

1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

УДК 621.331 : 621.332

ГАВРИЛЮК В. І. – д.ф.-м. н., професор (ДНУЗТ)

МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ТЯГОВОГО СТРУМУ НА ТОНАЛЬНІ РЕЙКОВІ КОЛА

Вступ

Забезпечення електромагнітної сумісності тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматики є важливою науково практичною задачею, актуальність якої останнім часом зростає в зв'язку з появою нових типів електрорухомого складу з асинхронним тяговими двигунами (АТД), а також мікроелектронних систем управління рухом поїздів [1-4]. Визначення впливу тягової мережі на рейкові кола (РК), які є основними колійними датчиками місцезнаходження поїздів та цілісності рейкових ліній (РЛ) на магістральному залізничному транспорті, ускладнюється внаслідок великої кількості факторів, що безпосередньо визначають тяговий струм в рейковій лінії, а саме, - кількість локомотивів в фідерній зоні і режими їх роботи, коливання напруги в тяговій мережі, опір ізоляції рейкової лінії від землі і т.д. Значна кількість перерахованих факторів має випадковий характер.

Випадковими є також і параметри і характеристики рейкових кіл і колійних приймачів (КП), на основі яких визначають граничні норми електромагнітних завад в рейковій лінії.

На важливість врахування випадкового характеру електромагнітних завад і граничних рівнів мікроелектронних пристроїв безпеки на залізничному транспорті при визначенні нормативних параметрів електромагнітної сумісності зверталася увага в [5, 6].

Але в більшості наукових публікацій з електромагнітної сумісності тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматики ймовірнісний характер параметрів і характеристик джерел і рецепторів електромагнітних завад не враховується.

Метою роботи є розробка ймовірнісної моделі електромагнітного впливу тягового струму на колійні приймачі тональних рейкових кіл для визначення на цій основі ймовірності збою в роботі РК.

Ймовірнісна модель

Методика і результати вимірювань залежності тягового струму від часу для локомотивів змінного струму з АТД описані в попередніх роботах авторів [4,7-9]. Вимірювання проводили безпосередньо в силовому ланцюзі локомотиву, а також в рейковій лінії при певних відстанях від точки вимірювання до локомотиву $\Delta x = 0, 0.5$ і 1 км для різних режимів руху локомотиву, а саме при наборі швидкості, під час вибігу та в режимі рекуперативного гальмування.

Залежність тягового струму від часу мала складний характер і для більшості результатів вимірювань уявляла собою випадкову неперіодичну функцію часу [4-9]. В результаті вимірювань випадкових залежностей струму від часу на локомотиві $i_L(t)$ і в рейкових лініях $i_R(\Delta x, t)$ (де Δx - відстань від точки вимірювання до локомотиву), отримано ансамблі реалізацій цих випадкових функцій. Для оцінки статистичних параметрів випадкового процесу з осцилограм тягового струму були обрані певні дискретні вибірки на довжині реалізації $T_E = N \Delta t_d$ (де Δt_d - період дискретизації), для яких випадкові процеси можна було вважати практично стаціонарним, і які були достатньо представницькими для проведення статистичного аналізу [10, 11]. Гіпотеза про стаціонарність обраних вибірок в широкому сенсі [10, 11] перевірялася для реалізацій в різні моменти на довжині вибі-

рки $i_L(n\Delta t_d)$ і $i_R(\Delta x, n\Delta t_d)$ за першими моментами випадкового процесу по критерію Кокрена.

Для аналізу випадкових функцій додатково до одновірних функцій розподілу щільності ймовірності параметрів тягового струму використовували кореляційну та автокореляційну функції, які дорівнюють статистичному усередненому добутку значень центрованої функції струму в різні моменти часу t і $t + \tau$ [10, 11].

