від електрорухомого складу у несиметричній рейковій лінії із використанням спрощених виразів для струму в рейках, що можливо для незначних (порівняно з нормативними) коефіцієнтах асиметрії рейкової лінії, та проведення на основі розробленої моделі моделювання впливу поздовжньої та поперечної асиметрії рейкової лінії на розподіл в ній різницевих струмів гармонійних завад від електрорухомого складу.

Для досягнення мети в роботі поставлено такі завдання: надати короткий аналіз проблеми, розглянути математичну модель, та навести результати моделювання, їх обговорення та висновки.

### Аналіз проблеми

Тягова мережа є багатопровідною поздовжньо неоднорідною лінією з розповсюдженими параметрами [1-3]. Для поздовжньо однорідних (за певними припущеннями) діляниць тягової мережі, наприклад в межах однієї фідерної зони або рейкового кола, успішно використовують теорію багатопровідних ліній з розподіленими по довжині параметрами [6, 7, 11,15,16]. Еквівалентна схема елементарного відрізка  $dx$  поздовжньо однорідної ділянки тягової мережі наведена на рис. 1.

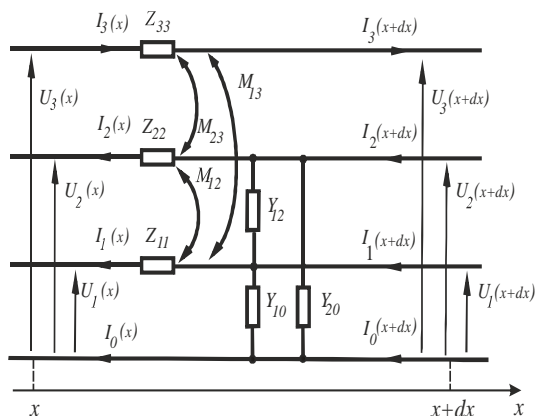


Рис. 1. Еквівалентна схема елементарного відрізка поздовжньо однорідної ділянки тягової мережі [7]

Нульова лінія відповідає провідності землі, перша і друга лінії відповідають, відповідно, першій і другій рейці, третя – провіднику, що є еквівалентом сумарної провідності контактного проводу і несучого тросу [7]. Потенціали ліній відносно землі позначені як  $\dot{U}_1(x)$ ,  $\dot{U}_2(x)$ ,  $\dot{U}_3(x)$ , комплексні провідності між рейками і провідності між рейкою і землею на 1 км лінії позначені як  $g_{12}$ ,  $g_{10}$ ,  $g_{20}$ , комплексні коефіцієнти взаємної індукції між лініями на 1 км довжини позначені як  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$ . Диференціальні рівняння для векторів комплексних напруг  $\vec{U}_i$  і струмів  $\vec{I}_i$  в матричному вигляді запишемо в такому вигляді [7,11]

$$\frac{d\dot{U}_1}{dx} = -\underline{Z}_{11}\dot{I}_1 - \underline{Z}_{12}\dot{I}_2 + \underline{Z}_{13}\dot{I}_3, \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{U}_2}{dx} = -\underline{Z}_{21}\dot{I}_1 - \underline{Z}_{22}\dot{I}_2 + \underline{Z}_{23}\dot{I}_3, \quad (2)$$

$$\frac{d\dot{U}_3}{dx} = -\underline{Z}_{31}\dot{I}_1 - \underline{Z}_{32}\dot{I}_2 + \underline{Z}_{33}\dot{I}_3, \quad (3)$$

$$\frac{d\dot{I}_1}{dx} = -g_{10}\dot{U}_1 - g_{12}(\dot{U}_1 - \dot{U}_2), \quad (4)$$

$$\frac{d\dot{I}_2}{dx} = -g_{20}\dot{U}_2 - g_{21}(\dot{U}_2 - \dot{U}_1); \quad (5)$$

де  $\underline{Z}_{ii} = R_i + jX_i = R_i + j\omega L_i$  повний опір  $i$ -ї лінії без урахування її взаємного індуктивного зв'язку з іншими лініями;  $\underline{Z}_{ij} = jX_{ij} = j\omega M_{ij}$  реактивний опір, що враховує індуктивний вплив  $j$ -ї лінії на  $i$ -у провідника з  $i$ -м.

