

УДК 656.25

І. О. РОМАНЦЕВ – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, rio_mail@i.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЗДОВЖНИХ ТА ПОПЕРЕЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЙКОВОЇ ЛІНІЇ МУЛЬТИМЕТРОМ

Вступ

Сучасні вимірні технології дають змогу удосконалити методи вимірювань з мінімальним втрачанням вимірних приладів до принципу дії систем та продовженням безперервного руху на дільниці залізниці. Одночасно з використанням цифрової техніки збільшується чутливість до поступової зміни вимірних параметрів та зменшується час на проведення вимірних заходів. Це є актуальним в умовах зменшення часу знаходження обслуговуючого персоналу на залізничній колії – території з підвищеною небезпекою.

Мета роботи

В якості мети роботи визначені формування методу визначення поздовжніх та поперечних параметрів рейкової лінії (РЛ) рейкового кола при мінімальному використанні вимірних приладів; розробка математичної моделі для визначення поздовжніх та поперечних параметрів РЛ; формування граничних значень параметрів рейкової лінії для подальшого обмеження та спрощення розробленої математичної моделі.

Для досягнення поставленої мети необхідно: сформулювати схему вимірів електричних параметрів рейкової лінії та урахувати недоліки існуючих методів визначення параметрів рейкової лінії; визначити, які електричні параметри можна отримати в результаті формування з мінімальним втрачанням в неперервну роботу рейкового кола (РК) та задати змінні параметри РЛ, які необхідно буде визначити за допомогою математичної моделі; розробити математичну модель рейкової лінії на основі отриманих змінних параметрів; сформулювати обмеження математичної моделі на основі

особливостей функціонування рейкового кола та прогнозованих значень поздовжнього та поперечного параметрів РЛ.

Недоліки існуючих методів визначення поздовжніх та поперечних параметрів рейкової лінії

Більшість існуючих методів визначення параметрів рейкової лінії мають наступні недоліки:

- при визначенні параметрів РЛ основною невідомою величиною вважається опір ізоляції баласту як параметр, найбільш впливовий на загасання та втрату потужності в рейковому колі, значення опору рейок вважають сталою на певній частоті сигнального струму [1];
- вимір електричних параметрів для визначення опору ізоляції баласту пов'язаний з порушенням роботи рейкового кола, при якому приймач сигналів втрачає живлення та порушує логіку роботи сучасної системи автоблокування або електричної централізації [1-3];
- вимір опору ізоляції баласту супроводжується використанням вузько спеціалізованих вимірних приладів для визначення фазових співвідношень електричних сигналів в рейковому колі або виміру опору ізоляції баласту за відомими співвідношеннями [1, 4, 5];
- найбільш елементарні методи виміру електричних параметрів РЛ використовують математичний апарат визначення кінцевого

значення невідомої величини – опору ізоляції баласту, що представлений математичною моделлю для подальшого перерахування з вимірних фізичних величин [1, 5].

Моделювання залежностей для визначення параметрів рейкової лінії

Для розробки математичної моделі рейкової лінії необхідні вихідні величини, що являють собою електричні параметри в рейковій лінії, визначають з можливостей вимірних приладів.

Електричні параметри для визначення поздовжніх та поперечних параметрів рейкової лінії з урахування зазначених загальних недоліків наступні:

- визначення електричної напруги в рейковій лінії в будь-якому разі не порушує роботу рейкового кола. При актуальному визначенні параметрів РЛ як чотирьохполюсника з невідомими внутрішніми величинами (первинними та вторинними параметрами) з мінімальною кількістю вимірів напруг необхідно визначати напругу на початку та наприкінці рейкової лінії;
- визначення електричного струму в рейковій лінії пов'язано з фізичним розривом в рейковому колі, тому є недоліком і не бажано використовуватись. Однак, при використанні безконтактного виміру струму, аналогічно як і напругу, значення актуально визначати на початку та в кінці рейкової лінії;

- додаткові електричні величини, такі як фаза та векторне значення між електричними параметрами в РЛ тощо, бажано не використовувати за рахунок використання додаткових вимірних приладів.
- при розробленні методу можливе використання вимірних напруг або струмів в середині рейкової лінії, що додатково спонукає до виміру довжини від місця включення апаратури живильного або релейного кінця рейкової лінії.

Схема виміру електричних величин в РЛ для визначення її поздовжніх та поперечних параметрів з урахуваннями особливостями приведена на рис. 1.