Для дискретних вибірок $i_L(n) = i_L(n \cdot \Delta t_d)$ на інтервалі реалізації T автокореляційну функцію обчислювали за формулою [10, 11]

$$K_L(m) = \begin{cases} \frac{1}{n-|m|} \sum_{n=1}^{N-|m|} i_L(n) \times \\ \times i_L^*(n+m), \text{ для } m \geq 0 \\ K_i(-m), \text{ для } m < 0, \end{cases}$$

де $m = 1..N$ - поточний індекс, $i_L^*(n+m)$ - комплексно-сполучена функція струму $i_L(n+m)$.

Кореляційну функцію, дискретних вибірок $i_L(t_n)$ та $i_R(t_n)$ на інтервалі реалізації T обчислювали, відповідно, за формулою

$$K_{LR}(m) = \begin{cases} \frac{1}{n-|m|} \sum_{n=1}^{N-|m|} i_L(n) \times \\ \times i_R^*(n+m), \text{ для } m \geq 0 \\ K_i(-m), \text{ для } m < 0. \end{cases}$$

Автокореляційні $K_L(m)$ та кореляційні $K_{LR}(m)$ функції, що були розраховані для різних реалізацій тягового струму локомотиву, мали симетричну форму відносно осі ординат, амплітуди функцій достатньо швидко зменшувалися при збільшенні поточного індексу m . Така поведінка кореляційних функцій вказує на наявність прихованої періодичності за основною та іншими гармоніками, а також на присутність в тяговому струмі адитивних завад. Таким чи-

ном, тяговий струм можна представити у вигляді додатку стаціонарної детермінованої компоненти тягового струму, яка обумовлена режимом ведення поїзду, та випадкової складової

$$i_R(t) = m_R(t) + \varepsilon_R(t),$$

де $m_R(t)$ - математичне очікування тягового струму, $\varepsilon_R(t)$ - випадкова складова, яка залежить від часу. Аналіз показав, що $\varepsilon_R(t)$ має нормальний закон розподілу. Гіпотеза про нормальний закон розподілу амплітуд завад підтверджена за критерієм χ^2 Пірсона.

Кожна реалізація випадкової функції є детермінованою функцією і її можна розкласти на періоді реалізації $[0, T]$ в ряд Фур'є. Для проведення спектрального аналізу в роботі використано метод швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), реалізований у пакті Signal Processing Toolbox (Matlab).

Статистичний аналіз результатів спектрального аналізу різних реалізацій тягового струму, виміряних для однакових режимів руху локомотиву, дозволив визначити функції розподілу та статистичні характеристики гармонік тягового струму в різних режимах.

На рис. 1 наведено функцію розподілу щільності ймовірності діючого значення напруги гармоніки частотою 420 Гц на вході колійного приймача ТРК під час руху поїзду в режимі набору швидкості.

Для ймовірнісного аналізу впливу цієї гармоніки на колійний приймач (КП) тонального рейкового кола (ТРК) частотою 420 Гц в роботі проведено вимірювання і аналіз розподілу напруги спрацьовування U_C і напруги відпускання U_B колійних приймачів типу КП-1 з робочою частотою сигнального струму 420 Гц. Вимірювання проводили для десяти КП при різних значеннях напруги живлення (що змінювалася в допустимих межах) і при різних зовнішніх умовах (температурі, вологості і т.д.). Всього було отримано 100 значень напруги спрацьовування і 100 значень напруги відпускання колійного приймача. Статистичну

гіпотезу про нормальний закон розподілу значень напруги спрацьовування U_C і напруги відпускання U_B перевірено за критерієм χ^2 Пірсона на рівні значності 0.05. Значення математичного очікування і середне-квадратичне відхилення напруги U_C і U_B дорівнюють, відповідно: $m_{U_C}=0.349$ В, $m_{U_B}=0.244$ В, $\sigma_{U_C}=0.0197$ В, $\sigma_{U_B}=0.0137$ В. Гістограми розподілу напруги

U_C і U_B та функції розподілу щільності ймовірності випадкових значень наведено на рис. 1.