В узагальненому матричному вигляді ці рівняння можна записати так

$$\frac{d\vec{U}}{dx} = |\underline{Z}|\vec{I}, \quad (6)$$

$$\frac{d\vec{I}}{dx} = |\underline{Y}|\vec{U}, \quad (7)$$

де  $|\underline{Z}|$  – матриця комплексів питомого (на одиницю довжини) поздовжнього опору

ліній ( $i = j$ ), і питомих комплексів взаємних ( $i \neq j$ ) опорів між лініями;  $|\underline{Y}| = \{\underline{Y}_{ij}\}$  ( $i \neq j$ ) - матриці питомих провідностей між лініями.

Граничні умови залежать від конкретного типу електроживлення тягової мережі (консольної або двобічної) та кількості локомотивів в межах фідерної зони. Для одnobічного живлення тягової мережі з одним локомотивом у фідерній зоні з координатою  $x_{E1}$  граничні умови є такими [7, 11]:

$$\text{для } x = 0 \quad U_3(x = 0) = U_{ТПП}, \quad (8)$$

$$U_1(x = 0) = U_2(x = 0) = 0. \quad (9)$$

Для  $x = x_{E1}$  граничне рівняння задає значення струму гармонічної завади частотою  $f = f_n$ , що генерується локомотивом і втікає в точці знаходження локомотиву в рейкову лінію.

Для розв'язання системи матричних рівнянь (6), (7) можна формально використати підхід, який застосовується для рівнянь телеграфних ліній [13].

Розділяючи змінні в (6), (7), одержимо систему диференціальних рівнянь другого порядку.

$$\frac{d^2 \bar{U}}{dx^2} = \underline{Z} \underline{Y} \bar{U}, \quad (10)$$

$$\frac{d^2 \bar{I}}{dx^2} = \underline{Y} \underline{Z} \bar{I}. \quad (11)$$

Рішення системи (10)-(11) є такими

$$\bar{U} = \exp(-\underline{\Gamma} x) \bar{U}_a + \exp(-\underline{\Gamma} x) \bar{U}_b, \quad (12)$$

$$\bar{I} = \underline{Z}_C^{-1} \left[ \exp(-\underline{\Gamma} x) \bar{U}_a - \exp(-\underline{\Gamma} x) \bar{U}_b \right] m \quad (13)$$

де  $\bar{U}_a$ ,  $\bar{U}_b$  – відповідно, вектори падаючої та відбитої хвилі напруги, що дорівнюють

$$\bar{U}_a = \frac{\bar{U}_1 + \underline{Z}_C \bar{I}_1}{2}, \quad (14)$$

$$\bar{U}_b = \frac{\bar{U}_1 - \underline{Z}_C \bar{I}_1}{2}, \quad (15)$$

де  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{I}_1$  – вектори напруг та струмів на вході системи,  $\underline{Z}_C = \underline{\Gamma}^{-1} \underline{Z}$  – матриця характеристичних (хвильових) імпедансів лінії,  $\underline{\Gamma} = \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}}$  – матриця констант розповсюдження, а  $\underline{Y}_C = \underline{Z}_C^{-1}$  – матриця характеристичних адмітансів системи.

Наведене рішення для струмів і напруг в рейковій лінії не враховує наявність дросель-трансформаторів та колійних трансформаторів РК, які шунтують рейкову лінію в точці їх підключення і зменшують різницевий струм в рейках. Можливим виходом є представлення еквівалентної схеми тягової мережі у вигляді послідовного включення багатополосників, які відповідають поздовжньо однорідним ділянкам тягової мережі, між якими підключені багатополосники, що відповідають дросель-трансформаторам або колійним трансформаторам РК.

Але такий підхід є громіздким для практичного втілення і нижче розглянуто спрощену модель електричних процесів у несиметричній рейковій лінії.

