

УДК 656.259.1

Т. М. СЕРДЮК – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru

В. В. МЕЛЕШКО – заступник начальника Департаменту автоматики, телемеханіки та зв'язку, ПАТ Укрзалізниця, soyuz@mail.ru

В. І. ГАВРИЛЮК – д.фіз.-мат.н., професор, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, gvi_dp@ukr.net

МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вступ

Розрахунки режимів систем тягового електропостачання не можуть бути замінені будь-якими вимірами, оскільки вони супроводжуються великою кількістю ручних операцій, пов'язаних із високою напругою, організацією робочих місць і бригад для виконання робіт, тобто є трудомісткими, небезпечними і коштовними. До того ж місцезнаходження поїзда на фідерній зоні, профіль ділянки, зміна режимів ведення електровозу, тип локомотива суттєво впливають на результати вимірів розподілу струму та напруги на дослідній ділянці.

Отже моделювання системи тягового електропостачання з метою визначення розподілу тягового струму і його гармонійних складових, напруги та втрат потужності є особливим видом науково-дослідної й проектно-експлуатаційної діяльності.

Зі збільшенням перевезень збільшується й тяговий струм, а відповідно і електромагнітний вплив на інші кола. Отже зі збільшенням використання електричної тяги, потрібно вирішити задачу захисту суміжних електричних ліній від впливу, що заважає або є небезпечним. На сьогодні вимоги до електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з кодовими рейковими колами значно зросли в зв'язку з широким використанням на залізничному транспорті нових науково-технічних рішень, пов'язаних з використанням мікропроцесорної техніки. Застосування схем керування, пристроїв регулювання тяги і га-

льмування, інформаційних шин, що охоплюють усі системи рухомого складу, диспетчерської та електричної централізації, побудованих на мікропроцесорній базі, ставить особливо високі вимоги до стійкості цих компонентів стосовно сторонніх електромагнітних полів. Рівень завад, які виникають внаслідок роботи сучасної перетворювальної техніки, що використовується для управління роботою локомотиву, значно зріс, тому при комутації виникають коливання значних потужностей з високою тактовою частотою і токовими імпульсами великого значення. На залізничному транспорті додаткові складності при забезпеченні електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями СЦБ викликані високою щільністю компонування устаткування на рухомому складі, де силові обладнання і системи керування розташовуються поруч, рухом поїздів поблизу пристроїв зв'язку і сигналізації, а також трасуванням ліній зв'язку і СЦБ паралельно контактної мережі.

Тому вирішення проблем електромагнітної сумісності пристроїв СЦБ з системою тягового електропостачання є актуальною задачею. А адекватне моделювання систем електропостачання залізниць дозволить уникнути помилок при розрахунку режимів електропостачання, розподілу гармонійних завад тягового струму по довжині фідерної зони й визначенні їх впливу на роботу пристроїв залізничної автоматики, зокрема, рейкових кіл з метою забезпечення їх засобами захисту за необхідністю.

Для вирішення поставленої задачі необхідно: дати наукове обґрунтування методу виміру гармонійних завад зворотного тягового струму; удосконалити математичну модель розповсюдження гармонік зворотного тягового струму по довжині фідерної зони дільниць з однобічним електроживленням; провести аналіз спектрального складу зворотного тягового струму й визначити найбільш небезпечні завади та джерела їх виникнення.

Обраний напрям дослідження відповідає Концепції комплексної Програми розвитку залізничного транспорту України на 2007–2020 рр., яка є основою цільових програм оновлення та розвитку засобів залізничної автоматики.

Математична модель системи тягового електропостачання одноколіїної дільниці

Вперше рівняння двопровідної довгої лінії були отримані Кірхгофом і Хевісайдом. Однак поширеними вони стали лише тоді, коли Пуанкаре дослідив їх рішення. Виведення формул для розрахунку напруги та струму в лініях з розподіленими параметрами методом чотириполюсника з використанням гіперболічних функцій докладно описані. Аналіз розвитку теорії довгих ліній показав, що існує два основних напрямки в розрахунках електричних режимів довгих ліній: рішення за допомогою гіперболічних функцій і використання електричних схем [1].

