

УДК 656.259.2

В. В. МЕЛЕШКО – АТ «Укрзалізниця», soyuz_at@gmail.com,
ORCID 0000-0001-6833-964.

ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ СТРУМ ГАРМОНІЧНИХ ЗАВАД В РЕЙКОВІЙ ЛІНІЇ ВІД ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ НОРМАТИВНИХ ЗНАЧЕННЯХ КОЕФІЦІЄНТА АСИМЕТРІЇ

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 електрорухомого складу (ЕРС) під час їх тестових випробувань з моделюванням електромагнітного впливу електричного обладнання рухомого складу на рейкові кола обговорювалося у багатьох роботах [7-9]. Проблема полягає у тому, що нові типи електрорухомого 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 перевищують 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 диференційного струму в двох рейках. Причиною появи диференційного 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 багатопрвідних 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 протікання диференційного струму гармонічних завад в рейковій лінії від електрорухомого складу при нормативних зна-

ченнях коефіцієнта асиметрії та оцінка похибки моделі.

Для досягнення мети в роботі поставлено такі завдання: надати короткий аналіз проблеми, розглянути математичну модель, та навести результати оцінки похибки моделі.

Аналіз проблеми

Тягова мережа є багатопровідною поздовжньо неоднорідною лінією з розповсюдженими параметрами [1-3]. Для поздовжньо однорідних (за певними припущеннями) дільниць 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 тягової мережі між поїздом та дросель-трансформатором наведена на рис. 1.

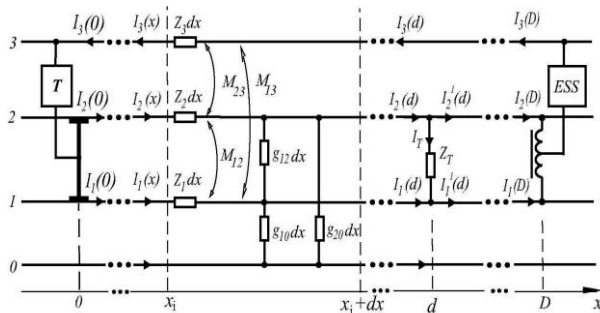


Рис. 1. Еквівалентна схема тягової мережі між поїздом та дросель-трансформатором

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 \underline{M}_{12} , \underline{M}_{13} , \underline{M}_{23} .

Диференціальні рівняння для векторів комплексних напруг \vec{U}_i і струмів \vec{I}_i в матричному вигляді запишемо у наступному 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; $\underline{Y} = \{Y_{ij}\}$ ($i \neq j$) - 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 однієї зони живлення тягової мережі з одним локомотивом у фідерній зоні з координатою x_{E1} граничні умови є такими [7, 11]. Для $x = D$

$$U_3(x=0) = U_{TIII}, \quad (8)$$

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

Для $x = 0$ 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

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

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

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. 1, Схема є типовою і розглянута у літературі [3]. Початок координат взято у точці знаходження ЕРС, як генератора гармонійних завод, 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).

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 $I_o = I_1 + I_2$; $U_o = (U_1 + U_2) / 2$, отримаємо

$$i_1 = \frac{1}{2} (i_o - i_d) = \frac{i_o}{2} (1 - \underline{K}_l); \quad (16)$$

$$i_2 = \frac{1}{2} (i_o + i_d) = \frac{i_o}{2} (1 + \underline{K}_l); \quad (17)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_o - \frac{\dot{U}_d}{2} = \dot{U}_o \left(1 - \frac{\underline{K}_v}{2} \right); \quad (18)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_o + \frac{\dot{U}_d}{2} = \dot{U}_o \left(1 + \frac{\underline{K}_v}{2} \right), \quad (19)$$

де $\underline{K}_l = i_d / i_o$ і $\underline{K}_v = \dot{U}_d / \dot{U}_o$ комплексні коефіцієнти асиметрії за струмом та напругою.

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

$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{2} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2); \quad \Delta \underline{Z} = \underline{Z}_1 - \underline{Z}_2; \quad (20)$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 + \frac{1}{2} \Delta \underline{Z};$$

$$Z_2 = Z_0 - \frac{1}{2} \Delta Z; \quad (21)$$

$$g_0 = g_1 + g_2; \quad \Delta g = g_1 - g_2; \quad (22)$$

$$g_1 = \frac{1}{2}(g_0 + \Delta g); \quad g_2 = \frac{1}{2}(g_0 - \Delta g); \quad (23)$$

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

$$\frac{d\dot{U}_0}{dx} = -\frac{1}{2}(Z_0 + Z_i)\dot{I}_0 + \frac{\Delta Z}{4}\dot{I}_d + Z_M\dot{I}_3; \quad (24)$$

$$\frac{d\dot{U}_d}{dx} = \frac{\Delta Z}{2}\dot{I}_0 - (Z_0 - Z_i)\dot{I}_d; \quad (25)$$

$$\frac{d\dot{I}_0}{dx} = -g_0\dot{U}_0 + \frac{\Delta g}{2}\dot{U}_d; \quad (26)$$

$$\frac{d\dot{I}_d}{dx} = \Delta g\dot{U}_0 - \frac{g_0}{2}\dot{U}_d. \quad (27)$$