### Математична модель

Еквівалентна схема несиметричної рейкової лінії наведено на рис. 2, Схема є типовою і розглянута у літературі [3]. Початок координат взято у точці знаходження ЕРС, як генератора гармонійних завад, координата тягової підстанції позначена як D, а координати релейного і живлячого кінця рейкового кола, відповідно  $x_i$  і  $x_e$ . Вважаємо, що по довжині рейкового кола тягова мережа є однорідною і електричні параметри тягової мережі описуються диференціальними рівняннями (1-5). Граничні умови для відрізка рейкової лінії, що розглядається є такими:

$$\text{для } x = x_i, \quad I = I_i; \quad U = U_i; \quad (16)$$

$$\text{для } x = x_e, \quad I = I_e; \quad U = U_e. \quad (17)$$

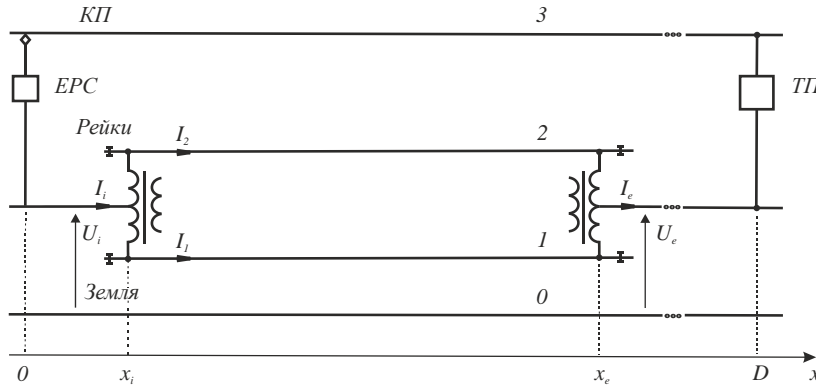


Рис. 2. Еквівалентна схема несиметричної рейкової лінії

Оскільки метою роботи є знаходження різницевого струму і напруги в рейках, позначимо їх відповідно як  $I_d = I_2 - I_1$ ;  $U_d = U_2 - U_1$ .

Якщо прийняти, що середнє значення струму і напруги є  $I_0 = I_1 + I_2$ ;  $U_0 = (U_1 + U_2)/2$ , отримаємо

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{2}(\dot{I}_0 - \dot{I}_d) = \frac{\dot{I}_0}{2}(1 - \underline{K}_I); \quad (18)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{2}(\dot{I}_0 + \dot{I}_d) = \frac{\dot{I}_0}{2}(1 + \underline{K}_I); \quad (19)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_0 - \frac{\dot{U}_d}{2} = \dot{U}_0 \left(1 - \frac{\underline{K}_U}{2}\right); \quad (20)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_0 + \frac{\dot{U}_d}{2} = \dot{U}_0 \left(1 + \frac{\underline{K}_U}{2}\right), \quad (21)$$

де  $\underline{K}_I = \dot{I}_d / \dot{I}_0$  і  $\underline{K}_U = \dot{U}_d / \dot{U}_0$  комплексні коефіцієнти асиметрії за струмом та напругою.

Введемо аналогічні вирази для імпедансу рейок та провідності "рейка-земля"

$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{2}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2); \quad \Delta \underline{Z} = \underline{Z}_1 - \underline{Z}_2; \quad (22)$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 + \frac{1}{2} \Delta \underline{Z}; \quad (23)$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_0 - \frac{1}{2} \Delta \underline{Z}; \quad (24)$$

$$g_0 = g_1 + g_2; \quad \Delta g = g_1 - g_2; \quad (25)$$

$$g_1 = \frac{1}{2}(g_0 + \Delta g); \quad g_2 = \frac{1}{2}(g_0 - \Delta g); \quad (26)$$

Після нескладних перетворень системи рівнянь (1)-(5) з урахуванням (18)-(26) отримаємо

$$\frac{d\dot{U}_0}{dx} = -\frac{1}{2}(\underline{Z}_0 + \underline{Z}_i)\dot{I}_0 + \frac{\Delta \underline{Z}}{4}\dot{I}_d + \underline{Z}_M \dot{I}_3; \quad (27)$$

$$\frac{d\dot{U}_d}{dx} = \frac{\Delta \underline{Z}}{2}\dot{I}_0 - (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_i)\dot{I}_d; \quad (28)$$

$$\frac{d\dot{I}_0}{dx} = -g_0 \dot{U}_0 + \frac{\Delta g}{2}\dot{U}_d; \quad (29)$$

$$\frac{d\dot{I}_d}{dx} = \Delta g \dot{U}_0 - \frac{g_0}{2}\dot{U}_d. \quad (30)$$

Рішення системи рівнянь (27)-(30) як і системи (1)-(5) приводить до громіздких викладок. Для спрощення процедури розв'язування рівнянь прийемо припущення, що при невеликих коефіцієнтах асиметрії їх значення не впливає на сумарний струм і середню напругу в рейковій лінії.