Так, Соколов М. І. і Соколова Р. Н. займалися дослідженням хвильових і напівхвильових ліній, оцінювали їх роботу зі змінною частоти і можливості роботи напівхвильових ліній без установки. У результаті довгу лінію вони заміняють П-подібним чотириполюсником для обліку взаємоіндукції. Рішенням є матриці опорів і провідності в залежності від координати і коефіцієнта корисної дії [2].

Беляков Ю. С. розраховував взаємоіндукції довгих ліній електропередач. При цьо-

му для дослідження їм була обрана двухпровідна лінія. За відомими нульовими послідовностями опорів проводів (індуктивним) та ізоляції (ємнісним) була отримана матриця вузлових провідностей. При вирішенні використовувалася система з гіперболічними функціями [3].

Коровкін Н. В. і Селіна О. Є. досліджували хвильові процеси в системах з розподіленими параметрами методом синтетичних схем. Цей метод можна застосовувати для ліній без втрат, які опромінюються магнітним полем. Система в цілому представляється як сукупність пристроїв, описаних телеграфними рівняннями, і сукупністю з'єднаних кінцевих пристроїв, які описуються нелінійними схемами заміщення. Моделювання проведено при дії на схему лінії короткочасних імпульсів електромагнітного поля (до 1000) [4].

Слід зазначити, більшість математичних моделей не враховують або зневажають, спрощують деякі параметри рейкових кіл та схеми заміщення електричних тягових мереж. Тому дуже важливо було уточнити схему заміщення так, щоб стало можливим враховувати більше число чинників, що впливають на розподіл гармонік струму і напруги в них, визначити джерела завад, що впливають на передачу сигнальних струмів по рейкових колах; теоретично проаналізувати розподіл гармонік напруги і струмів по довжині фідерної зони, знаючи спектральний склад тягового струму, визначений експериментально.

Математична модель системи тягового електропостачання одноколіїної дільниці з однобічним електроживленням і двома електровозами на дільниці дана на рис. 1. Для оцінки ступеня впливу гармонік тягового струму на роботу рейкових кіл пропонується скористатися спрощеною схемою заміщення елементарного відрізка Δx тягової мережі, представленої на рис. 2, де тягова мережа представлена контуром: контактна мережа–рейки [5].

Передбачається, що зворотній тяговий струм повертається на підстанцію по рей-

ковим ниткам і пропуск струму може бути як однопровідний, так і двопровідний. На схемі дві рейкові нитки одноколіїної ділянки замінені одним колом і представлені контуром рейкова лінія – земля.

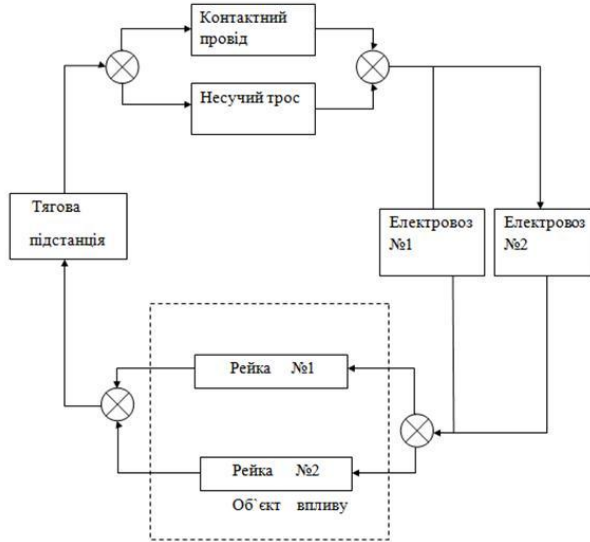


Рис. 1. Математична модель системи тягового електропостачання одноколіїної ділянки з однобічним електроживленням

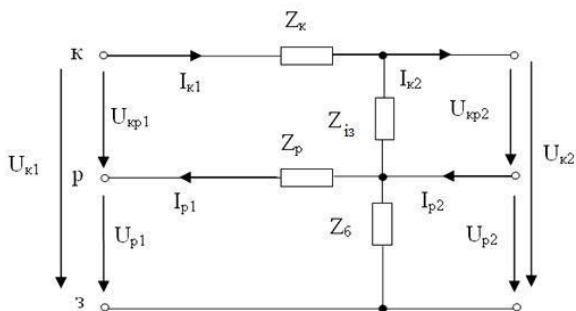


Рис. 2. Схема заміщення елементарного відрізка тягової мережі Δx одноколіїної електрифікованої ділянки

Як відомо, тяговий струм до електровозу передається по контактній мережі, яка включає в себе контактний дріт і несучий трос, з'єднані між собою струнами по всій довжині анкерної ділянки. Контактна мережа у схемі заміщення також представлена одним дротом.