На рис. 1 використані позначення:

- П, К та РЛ – 4-полюсники апаратури між генератором та рейковою лінією, РЛ та приймачем сигналів, а також 4-полюсник РЛ як лінії з розповсюдженими параметрами,
- Z_{Π} – опір приймача сигналів РК,
- U_{Γ} – напруга живлення рейкового кола,
- V1, V2 – вольтметри для виміру напруги в РЛ;
- A1, A2 – амперметри для безконтактного виміру напруги в РЛ.

У якості безконтактних вимірювачів струму можливе використання широкого спектру вимірювальних засобів – від вимірювальних поясів та датчиків Холла до цифрових амперметрів та мультиметрів [6-9]. В даному випадку актуальними до використання є прилади, що можуть вимірюють напругу та струм безконтактно.

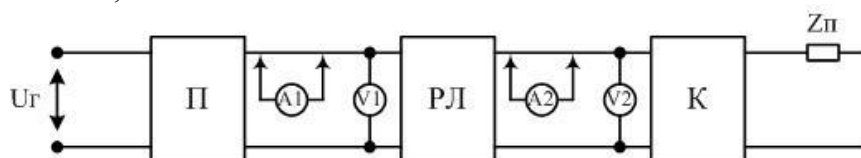


Рис. 1. Схема вимірювання електричних параметрів рейкової лінії без фазових співвідношень та виключення залежностей

Отже, для математичної моделі початковими (вхідними) даними є амплітудні значення напруг та амплітудні значення струмів на початку та в кінці рейкової лінії. Вихідні дані математичної моделі (результат) – це значення активного питомого опору ізоляції баласту (поперечних параметр РЛ), модуль та аргумент питомого опору рейок (поздовжній параметр РЛ).

Розробка математичної моделі визначення первинних параметрів рейкової лінії

При подальшій розробці математичної моделі рейкової лінії для визначення вищезазначених поздовжнього опору рейок та поперечного опору ізоляції баласту невідомими параметрами виділено:

- $|Z_p|$, модуль питомого опору рейок;
- φ_p , фаза питомого опору рейок;
- R_b , питомий активний опір ізоляції баласту рейкової лінії.

Подальші аналітичні визначення математичної моделі засновані на використанні відомих рівнянь рейкової лінії як 4-полюсника (див. формулу 1), для якого прийняті наступні припущення:

- рейкова лінія є симетричною [1, 2, 10];
- параметри рейкової лінії як електричної лінії з

$$\begin{cases} |U_n| \cdot e^{j\varphi_n} = \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) \cdot |U_k| \cdot e^{j\varphi_k} + \underline{Z}_b \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l) \cdot |I_k| \\ |I_n| \cdot e^{j\varphi_{in}} = \frac{\operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}{\underline{Z}_b} \cdot |U_k| \cdot e^{j\varphi_k} + \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) \cdot |I_k| \end{cases}, \quad (2)$$

де $|U_n|$, $|U_k|$, $|I_n|$, $|I_k|$ – модульні значення вимірюваних напруг та струмів; φ_n , φ_k , φ_{in} – фазові співвідношення між електричними напругами та струмами; γ – коефіцієнт розповсюдження хвилі в рейковій лінії; l – довжина рейкової лінії в кілометрах; $\underline{Z}_b = \sqrt{Z_p \cdot R_b}$ – хвильовий опір РЛ;

розповсюдженими параметрами є рівномірно та однаково розповсюдженими без урахування можливих точкових сплесків. Практично, вони можуть бути присутні за рахунок особливостей експлуатації лінії в негативному середовищі при впливі хімічних, електромагнітних та механічних факторів;

- електромагнітний вплив с суміжних колій та об'єктів, прилеглих до залізничної дільниці, є мінімальним [11];
- в рейковій лінії відсутні заземлення опор контактної мережі до рейок [2, 10, 12].

$$\begin{cases} \dot{U}_n = \underline{A} \cdot \dot{U}_k + \underline{B} \cdot \dot{I}_k \\ \dot{I}_n = \underline{C} \cdot \dot{U}_k + \underline{D} \cdot \dot{I}_k \end{cases}, \quad (1)$$

де \dot{U}_n , \dot{U}_k – напруги на початку та в кінці РЛ, що визначають за показанням приладів V1 та V2 відповідно (див. рис. 1); \dot{I}_n , \dot{I}_k – струм в кінці РЛ, визначають за показанням приладу A1, A2; A, B, C, D – A-параметри 4-полюсника РЛ [12].