В такому разі можна вважати, що  $\dot{I}_0$  і  $\dot{U}_0$  в рівняннях (27)-(30) дорівнюють, відповідно, сумарному струму в РЛ і середній напрузі на рейках для симетричної рейкової лінії з заданими первинними параметрами  $\underline{Z}_0$  і  $g_0$ . Рішення для струму і напруги в симетричній рейковій лінії детально описані в літературі [1-3, 12-14].

Диференціюючи рівняння (28) з урахуванням (29), (30), отримаємо

$$\frac{d^2 \dot{U}_d}{dx^2} - \underline{P} \dot{U}_d = \underline{Q} \dot{U}_0; \quad (31)$$

в яких

$$\underline{P} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_i) g_0 + \frac{1}{4} \Delta \underline{Z} \Delta g; \quad (32)$$

$$\underline{Q} = -(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_i) \Delta g - \frac{1}{2} \Delta \underline{Z} g_0. \quad (33)$$

Рівняння (32), (33) можна переписати через коефіцієнти поздовжньої  $\underline{K}_Z = \Delta \underline{Z} / \underline{Z}_0$  і поперечної  $K_g = \Delta g / g_0$  асиметрії у вигляді

$$\underline{P} = \frac{1}{2} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\underline{Z}_i}{\underline{Z}_0} + \frac{1}{2} \underline{K}_Z K_g \right); \quad (34)$$

$$\underline{Q} = -\gamma^2 \left[ \left( 1 - \frac{\underline{Z}_i}{\underline{Z}_0} \right) K_g + \frac{1}{2} \underline{K}_Z \right]. \quad (35)$$

Різницевий струм в рейках визначається з (28) у вигляді

$$\dot{i}_d = \frac{\Delta \underline{Z}}{2(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_i)} \dot{i}_0 - \frac{1}{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_i)} \frac{d \dot{U}_d}{dx}. \quad (36)$$

Рішення рівняння (31) знаходиться як сума загального рішення однорідного диференційного рівняння та часткового рішення неоднорідного рівняння.

Рішення однорідного диференційного рівняння має вигляд

$$\underline{U}'_d = C_1 \exp(\gamma x) + C_2 \exp(-\gamma x). \quad (37)$$

Константи інтегрування визначаються з граничних умов (8), (9), (16), (17), а також зі співвідношення

$$\dot{U}_d = -\dot{I}_s \underline{Z}_{TE}, \text{ при } x = x_e, \quad (38)$$

де  $\underline{Z}_{TE}$  імпеданс дросель-трансформатора з підключеним до нього навантаженням.

### Результати моделювання

Для апробації розробленої моделі проведено моделювання розподілення коефіцієнта асиметрії гармонік тягового струму частотою 25 Гц по довжині рейкової лінії

від електропоїзду, положення якого взято за начало координат. Відстань між електропоїздом і тяговою підстанцією прийнято 10 км. Передбачається, що передня колісна пара поїзду в'їхала на релейний кінець рейкового кола, що має довжину 2.6 км. Діюче значення гармонійної завади частотою 25 Гц, що генерується електрообладнанням поїзду, прийняте як 1 А. В моделі зроблено припущення що струм гармонійної завади в обох рейках є однаковим і дорівнює 0.5 А, що є обгрунтованим з урахуванням незначного опору поїзного шунта та шунтуючої дії дросель-трансформатора релейного кінця рейкового кола. Розрахунки проведено для консольного живлення фідерної зони, що дозволяє аналізувати вплив завад при більш жорстких умовах і не є принциповим обмеженням моделі, що розглядається.