В результаті тягова мережа розглядається як шестиполісник, в якому Z_k – опір контактної мережі, з урахуванням опору

взаємоіндукції, Z_p – опір рейкової мережі з урахуванням опору взаємоіндукції в контурі: рейкові нитки – контактна мережа, Z_{iz} – опір ізоляції контактної мережі, що враховує заземлення на рейки різних залізничних конструкцій (головним чином опор контактної мережі, постів секціонування, роз'єднувачів, розрядників і т.д.), Z_b – опір баласту, який являє собою опір, який чиниться струму витоку від рейкових ниток через шпали, баласт і земляне полотно.

Така схема заміщення є досить простою і зручною для розгляду питань розподілу гармонік, що містяться в тяговому струмі, по довжині фідерної зони та обліку їх впливу на роботу пристроїв автоматики, зокрема, рейкових кіл (РК), її елементів і системи автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС).

У загальному випадку опір дротів та ізоляції змінюється залежно від погодних та експлуатаційних умов у межах зазначених нижче. Опір баласту (ізоляції рейкових ниток) складається з опорів рейок – рейкове скріплення – шпала – баласт – земляне полотно – земля і може бути визначене за формулою:

$$r_b = r_{pk} + \frac{\rho}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{1}{a_{екв} \cdot a_p} \right), \quad (1)$$

де ρ – питомий опір ґрунту; $a_{екв}$ – еквівалентний радіус земляного полотна, рівний 1 м для одноколіїної ділянки і 2 м – для двоколіїної ділянки; a_p – постійна поширення рейкової мережі; r_{pk} – перехідний опір рейок – земля [6].

Опір ізоляції рейкового кола становить при щебеневому баласті 2 Ом×км, сухому і слабо промерзлому баласті 50 Ом×км, сильно промерзлому – 50...100 Ом×км. Мінімальний опір ізоляції для нормального функціонування рейкових кіл має становити не менш 1 Ом×км [6, 7].

Перехідний опір рейки – земля $r_{\text{пк}}$ залежить від типу баласту і становить 0,5...1 Ом×км при чистому щебеневому баласті, 0,3...0,5 Ом×км при брудному щебеневому баласті, 0,15...0,3 Ом×км при піщаному баласті, 0,1...0,15 Ом×км при баласті з домішкою глини. При збільшенні вологості перехідний опір зменшується в 1,5...2,5 рази, при промерзанні збільшується у 3...10 разів [6 – 8].

На електрифікованих залізницях до рейок приєднують споруди та конструкції, що мають зв'язок із землею [7]: опори контактної мережі, пости секціонування (ПСК), роз'єднувачі, розрядники, світлофори, релейні шафи та інше. Заземлення виконуються сталевим проводом діаметром 12 мм при електричній тязі постійного струму і 10 мм при електричній тязі змінного струму. В особливо небезпечних місцях (наприклад, опори контактної мережі з секційними роз'єднувачами, розрядниками, ПСК, пунктів паралельного з'єднання, опори і конструкції в небезпечних місцях та місцях, де здійснюється посадка (висадка) пасажирів, на переїздах, мостах, шляхопроводах) заземлення виконують подвійним проводом.

Опір залізобетонних опор в суху погоду при високій температурі навколишнього середовища і при самих сильних морозах становить 10...10³ кОм, при вологій погоді і під час дощу опір знижується до 0,5...0,8 кОм. Після дощу воно повертається до вихідного значення за 10...15 год. Таким чином, в дощову погоду струми витoku сигнального та тягового струму різко зростають, а опір залізобетонних конструкцій знижується до декількох сотень Ом.

Опір заземлення залізобетонних опор становить 10...40000 Ом. В основному воно залежить від провідності баласту в шарі між хомутами і арматурою, наявності електроізоляційних покриттів на фундаментах і заставних деталях. Опір заземлення релейних шаф світлофорних щогл – 20...3000 Ом [7, 9, 10].