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

$$\frac{d^2\dot{U}_d}{dx^2} - P\dot{U}_d = Q\dot{U}_0; \quad (28)$$

в яких

$$P = \frac{1}{2}(Z_0 - Z_i)g_0 + \frac{1}{4}\Delta Z\Delta g; \quad (29)$$

$$Q = -(Z_0 - Z_i)\Delta g - \frac{1}{2}\Delta Zg_0. \quad (30)$$

Рівняння (32), (33) можна переписати через коефіцієнти поздовжньої $K_z = \frac{\Delta Z}{Z_0}$ і поперечної $K_g = \frac{\Delta g}{g_0}$ асиметрії у вигляді

$$P = \frac{1}{2}\gamma^2 \left(1 - \frac{Z_i}{Z_0} + \frac{1}{2}K_zK_g \right); \quad (31)$$

$$Q = -\gamma^2 \left[\left(1 - \frac{Z_i}{Z_0} \right) K_g + \frac{1}{2}K_z \right]. \quad (32)$$

Різницевий струм в рейках визначається з (28) у вигляді

$$\dot{I}_d = \frac{\Delta Z}{2(Z_0 - Z_i)}\dot{I}_0 - \frac{1}{(Z_0 - Z_i)}\frac{d\dot{U}_d}{dx}. \quad (33)$$

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

Рішення однорідного диференційного рівняння має вигляд

$$\dot{U}'_d = C_1 \exp(\gamma x) + C_2 \exp(-\gamma x). \quad (34)$$

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

$$\dot{U}_d = -\dot{I}_s Z_{TE}, \quad \text{при } x = x_e, \quad (35)$$

де Z_{TE} імпеданс дросель-трансформатора з підключеним до нього навантаженням.

Оцінка похибки моделі

В якості експериментальних даних взято часові залежності та спектральний склад тягового струму локомотиву, що виміряні одночасно в силовому ланцюзі електропоїзда та в рейковій лінії

Адекватність розробленої моделі була підтверджена вимірюваннями струму під час руху поїзда вздовж горизонтальної прямої ділянки колії зі швидкістю ~6 км/год з контролем незмінності тягового струму. Перед випробуваннями вимірювали коефіцієнти поздовжньої та поперечної асиметрії рейок цієї колії. Були отримані наступні результати: $K_g \approx 0$, $K_z \approx 2\%$. Коефіцієнт асиметрії K_{uf} розраховувався відповідно до прийнятої у галузевих нормативних документах методики на основі вимірюваних напруг на двох половинях обмотки дросель-трансформатора відносно

його середньої точки [3]. Напруги вимірювались у певні моменти часу відповідно до сигналу з поїзду, коли він проходив через контрольні точки, розташовані на відстані 50 м одна від одної в межах від 800 до 500 м відносно колійного трансформатора.

Результати вимірювань та розрахунків коефіцієнтів асиметрії напруги залежно від відстані до колійного трансформатора наведені на рис. 2, а відносні значення різниці між вимірюваними та обчисленими значеннями наведені в табл. 1. Виміряні значення мають випадкову складову (рис. 2), а також систематичну помилку, яка, ймовірно, пов'язана з неточністю вимірювань коефіцієнтів K_z і K_g . Загалом, результати розрахунків задовільно відповідають результатам вимірювань.

Висновки

Розроблено спрощену модель розрахунку розподілу диференційного струму і напруги гармонік тягового струму в електрично несиметричних рейках для системи живлення змінного струму для коефіцієнтів асиметрії рейкової лінії в межах нормативних значень.

На першому етапі моделювання розраховується розподіл загального струму тягової гармоніки в двох рейках між поїздом та тяговою підстанцією. Потім за допомогою коефіцієнтів асиметрії рейок визначається розподіл диференційного струму і напруги гармонік у двох рейках між поїздом і найближчим колійним дросель-трансформатором або між двома колійними трансформаторами.

Адекватність розробленої моделі було підтверджено порівнянням результатів моделювання з результатами експериментальних вимірювань. Для максимальної в експерименті відстані поїзда від дросель-трансформатора (800 м) відносна похибка була 9,7 %. При наближенні поїзда до дросель-трансформатора відносна похибка зменшувалася до ~5 %.

Виміряні значення мають випадкову складову і систематичну помилку, яка, ймовірно, пов'язана з неточністю вимірювань коефіцієнтів повздовжньої і поперечної асиметрії рейкової лінії K_z і K_g . Загалом, результати розрахунків задовільно відповідають результатам вимірювань.

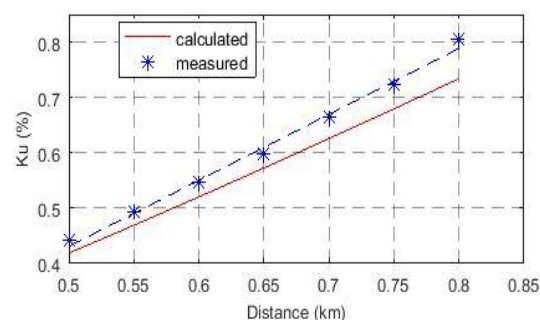


Рис. 2. Залежність коефіцієнта асиметрії напруги для гармоніки тягового струму 50 Гц в рейках від відстані від поїзда до колійного трансформатора

Таблиця 1

Відносна різниця між вимірюваними та обчисленими значеннями коефіцієнта асиметрії напруги K_{Uf}

x (km)	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
K_{Uf} (%)	5.4	5.0	5.0	4.9	6.1	6.4	9.7

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. – P. 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., Машенко 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.

Keywords: 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 29.04.2019.
Прийнята до друку 15.05.2019.