Таким чином, більша частка тягового струму розповсюджується від поїзду в бік тягової підстанції.

Впливом дросель трансформатора живлячого кінця РК на коефіцієнт асиметрії при моделюванні знехтували.

Більш детальні результати моделювання для всіх частот РК з урахуванням впливу дросель-трансформатора планується розглянути у подальшому.

При моделюванні досліджувався вплив поздовжнього та поперечного коефіцієнту рейкової лінії на коефіцієнт асиметрії струму в рейковій лінії. Результати моделювання наведено на рис. 3-5. Коефіцієнти асиметрії визначалися як відношення модулів відповідних значень

$$K_Z = \frac{|\Delta Z|}{|Z|}; K_g = \frac{|\Delta g|}{|g|}; K_I = \frac{|I|}{|I_1 + I_2|}. \quad (39)$$

У виразах (39) вважається, що різницеві значення  $|\Delta Z|$  та  $|\Delta g|$  рівномірно розповсюджені по довжині рейкової лінії, а  $|I|$  і  $|I_1 + I_2|$  визначаються саме у точці з координатою, що досліджується (що відповідає методиці вимірювання коефіцієнту асиметрії за струмом).

Коефіцієнт асиметрії струму збільшується при збільшенні коефіцієнтів  $K_Z$ ,  $K_g$  та відстані від електропоїзду. Значне збільшення коефіцієнту  $K_I$  частково пов'язано зі зменшенням значення гармонійної завади при віддаленні від поїзду.

Слід зауважити, що різницевий струм завади частотою 25 Гц також збільшується, але не так стрімко і може мати максимум на

певній дистанції від локомотиву, значення якої залежить від опору баласту.

Менші значення коефіцієнту асиметрії при опорі баласту 50 Ом/км в порівнянні зі значеннями для 1 Ом/км (рис. 3) обумовлені тим, що поряд із збільшенням різницевого струму в рейках, відбувається значне збільшення загального струму в обох рейках.

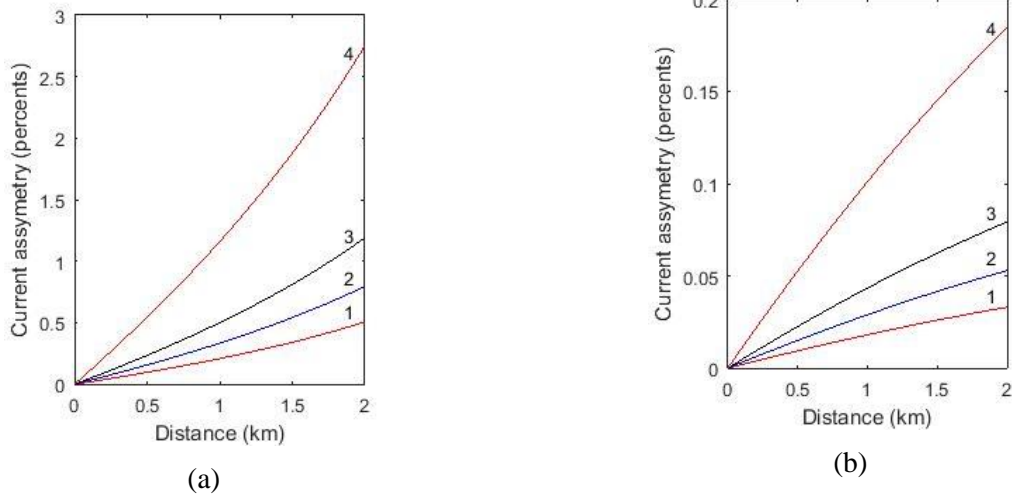


Рис. 3. Залежність коефіцієнта асиметрії РЛ за струмом від відстані до ЕРС для коефіцієнту поздовжньої асиметрії (у процентах) 1 (1), 2 (2), 3 (3), 7 (4), при опорі ізоляції рейки 1 Ом/км (а), 50 Ом/км (б) і при нульовій поперечній асиметрії