Опір рейкової мережі включає в себе активний і індуктивний опір рейок, опір електричних з'єднувачів і опір вторинних обмоток дросель-трансформаторів, що використовуються для пропуску зворотного тягового струму, а також опір взаємоіндукції контактна мережа – рейки. Величина цього опору залежить від типу контактної підвіски і може бути визначена за допомогою [5, 9, 10].

Схема заміщення (рис. 2) характерна для кожної гармоніки, що міститься у зворотному тяговому струмі. Нижче розглянуто питання розподілу напруги і струмів по довжині тягової мережі для випадку, коли ділянка є однорідною. Система рівнянь для струмів і напруг в тяговій мережі, складена за законами Кірхгофа, має вигляд:

- для тягової мережі

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{кр}1} = \dot{I}_{\text{к}1} \cdot Z_{\text{к}} + \dot{U}_{\text{кр}2} + \dot{I}_{\text{п}1} \cdot Z_{\text{п}} \\ \dot{I}_{\text{к}1} = \dot{I}_{\text{к}2} + \dot{U}_{\text{кр}2} / Z_{\text{із}} \end{cases}, \quad (2)$$

- для контуру контактна мережа – земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{к}1} = \dot{I}_{\text{к}1} \cdot Z_{\text{к}} + \dot{U}_{\text{к}2} \\ \dot{I}_{\text{к}1} = \dot{I}_{\text{к}2} + \dot{U}_{\text{кр}2} / Z_{\text{із}} \end{cases}, \quad (3)$$

- для контуру колійна мережа – земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{п}1} = -\dot{I}_{\text{п}1} \cdot Z_{\text{п}} + \dot{U}_{\text{п}2} \\ \dot{I}_{\text{п}1} = \dot{U}_{\text{п}2} \cdot \frac{1}{Z_{\text{б}}} + \dot{I}_{\text{п}2} \end{cases}, \quad (4)$$

де $\dot{U}_{\text{кр}1}$, $\dot{U}_{\text{кр}2}$ – напруга в контурі контактна мережа–рейки, $\dot{U}_{\text{п}1}$, $\dot{U}_{\text{п}2}$ – напруга між рейками і землею; $\dot{U}_{\text{к}1}$, $\dot{U}_{\text{к}2}$ – напруга в контурі контактна мережа – земля; $\dot{I}_{\text{к}1}$, $\dot{I}_{\text{к}2}$ – струм у контактній мережі; $\dot{I}_{\text{п}1}$, $\dot{I}_{\text{п}2}$ – струм в рейковій мережі (зворотний тяговий струм) на початку і в кінці кола відповідно.

В даний час існує два варіанти електропостачання залізниць є одно- і двобічне. Запропонована схема заміщення системи

тягового електропостачання є зручною для використання моделювання діляниць з однобічним живленням. Якщо ж розглядати випадок з двобічним електропостачанням електровозів, що знаходяться в межах даної фідерної зони, то тут кожен елемент навантаження буде живитися від двох джерел (тягових підстанцій). При нерівномірному розподіленому навантаженні, яке має місце в реальному житті, вона буде зміщена в бік тієї тягової підстанції, від якої споживається більший струм. До того ж по мірі руху електровозів місцезнаходження цієї точки буде змінюватися.

Систему двостороннього електропостачання можна розділити умовно на дві з одностороннім живленням, при чому довжина таких отриманих фідерних зон буде обмежуватися точкою струморозподілу. Криві струму і напруги в другій половині ділянки живлення будуть будуватися за тими самими значеннями, але узятими з протилежними знаками (тобто дзеркально відображені щодо точки струморозподілу, але побудовані в негативній півплощині). Знак в даному випадку буде говорити про живлення від однієї чи іншої тягової підстанції.

Для спрощення процесу моделювання будемо вважати навантаження зосередженою локально в заданій точці ділянки.