Як видно із рисунку, існує ймовірність, що напруга завади частотою 420 Гц на колійному приймачі при деяких найбільш несприятливих умовах буде вище напруги відпускання і, навіть, спрацьовування колійного приймача, що може привести до заважаючого або

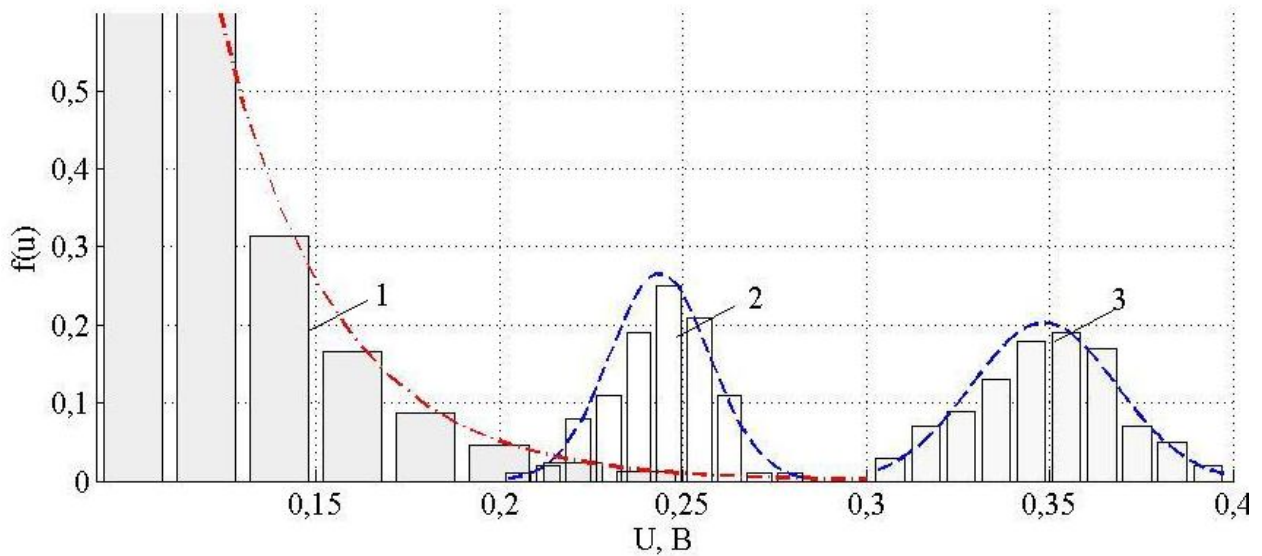


Рис. 1. Функції розподілу щільності ймовірності амплітуди гармонійної завади частотою 420 Гц на вході КП (1), напруги відпускання (2) та спрацьовування (3) КП ТРК частотою 420 Гц

небезпечного впливу тягового струму на роботу рейкових кіл.

Збій в роботі рейкових може виникнути при зменшенні напруги на вході КП в нормальному режимі $U_{КПН}$ нижче напруги спрацьовування колійного приймача U_C ($U_{КПН} < U_C$) або збільшення напруги на вході КП в шунтовому режимі $U_{КПШ}$ вище напруги відпускання U_B ($U_{КПШ} > U_B$). Аналогічно можна записати для критеріїв виконання контрольного режиму.

Ймовірності, відповідно, першої і другої події дорівнює

$$P\{U_{КПН} < U_C\} = \int_0^{U_C} f(U_{КПН}) dU_{КПН},$$

$$P\{U_{КПШ} > U_B\} = \int_{U_B}^{\infty} f(U_{КПШ}) dU_{КПШ}.$$

Ймовірність попадання напруги на вході колійного приймача в інтервал $(U_1, U_1 + dU)$ при спрацьовуванні і відпусканні КП дорівнює, відповідно

$$\begin{aligned} P\{U_C \in (U_1, U_1 + dU)\} &= \\ &= f(U_1) dU, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P\{U_B \in (U_1, U_1 + dU)\} &= \\ &= f(U_1) dU. \end{aligned}$$