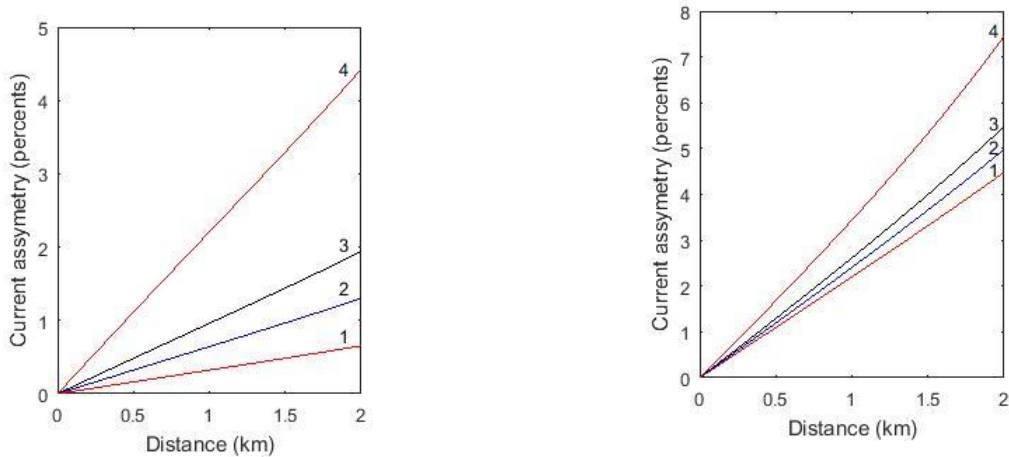


Рис. 4. Залежність коефіцієнта асиметрії РЛ за струмом від відстані до ЕРС для коефіцієнту поперечної асиметрії (у процентах) 1 (1), 2 (2), 3 (3), 7 (4) при опорі ізоляції рейки 1 Ом/км і при нульовій поздовжній асиметрії

Рис. 5. Залежність коефіцієнта асиметрії РЛ за струмом від відстані до ЕРС для коефіцієнту поздовжньої асиметрії (у процентах) 1 (1), 2 (2), 3 (3), 7 (4) при опорі ізоляції рейки 1 Ом/км і коефіцієнту поперечної асиметрії 5 %.

Поперечна асиметрія РЛ значно впливає на коефіцієнт асиметрії струму і при  $K_g = 7\%$  коефіцієнт  $K_I$  на відстані 2 км від поїзду досягає значення 4.5 %, що перевищує допустиме значення для електротяги змінного струму.

При одночасному збільшенні імпедансу і провідності баласту однієї рейки в порівнянні з другою рейкою коефіцієнт асиметрії для випадку, що розглянуто в роботі, досягав значення  $\sim 7.5\%$  на відстані 2 км від поїзду (рис. 5) при коефіцієнті поперечної асиметрії 5 % і коефіцієнті поздовжньої асиметрії 1 %, що також перевищує нормативний рівень.

### Висновки

Моделювання розповсюдження гармонійних завад в рейковій лінії, які доповнюють вимірювання рівнів завад при тестовому випробуванні нових типів ЕРС або при планових перевірках в процесі експлуатації рухомого складу, дозволяє своєчасно виявляти завади і визначити причини їх появи, а також приймати рішення по зменшенню завад. Запропоновані в літературі моделі призначені, головним чином, для розрахунку тягового струму або його гармонік у рейках, в той час як на функціональну безпеку рейкових кіл впливає, в першу чергу, значення різницевого струму в рейках. Запропоновані рішення рівнянь для несиметричної рейкової лінії отримані при певних припущеннях та містять громіздкі рішення, що ускладнює їх практичне застосування. В роботі наведено спрощену математичну модель розтікання гармонійних завад тягового струму від електрорухомого складу в рейках одноколійної дільниці для випадку незначних (порівняно з нормативними) значення коефіцієнтів асиметрії рейкової лінії.

Для апробації розробленої моделі проведено моделювання розподілення коефіцієнта асиметрії гармоніки тягового струму частотою 25 Гц від електропоїзду по довжині рейкової лінії. Відстань між електро-

поїздом і тяговою підстанцією прийнято 10 км. Передня колісна пара поїзду розташована за релейним кінцем рейкового кола довжиною 2.6 км. Діюче значення гармонійної завади частотою 25 Гц, що генерується електрообладнанням поїзду прийняте як 1 А.