Падіння напруги в колі електровозу визначалося поза формулою

$$\dot{U}_{\text{кр}2} = \dot{I}_{\text{кр}2} \cdot Z_{\text{ел}}. \quad (5)$$

Струм в контактній мережі на початку лінії

$$\dot{I}_{\text{к}1}(x) = \dot{I}_{\text{к}2} + \frac{\dot{U}_{\text{к}2}}{Z_{\text{із}}(x)}. \quad (6)$$

Струм витоку через ізоляцію опор є лінійною залежністю і описується виразом

$$\dot{I}_{\text{yiz}}(x) = \dot{U}_{\text{к}2} / Z_{\text{із}}(x). \quad (7)$$

Зворотний тяговий струм в рейках в районі тягової підстанції визначається виразом

$$\dot{I}_{\text{p}1}(x) = \dot{I}_{\text{к}2} + \dot{I}_{\text{yiz}}(x) - \dot{I}_y. \quad (8)$$

Потенціал рейок біля електровоза

$$\dot{U}_{\text{p}2}(x) = \dot{I}_y \cdot Z_6(x). \quad (9)$$

Потенціал рейок біля тягової підстанції

$$\dot{U}_{\text{p}1}(x) = -\dot{I}_{\text{p}1}(x) \cdot Z_{\text{p}}(x) + \dot{U}_{\text{p}2}(x). \quad (10)$$

Метод моделювання розподілу тягового струму та його гармонійних складових, потенціалу системи тягового електропостачання з однобічним електроживленням фідерної зони полягає в покроковому розрахунку напруг та струмів за формулами (5–9). Крок Δx задається перед початком моделювання. Алгоритм виконання операцій наведено на рис. 3.

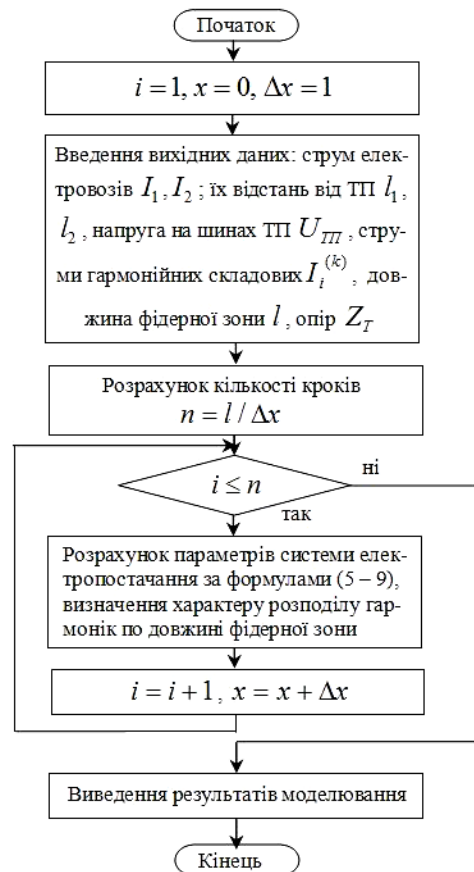


Рис. 3. Послідовність виконання операцій при моделюванні розподілу струмів та напруг по довжині фідерної зони при однобічному електроживленні

Результати моделювання

Розрахунок розподілення струмів та втрат напруг в контактній мережі виконується для фідерної зони довжиною 30 км з однобічним електропостачанням. Відстань до локомотивів № 1 та № 2 від тягової підстанції $L_1 = 7$ км, $L_2 = 20$ км. Крива струму, який споживається електровозом дана на рис. 4. Струми, що споживаються локомотивами дорівнюють $I_1 = 400$ А, $I_2 = 440$ А. Таке розташування електровозів на дільниці відповідає максимальному електроспоживанню на фідерній зоні при заданій завантаженості. Тип проводів контактної мережі – ПБСМ-95 – МФ-100, тип рейок – Р65, номінальне значення напруги на шинах тягової підстанції (ТП) 27500 В. При виконанні розрахунків приймаємо такі значення опорів рейок:

$$Z_p = 0,11 + j \cdot 2\pi f \cdot 8,021 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/км}$$

(для рейкового кола з рейками Р65), баласту $Z_6 = 100 \text{ Ом} \times \text{км}$, ізоляції опор $Z_{iz} = 100 \text{ Ом} \times \text{км}$ і контактної мережі $Z_k = 0,159 + j \cdot 2\pi f \cdot 9,772 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/км}$ (для контактної підвіски типу ПБСМ-95 + МФ-100).