При переході до ступеневого вигляду та розкритті A-параметрів в формулі (1) отримано наступний вираз:

$\underline{Z}_p = |Z_p| \cdot e^{j\varphi_p}$ – питомий опір рейок; R_b – питомий опір ізоляції баласту.

Подальші перетворення на прикладі другого рівняння показані при виразі коефіцієнт розповсюдження хвилі через значення загасання α й фазового коефіцієнту β та розкритті гіперболічних функцій:

$$|I_H| \cdot e^{j\varphi_{in}} = \left| \frac{U_K}{2 \cdot Z_{\mathcal{E}}} \right| \cdot e^{j\varphi_K - j\frac{\varphi_P}{2}} \cdot e^{\alpha \cdot l + j\beta \cdot l} - \left| \frac{U_K}{2 \cdot Z_{\mathcal{E}}} \right| \cdot e^{j\varphi_K - j\frac{\varphi_P}{2}} \cdot e^{-\alpha \cdot l - j\beta \cdot l} + \frac{|I_K|}{2} \cdot e^{\alpha \cdot l + j\beta \cdot l} + \frac{|I_K|}{2} \cdot e^{-\alpha \cdot l - j\beta \cdot l}. \quad (3)$$

В результаті остаточного перетворення виконаємо:

1. перехід експоненціальних виразів з уявною одиницею при їх попередньому ґрунтуванні до тригонометричних функцій;
2. групування дійсних та уявних частин функцій;
3. перекомпонування функцій в дійсних та уявних частинах в гіперболічні функції.

Після виконання вказаних дій отримаємо вираз (4):

$$|I_H| \cdot e^{j\varphi_{in}} = E_3 + j \cdot E_4, \quad (4)$$

де E_3 , E_4 – дійсна та уявна частини отриманого за виконаними перетвореннями, що визначають за формулою (5):

$$E_3 = \left| \frac{U_K}{Z_{\mathcal{E}}} \right| \cdot \left[\operatorname{sh}(\alpha l) \cdot \cos\left(\varphi_K - \frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \cos(\beta l) - \operatorname{ch}(\alpha l) \cdot \sin\left(\varphi_K - \frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \sin(\beta l) \right] + |I_K| \cdot \operatorname{ch}(\alpha l) \cdot \cos(\beta l)$$

$$E_4 = \left| \frac{U_K}{Z_{\mathcal{E}}} \right| \cdot \left[\operatorname{sh}(\alpha l) \cdot \sin\left(\varphi_K - \frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \cos(\beta l) + \operatorname{ch}(\alpha l) \cdot \cos\left(\varphi_K - \frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \sin(\beta l) \right] + |I_K| \cdot \operatorname{sh}(\alpha l) \cdot \sin(\beta l). \quad (5)$$

При аналогічних перетвореннях першого рівняння формули (2) отримано вираз:

$$|U_H| \cdot e^{j\varphi_H} = E_1 + j \cdot E_2, \quad (6)$$

де E_1 , E_2 – дійсна та уявна частини отриманого за виконаними перетвореннями, що визначають за формулою (7):

$$E_1 = |U_K| \cdot \left[\cos(\varphi_K) \cdot \cos(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{ch}(\alpha \cdot l) - \sin(\varphi_K) \cdot \sin(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{sh}(\alpha \cdot l) \right] + |I_K| \cdot \left[|Z_{\mathcal{E}}| \cdot \cos\left(\frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \cos(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{sh}(\alpha \cdot l) - |Z_{\mathcal{E}}| \cdot \sin\left(\frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \sin(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{ch}(\alpha \cdot l) \right]$$

$$E_2 = |U_K| \cdot \left[\sin(\varphi_K) \cdot \cos(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{ch}(\alpha \cdot l) + \cos(\varphi_K) \cdot \sin(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{sh}(\alpha \cdot l) \right] + |I_K| \cdot \left[|Z_{\mathcal{E}}| \cdot \sin\left(\frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \cos(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{sh}(\alpha \cdot l) + |Z_{\mathcal{E}}| \cdot \cos\left(\frac{\varphi_P}{2}\right) \cdot \sin(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{ch}(\alpha \cdot l) \right]. \quad (7)$$

Вирази (4)–(7) є основними для отримання математичної залежності між вимірюваними напругами та струмами та значеннями $|Z_p|$, φ_P та R_b . Додатково, невідомими значеннями є φ_H , φ_K , φ_{in} (довжина рейкової лінії є відомою та вказана в технічній документації [1, 3, 13]). Для подальшого рішення математичної моделі з урахуванням того, що параметри апаратури живильного та релейного кінця рейкового кола не змінюють своїх характеристик більше ніж на 2-5 % [4, 14], значення φ_K як фази між напругою та струмом в кінці рейкової лінії можна визначити як фазу опору апаратури кінця рейкового кола виходячи з рис. 2.