В результаті моделювання показано, що коефіцієнт асиметрії струму гармоніки збільшується при збільшенні коефіцієнтів  $K_Z$ ,  $K_g$  і відстані від електропоїзду. Значне збільшення коефіцієнту  $K_I$  частково пов'язано зі зменшенням значення гармонійної завади при віддаленні від поїзду.

Менші значення коефіцієнту асиметрії при опорі баласту 50 Ом/км в порівнянні з даними для 1 Ом/км обумовлені тим, що поряд із збільшенням різницевого струму в рейках, відбувається значне збільшення загального струму в обох рейках.

Поперечна асиметрія РЛ значно впливає на коефіцієнт асиметрії струму і при  $K_g = 7\%$  коефіцієнт  $K_I$  на відстані 2 км від поїзду досягає значення 4.5 %, що перевищує допустимі значення для електротяги змінного струму. При одночасному збільшенні імпедансу і провідності баласту однієї рейки в порівнянні з другою, коефіцієнт асиметрії на відстані 2 км від поїзду досягав значення  $\sim 7.5\%$  при коефіцієнті поперечної асиметрії 5 % і коефіцієнті поздовжньої асиметрії 1 %.

### Бібліографічний список

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Карякин, Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – М.: Транспорт, – 1967. – 279с.
3. Брылеев А. М., Шишляков А. В., Кравцов Ю. А. Устройство и работа рельсовых цепей. – М.: Транспорт, – 1966. – 264 с.
4. Брылеев, А. М. Электрические рельсовые цепи / А. М. Брылеев, Н. Ф. Котляренко. – М.: Транспорт, – 1970. – 256 с.

5. Hill, R. J. Electric railway traction. Part 6: Electromagnetic compatibility disturbance-sources and equipment susceptibility // Power Engineering Journal. – 1997. – Т. 11. – №. 1. – С. 31-39.
6. Mariscotti, A. Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Т. 18. – №. 4. – С. 1422-1432.
7. Гаврилюк, В. И. Анализ электромагнитного воздействия тягового электроснабжения на работу рельсовых цепей и моделирования протекания тягового тока в рельсах // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2003. – №. 1. – С. 6-10.
8. Gavrilyuk V., Zavgorodnij A. The modelling of electromagnetic influence of traction electrosupply system on railway circuits // Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska. – 2004. – №. 55. – С. 131-136.
9. Sichenko V. G., Gavrilyuk V. I. The theoretical and experimental researches of electromagnetic influence from a traction electrosupply system on a railway circuits // IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 2005. – IEEE, 2005. – С. 41-43.
10. Serdyuk T. N., Gavrilyuk V. I. Experimental investigation of influence of AC traction current on the rail circuits // IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 2005. – IEEE, 2005. – С. 44-46.
11. Havryliuk, V. Modelling of the Return Traction Current Harmonics Distribution in Rails for AC Electric Railway System // 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). – IEEE, 2018. – С. 251-254.
12. Брылеев А. М., Кравцов Ю. А., Шишляков А. В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей // М.: Транспорт. – 1978.
13. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
14. Кравцов Ю.А., Мащенко П.Е., Щербина Е. Г. Электромагнитное влияние перспективного электроподвижного состава на устройства железнодорожной автоматики: Учебное пособие. - М.: МИИТ, 2012. – 117 с.
15. Bin Wang. Harmonic power flow calculation for high-speed railway traction power supply system / Bin Wang, Xu dong Han, Shi bin Gao, Wen Huang, Xiao feng Jiang // Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT2013). Volume I. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – P.11-25.
16. Wen Huang. Study on distribution coefficient of traction return current in high-speed railway / Wen Huang, Zhengyou He, Haitao Hu, Qi Wang // Energy and Power Engineering. – 2013. – No 5. – P. 1253-1258.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність, рейкові кола, рухомий склад, тяговий струм

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, рельсовые цепи, подвижной состав, тяговый ток

**Key words:** electromagnetic compatibility, track circuits. rolling stock, traction current

**Рецензенти:**

проф., д.т.н., А. Б. Бойник,  
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 12.04.2018.

Прийнята до друку 23.04.2018.