Оскільки перераховані вище події є попарно незалежними, ймовірності збою в роботі РК в нормальному P_{3H} і шунтовому $P_{3Ш}$ режимі дорівнює добутку ймовірностей для всіх можливих значень

$$P_{3H} = P\{[U_C \in (U_C, U_C + dU_C)] \cap [U_{КПН} < U_C]\} = \int_0^{\infty} f(U_C) \left[\int_0^{U_C} f(U_{КПН}) dU_{КПН} \right] dU_C,$$

$$P_{3Ш} = P\{[U_B \in (U_B, U_B + dU_B)] \cap [U_{КПШ} < U_B]\} = \int_0^{\infty} f(U_B) \left[\int_{U_B}^{\infty} f(U_{КПШ}) dU_{КПШ} \right] dU_B.$$

З одержаних рівнянь можна визначити ймовірність збою в роботі РК для конкретних параметрів статистичного розподілу напруги на вході приймача для нормального і шунтового режимів роботи рейкових кіл.

Висновки

В роботі на основі результатів статистичного аналізу гармонійних завод від тягового струму локомотиву з АТД, запропоновано ймовірнісну модель електромагнітного впливу тягового струму на колійні приймачі тональних рейкових кіл. На основі розробленої моделі можна визначити ймовірність збою в роботі РК для конкретних параметрів статистичного розподілу напруги завод від тягового струму на вході приймача рейкового кола для нормального і шунтового режимів роботи.

Література

1. Ермоленко, Д. В. Улучшение электромагнитного воздействия тиристорного подвижного состава и системы тягового электропитания [Текст] / Д. В. Ермоленко, В. И. Павлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – №8. – С.25 - 30.
2. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст]: учебник для вузов ж.-д.

трансп. / М. П. Бадер. – М: УМК МПС, 2002. – 638 с.

3. Косарев, А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / А. Б. Косарев. – М.: Интекст, 2004. – 272 с.
4. Гаврилюк, В. І. Аналіз впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл [Текст] / В. І. Гаврилюк, А. В. Завгородній // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 2. – С. 37-39.
5. Бочков, К. А. Вероятностный метод определения уровней ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности [Текст] / К. А. Бочков, Н. В. Рязанцева // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость (труды Международного Гомельского семинара). – 2001. – С. 20-29.
6. Бочков, К. А. Нормирование параметров ЭМС с учетом реальной электромагнитной обстановки [Текст] / К. А. Бочков, Н. В. Рязанцева // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость (труды Международного Гомельского семинара). – 2001. – С. 35-42.
7. Гаврилюк, В. І. Испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с рельсовыми цепями [Текст] / В. І. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 3/2. – С. 192-194.
8. Загородний, А. В. Методические аспекты определения уровней опасного и мешающего влияния подвижного состава на работу рельсовых цепей [Текст] / А. В. Завгородний, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Вісник Дніпропетровськ. національного університету залізничного тр-ту ім. ак. В. Лазаряна. – 2005. – № 9. – С. 11-14.
9. Гаврилюк, В. І. Електромагнітний вплив тягової мережі на рейкові кола. Моделювання тягового струму в рейковій лінії [Текст] / В. І. Гаврилюк, О. В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – № 4. – С. 53-57.
10. Ивановский, Р. И. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб.

пособие / Р. И. Ивановский. – СПб.: БХВ, 2008. – 528 с.

11. Пугачев, В. С. Теория вероятностей и математическая статистик [Текст]: учеб. пособие / В. С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 2002. – 496 с.

Ключові слова: залізнична автоматика, електромагнітна сумісність, тяговий струм, рейкові кола, ймовірнісний аналіз.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика, электромагнитная совместимость, тяговый ток, рельсовые цепи, вероятностный анализ.

Key words: railway automatics, electromagnetic compatibility, traction current, track circuit, probabilistic analysis.

Надійшла до редколегії 13.09.2011.

Прийнята до друку 16.09.2011.