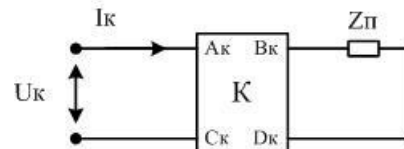


Рис. 2. Схема заміщення апаратури релейного кінця рейкового кола

На рис. 2 значення A_k - D_k – це А-параметри 4-полюсника апаратури релейного кінця.

Виходячи з рис. 2, значення φ_k визначають за формулою (8):

$$\varphi_k = \arg \left(\frac{A_k \cdot Z_n + B_k}{C_k \cdot Z_n + D_k} \right). \quad (8)$$

Значення параметрів A_k - D_k та Z_n та Z_p визначають за відомими значеннями з [2-4].

Тобто, для визначення основних невідомих величин $|Z_p|$, φ_p і R_b та додаткових φ_n і φ_{in} необхідно скласти не менше п'яти рівнянь. Два рівняння отримано з (6) та (4) формул як визначення модульних значень $|U_n|$ та $|I_n|$ відповідно за формулами:

$$\begin{cases} |U_n|^2 = E1^2 + E2^2 \\ |I_n|^2 = E3^2 + E4^2 \end{cases}. \quad (9)$$

Ще два рівняння отримано на базі (6) та (4) рівнянь як значення аргументів

$$\begin{cases} \text{tg}(\varphi_n) = \frac{E2}{E1} \\ \text{tg}(\varphi_{in}) = \frac{E4}{E3} \end{cases}. \quad (10)$$

Останнє мінімально необхідне рівняння визначено з векторної діаграми електричних сигналів, зображеної на рис. 3.

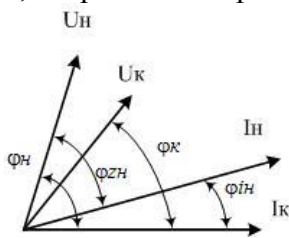


Рис. 3. Векторна діаграма електричних сигналів в рейковій лінії

На рис. 3 значення φ_{zn} являє собою фазу опору відносно місця включення апаратури живильного кінця рейкової лінії. Довжини векторів можуть відрізнятись від зазначених на рис. 3 в різних рейкових колах (кодових, фазочутливих, тональних, гетеродинних тощо [2, 3, 13]), а значення фаз – в залежності від частоти сигнального струму та довжини рейкового кола [1-3, 10, 13].

Виходячи з рис. 3, фазові відношення дають наступний вираз:

$$\varphi_n = \varphi_{zn} + \varphi_{in}. \quad (11)$$

Величину φ_{zn} визначають залежно від типу рейкового кола та його принципової схеми. На прикладі тонального рейкового кола як найбільш актуального за використанням та впровадженням [4, 5, 7] значення φ_{zn} можна визначити за схемою вимірювання, приведеною на рис. 4.

На рис. 4 використані позначення:

- ФПУ, КЛ, ПТ – чотирьохполюсники колійного фільтру, кабельної лінії живильного кінця, живильного трансформатора рейкового кола;
- S_{alc} – ємність автоматичної локомотивної сигналізації;
- R_k – кабельний опір живильного кінця;
- R_z – захисний опір живильного кінця;
- V_c та V_r – вольтметри для визначення сумарної напруги та напруги на захисному опорі в місці включення апаратури живильного кінця рейкового кола.

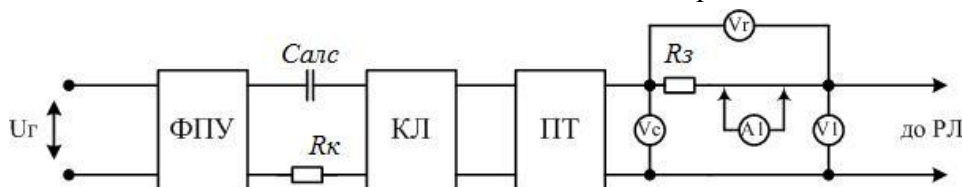


Рис. 4. Схема вимірювання фази початкового опору

При відомих напругах вольтметрів V_c , V_r та V_1 діаграма векторів напруг буде такою, як приведена на рис. 5.