Одним з джерел гармонійних складових струму в системі електропостачання змінного струму є перетворювальний агрегат електровозу. Гармонійний спектр тягового струму перетворювача електровозу змінного струму залежить від прохідної позиції, швидкості руху, рівня напруги на струмоприймачі, місця розташування електровозу на фідерній зоні. Рекомендується в розрахунках приймати спектр у віддаленому від тягової підстанції кінці тягового плеча живлення.

В процесі роботи регуляторів під час пуску тягових двигунів (більше 30 с) в сигнальних каналах 25...375 Гц безперервно

протікають струми завад, максимальна амплітуда яких залежить від частоти (табл. 1).

Таблиця 1

Амплітуда струму гармонійних завад, що виникають в тягових двигунах електровозів

Частота, Гц	Амплітуда, А	Частота, Гц	Амплітуда, А
25	4,7	225	2,0
50	1,1	275	3,4
75	6,2	325	2,6
125	3,8	375	2,2
175	2,6	–	–

Ці значення співпадають за рівнем з експериментальними даними, що дано на рис. 5. Спектральний аналіз зворотного тягового струму показав присутність гармонік частотою 25, 75, 105, 155, 255, 360, 465, 3750, 5200 і 6200 Гц. Рівень завади, співпадаючої по частоті з кодовою несучою частотою 25 Гц, в паузі коду виявився значним. Було знайдено, що він може досягати 50 % від величини корисного сигналу.

Для реалізації моделювання були розраховані опори тягової мережі змінного струму при заданому типі рейок і контактної підвіски (табл. 2).

Таблиця 2

Складові питомого опору тягової мережі гармонійних завад зворотного тягового струму

Частота, Гц	Активна складова опору R_t , Ом/км	Реактивна складова опору X_t , Ом/км	Модуль повного опору $ Z_t $, Ом/км
25	0,269	0,2803	0,3885
75	0,269	0,8409	0,883
125	0,269	1,4015	1,427
175	0,269	1,9622	1,981
150	0,269	1,6819	1,703
250	0,269	2,803	2,816
350	0,269	3,9243	3,933

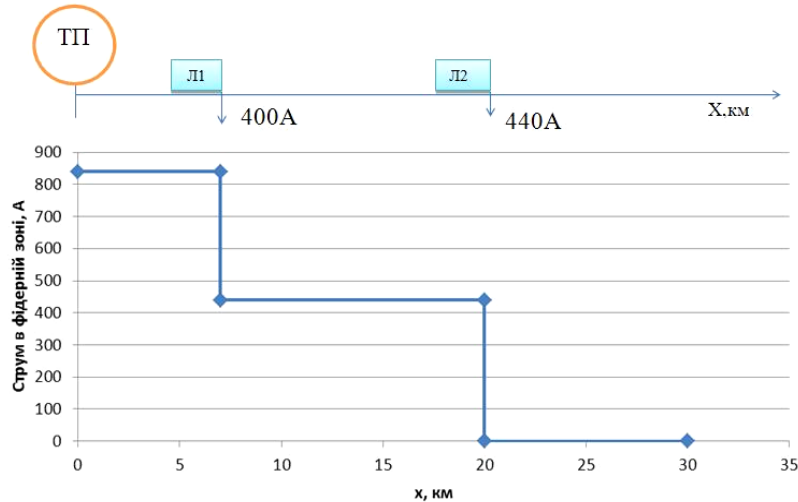


Рис. 4. Крива споживання струму електровозами в залежності від профілю ділянки та режиму ведення та розподіл тягового струму по довжині фідерної зони



Рис. 5. Спектральний склад зворотного тягового струму при електротязі змінного струму

Характер розподілу струму гармонійних завад є аналогічним показаному на рис. 3. Дослідження частотних характеристик релейних кінців перегінних і станційних рейкових кіл, які використовуються на ділянках з електротязом змінного струму, було виконано для широкого спектру частот гармонійних складових. В результаті було встановлено, що найбільш небезпечними є завади частотою 25, 75, 100 й 125 Гц для колійного реле перегінного кодового РК 25 Гц, які можуть привести до його помилкового спрацювання.