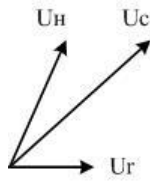


Рис. 5. Векторна діаграма напруг на початку рейкової лінії

Виходячи з того, що опори прямо пропорційні значенню струму I_n , то вектори опорів та їх фазові співвідношення визначають з наступної векторної діаграми опорів:

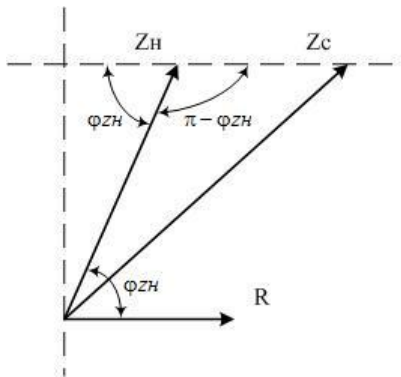


Рис. 6. Векторна діаграма опорів

На рис. 6 вектори Z_n , Z_c та R є опорами, що пропорційні значенням напруг, отриманими за показаннями вольтметрів згідно схеми, зображеної на рис. 4.

Відповідно до теореми косинусів, отримуємо значення кута $(\pi - \varphi_{zn})$ за формулою (12):

$$Z_c^2 = R^2 + Z_n^2 - 2 \cdot R \cdot Z_n \cdot \cos(\pi - \varphi_{zn}). \quad (12)$$

Після остаточного вираження шуканого кута з формули (12) отримано:

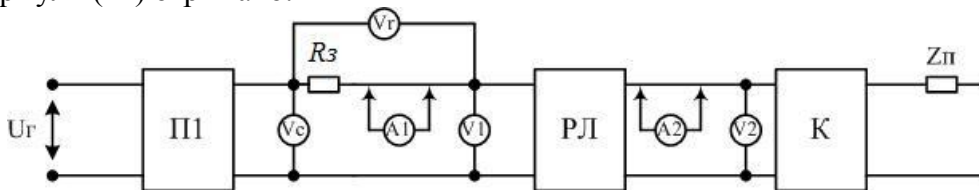


Рис. 7. Кінцева схема вимірювання параметрів рейкової лінії мультиметром

$$\varphi_{zn} = \arccos \frac{Z_c^2 - R^2 - Z_n^2}{2 \cdot R \cdot Z_n}. \quad (13)$$

При множенні чисельника та знаменника у виразі (13) отримані вектори визначатимуться векторами напруг (див. рис. 4 та 5).

Остаточно отримана математична модель, за допомогою котрої визначатимуться первинні параметри рейкової лінії, а саме поздовжній опір рейок та поперечний опір ізоляції баласту, сформована в системі рівнянь (14):

$$\begin{cases} |U_n|^2 = E1^2(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in}) + E2^2(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in}) \\ |I_n|^2 = E3^2(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in}) + E4^2(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in}) \\ g(\varphi_n) = \frac{E2(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in})}{E1(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in})} \\ \text{tg}(\varphi_{in}) = \frac{E4(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in})}{E3(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in})} \\ \varphi_n = \arccos \frac{U_c^2 - U_r^2 - |U_n|^2}{2 \cdot U_r \cdot |U_n|} + \varphi_{in} \end{cases}, \quad (14)$$

де значення $E1(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in}) - E4(\dot{Z}_p, R\bar{b}, \varphi_n, \varphi_{in})$ – функції п'яти змінних, з урахуванням амплітуди та фази поздовжнього питомого опору рейок в якості однієї змінної, значення приведені в формулах (7) та (5) відповідно. Згідно отриманої математичної моделі, схема вимірювання електричних параметрів в рейковій лінії на прикладі тонального рейкового кола приведена на рис. 7.

На рис. 7 приведені всі вимірні прилади для подальшого виміру електричних напруг і струмів та визначення первинних параметрів рейкової лінії за розробленою математичною моделлю.