На рис. 6 дано приклад розподілу гармонійних складових 25, 75 й 125 Гц зворотного тягового струму по довжині фідерної зони з однобічним електропостачанням.

Отже, запропонована удосконалена математична модель дозволяє оцінювати розподіл гармонік зворотного тягового струму по довжині фідерної зони системи тягового

електропостачання з однобічним електроживленням.

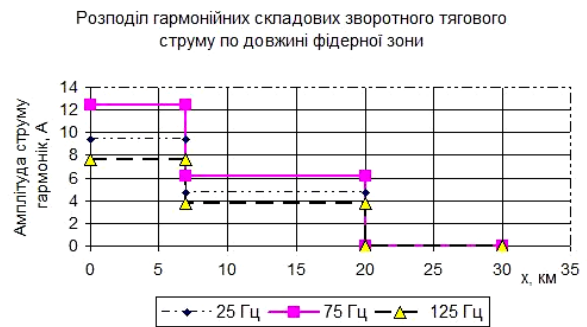


Рис. 6. Розподіл амплітуд гармонійних складових зворотного тягового струму 25, 75 і 125 Гц

Розбіжність між експериментальними даними й розрахованими не перевищувала $\pm 7,5\%$.

Визначено, що в якнайгірших умовах опиняються рейкові кола, розташовані в районі тягових підстанцій та в місцях знаходження локомотивів, оскільки струм гармонійних завад в такому разі буде найбільшим. Біля ТП відбувається збір всього зворотного тягового струму. В рейковому колі, де знаходиться локомотив й суміжному з ним струм завад від тягових двигунів локомотива буде максимальним, в інших РК цей струм буде меншим завдяки роботі дросель-трансформаторів, фільтрам РК, які згладжують, й струмам утікання.

Аналіз роботи рейкових кіл 25 Гц в умовах впливу гармонік зворотного тягового струму

Аналіз роботи кодових рейкових кіл 25 Гц показав, що установка захисних фільтрів дає можливість знижувати завади частотою 25 Гц майже в 9 разів, інші гармоніки зменшується приблизно в два рази [8].

Дослідження апаратури релейного кінця кодової РК 25 Гц, захищеної фільтром ФП-25, показало, що реле надійно відпускає свій якір при напрузі 2,2 В при частотах 31,5; 33; 36 Гц і напрузі на вході 10; 15; 20 В відповідно [11].

Колійне реле РК 25 Гц спрацьовує при струмі в рейках 1,5 А частотою 25 Гц, відпускає якір при струмі в 2 рази меншим від струму спрацьовування (приблизно 0,6 А). Також колійне реле спрацює при струмі в рейках 3,8 А частотою 75 Гц й 5 А частотою 100 Гц [8, 11].

На рис. 7 представлена частотна характеристика входної напруги колійного реле, отримана експериментально. На вхід колійного реле кодового перегінного РК 25 Гц подавалися синусоїдальні сигнали, частотою 20 до 50 Гц амплітудою 10, 15 і 20 В відповідно. Зменшення напруги на вході колійного реле показано лініями. Крапки на кривих відповідають надійному знеструмленню реле.

Імпульсне реле системи АЛС спрацьовуватиме при струмі в рейках 1,4 А частотою 25 Гц, 8 А частотою 75 Гц й 16 А частотою 100 Гц [11].

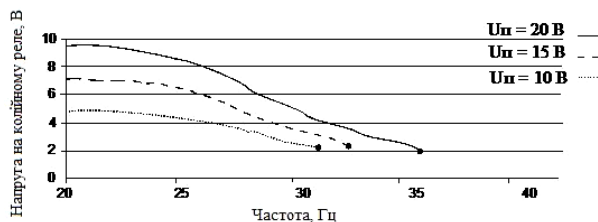


Рис. 7. Залежність напруги на колійному реле від частоти

Висновки

Експериментальний та аналітичний аналіз показав, що найбільш небезпечними є

завади частотою 25, 75, 100 й 125 Гц для колійного реле перегінного кодового РК 25 Гц. Завади даною частотою можуть привести до його помилкового спрацьовування.

Причиною виникнення струмів завад вказаної частоти можуть бути регулятори пуску тягових двигунів, випрямлячі електровозів, робота щітково-колекторного механізму тягових та допоміжних двигунів, система зовнішнього електропостачання.