Для зменшення часу обчислення кінцевого результату згідно математичної моделі та вимог до обчислювальної системи необхідно врахувати особливості роботи рейкового кола, його можливі значення параметрів та прогнозовані діапазони величин кінцевого результату:

- для величини $|\dot{Z}_p|$ значення найбільшим чином залежить від частоти сигнального струму та знаходиться в межах від 0 до 60 Ом×км, найменше приведено число відповідає найменшій частоті [2-4];
- значення φ_p , як і попереднє, переважно залежить від частоти та змінюється в межах від 10 до 90 градусів в рейкових колах змінного струму;
- діапазон величин R_b згідно технічної документації та особливостей баластного слою обмежений значеннями 0,01 та 50 [1-5, 10];
- фаза напруги на початку рейкової лінії φ_n з урахуванням індуктивного навантаження відносно включення рейкової лінії обмежено величинами від 0 до 90 градусів;
- величини фазових різниць між струмами на початку та в кінці рейкової лінії φ_{in} аналогічно попередньому значенню та практичним результатам осцилограм знаходиться в діапазоні 0-90 градусів [3, 4, 14].

Взагалі, обмеження, прийняті до кінцевих результатів математичної моделі, складені в систему рівнянь:

$$\begin{cases} |\dot{Z}_p| \in [0, 60], \\ \varphi_p \in \left[\frac{\pi}{18}, \frac{\pi}{2} \right], \\ R_b \in [0.01, 50], \\ \varphi_n \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \\ \varphi_{in} \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right]. \end{cases} \quad (15)$$

Зазначені обмеження можуть бути доволі широкими та потребують дослідження в різних типах рейкових кіл для більш детального уточнення.

Висновки

В роботі розроблена математична модель та схеми вимірювання необхідних електричних напруг та струмів для визначення поздовжнього типового опору рейок та поперечного питомого опору ізоляції баласту рейкової лінії як параметрів, що найбільшим чином впливають на режими роботи рейкового кола. В розробленій математичній моделі отримано п'ять рівнянь з 5 невідомими, три з яких необхідно визначити, а 2 – визначено додатково. Схема вимірювання електричних параметрів в рейковій лінії розрахована на використання типових масово розповсюджених вимірних неспеціалізованих приладів – вольтметрів та безконтактних амперметрів. Обмеження на очікуваний результат в математичній моделі дає змогу оптимізувати потенційний алгоритм роботи обчислювального пристрою.

Бібліографічний список

1. Дмитренко, И. Е. Измерения и диагностика в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Учебник для вузов ж.д. трансп. [Текст] / И. Е. Дмитренко, В. В. Сапожников, Д. В. Дьяков – М.: Транспорт, 1994. – 263 с.

2. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог [Текст] / Под ред. В. С. Аркатова. – М.: Изд-во «ООО Миссия-М», 2006. – 496 с.
3. 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 – Киев: Издательский дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
4. Методичні вказівки з експлуатації тональних рейкових кіл: ЦШ0034 [Текст] / Затв. наказом Держ адміністрації зал. тр-ту України 23.02.2004 № 030-Ц. – К.: Мануфактура, 2004. – 49 с.
5. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокуваннях: ЦШ 0060. – К.: Укрзалізниця, 2009. – 111 с.
6. Кобус, А. Датчики Холла и магниторезисторы [Текст] / А. Кобус, Я. Тушинский. – М.: Энергия. – 1971. – 352 с.
7. Мультиметры В7-63/1, В7-63/2. Руководство по эксплуатации. Часть 1. [Текст]. – 84 с.
8. Преобразователь тока селективный А9-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. [Текст]. – 2001. – 34 с.
9. Сукер, К. Силовая электроника. Руководство разработчика [Текст] / Под ред. К. Сукер – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. — 252 с.
10. Тарасов, Е. М. Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий [Текст] / Е. М. Тарасов. – Самара: СамГАПС, 2003. – 118 с.
11. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость: учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
12. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: [Учебное пособие]. / Бессонов Л. А. – М.: Высш. школа, 1996. – 639 с
13. Дмитриев, В. С. Системы автоблокировки с рельсовыми цепями тональной частоты [Текст] / В. С. Дмитриев, А. В. Минин. – М.: Транспорт, 1992. – 182 с.
14. Романцев, І. О. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл [Текст] / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Яшук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 42. – С. 24-28.

Ключові слова: рейкове коло, вимірювання параметрів рейкових ліній, опір ізоляції баласту, опір рейок, розрахунок рейкових кіл.

Ключевые слова: рельсовая цепь, измерения параметров рельсовых линий, сопротивление изоляции балласта, сопротивление рельс, расчет рельсовых цепей.

Keywords: railway electric circuit, rail track parameters measurement, rail track electric insulation, electric resistance of rail, calculation in rail track circuit.

Рецензенти:
д.т.н., проф. А. Б. Бойнік,
д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 28.10.2015.
Прийнята до друку 10.11.2015.