Спектральний аналіз зворотного тягового струму дозволяє не тільки виявити небезпечні з погляду нормального функціонування пристроїв автоматики гармоніки, але і несправності в роботі різних елементів системи тягового електропостачання (тягових двигунів, тиристорних перетворювачів локомотивів, устаткування тягових підстанцій постійного струму).

Удосконалено математичну модель системи тягового електропостачання змінного струму, яка може стати науковим обґрунтуванням методу виміру гармонік зворотного тягового струму, який детально описано в [12, 13].

Запропонована удосконалена математична модель дозволяє оцінювати розподіл гармонік зворотного тягового струму по довжині фідерної зони системи тягового електропостачання з однобічним електроживленням.

За результатами моделювання й аналізом відповідних експериментальних даних було з'ясовано, що в якнайгірших умовах опиняються рейкові кола, розташовані в районі тягових підстанцій та в місцях знаходження локомотивів, оскільки струм гармонійних завад в такому разі буде найбільшим. Біля ТП відбувається збір всього зворотного тягового струму. В рейковому колі, де знаходиться локомотив й суміжному з ним, струм завад від тягових двигунів локомотива буде максимальним, в інших РК цей струм буде меншим завдяки роботі дросель-трансформаторів, згладжуючим фільтрам РК й струмам утікання.

Отже, поставлені задачі вирішено.

Бібліографічний список

1. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей. [Текст]/ Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Соколов, Н. И. Некоторые особенности режимов дальних линий электропередачи [Текст]/ Н. И. Соколов, Р. Н. Соколова // Электричество. – 1997. – № 11. – С.16-20.
3. Беляков, Ю. С. Расчет взаимной индукции длинных линий электропередачи [Текст] / Ю. С. Беляков // Электричество. – 1997. – №11. – С. 29 -32.
4. Коровкин, Н. В. Анализ волновых процессов в системах с распределенными параметрами методом синтетических схем [Текст] / Н. В. Коровкин, Е. Е. Селина // Электричество – 1999. - №1. – С.49-58.
5. Сердюк, Т. Н. Взаимодействие системы тягового электроснабжения постоянного тока с рельсовыми цепями [Текст] // Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк / Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті . – 2007. – №4. – С.108-112.
6. Котляренко, Н. Ф. Путевая блокировка и авторегулировка [Текст] / Н. Ф. Котляренко, А. В. Шишляков, Ю. В. Соболев, И. З. Скрыпник, В. А. Шишляков // Под ред. Н. Ф. Котляренко. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
7. Соболев, Ю. В. Путевые преобразователи автоматизированных систем управления железнодорожного транспорта. [Текст]/ Ю. В. Соболев. – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 1999. – 200 с.
8. Котельников, А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств [Текст] / А. В. Котельников, А. В. Наумов, Л. П. Слободянюк – М.: Транспорт, 1990. – 215с.
9. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1. [Текст] / Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
10. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]/ К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
11. Сердюк, Т. Н. Распределение гармоник тягового тока по длине фидерной зоны и их влияние на работу рельсовых цепей [Текст] / Т. Н. Сердюк // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В Лазаряна. – 2007. – Вип.14. – С.16 - 23.
12. Gavrilyuk, V. I. To the question about checking parameters of code current of rail circuit [Текст] / V. I. Gavrilyuk, T. N. Serdyuk // Transport systems telematics. III International Conference. – Katowice-Ustron (Poland). – 2003. – P.127 – 135.
13. Пат. 50859 Україна В61L25/00. Спосіб автоматизованого контролю параметрів рейкових кіл з вагону-лабораторії: Пат. 50859 Україна 50859, В61L25/00 [Текст] / Сердюк Т. Н., Гаврилюк В. И. – № u200913582; Заявлено 25.12.2009; Опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.– 4с.

Ключові слова: система тягового електропостачання, рейкові кола, експериментальні дослідження, гармонійні завади.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, рельсовые цепи, экспериментальные исследования, гармонические помехи.

Keywords: system of traction electrosupplying, rail circuits, experimental investigation, harmonic interferences.

Рецензенти:

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

Надійшла до редколегії 15.09.2015 р.
Прийнята до друку 30.09.2015 р.