

УДК 656.256.3:621.316.9

К. І. ЯЩУК – к.т.н., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, k.i.yaschuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-8606-5790

Д. С. КУРИЛО – студент гр. 930 А, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, BassEastAm@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РЕЙКОВОГО КОЛА В УМОВАХ НАСИЧЕННЯ КОЛІЙНИХ ДРОСЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРІВ

### Вступ

Модернізація систем і пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки останнім часом все більше набуває євроінтеграційної спрямованості. Виникає потреба у створенні необхідних умов для забезпечення безперебійної роботи нової апаратури та зниження кількості відмов застарілої. На цьому шляху досить вагомою проблемою є відмови дросель-трансформаторів (ДТ), а саме насичення їх магнітопроводів. Це явище має досить комплексний характер, адже може виникати за наступних причин.

По-перше, на ділянках стикування доріг з електричною тягою постійного та змінного струмів порушується робота рейкових кіл (РК) внаслідок просторового розтікання зворотного постійного тягового струму від станції стикування по полігону, що примикає до станції з електричною тягою змінного струму. В результаті відбувається підмагнічення постійним потенціалом «рейка – земля» (біля 60 В) магнітопроводів ДТ, що призводить до відмов РК та перекриття світлофорів [1, 2].

По-друге, на проводах контактної мережі за ожеледиці в колі зворотного змінного тягового струму присутні багаточисленні гармонічні складові, серед яких і постійна складова, яка, як відомо, намагнічує осердя ДТ.

По-третє, на проблематичних гірських ділянках доріг внаслідок наявності крутих підйомів зворотний тяговий струм досягає колосальних значень. Для прикладу можна розглянути ділянку Лавочне – Бескид –

Скотарське Львівської залізниці, на якій підйоми досягають 30,4 %, а постійний тяговий струм – 7000 А [3], в результаті чого навіть при нормативній асиметрії 0,12 струм асиметрії досягає 400 А і більше. Це супроводжується насиченням магнітопроводів колійних ДТ типу ДТ-0,6-1000 та ДТ-0,2-1000 (на розглянутій гірській ділянці застосовуються кодові РК 50 Гц), зниженням вхідних опорів по кінцям рейкової лінії (РЛ) і порушенням області стійкості роботи РК автоблокування (АБ).

### Мета та завдання

Отже метою роботи є дослідження коефіцієнтів схем заміщення колійних ДТ у режимі підмагнічення їх кіл постійним тяговим струмом для проведення оцінки роботи кодового РК в умовах впливу струму асиметрії.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У теорії РК дослідження та розрахунки представляють собою роботу магнітних систем дроселів зі схемами заміщення, визначеними на лінійній ділянці основної кривої намагнічення при індукції не більше 0,25...0,5 Тл [3].

До сих пір майже не приділялася увага розрахункам цих вузлів РК у нелінійній постановці задач досліджень, за виключенням небагаточисленних робіт, опублікованих в останні роки в Україні [1, 3, 4]. Ці праці є дуже змістовними, але запропоновані в них методи та моделі є доволі складними та

громіздкими. Для проведення розрахунків роботи РК при підмагнічуванні дроселів потрібно мати відповідні експериментальні залежності магнітних характеристик пристроїв від струму підмагнічення [5, 6]. Для проведення подібних експериментів пошуку розрахункових параметрів схем заміщення (СЗ) дроселів потрібні потужні джерела постійного струму [7], що значно ускладнює процес. Тому у роботі запропоновано непрямий метод знаходження електричних параметрів чотириполюсників схем заміщення колійних ДТ.

### Дослідження коефіцієнтів чотириполюсників рейкового кола

Суть запропонованого спрощеного методу полягає в отриманні коефіцієнтів схеми заміщення ДТ для різних величин модулів опорів кола намагнічування  $z_3$ , що змінюються у процесі підмагнічення магнітопроводів ДТ постійним струмом (рис. 1 а).

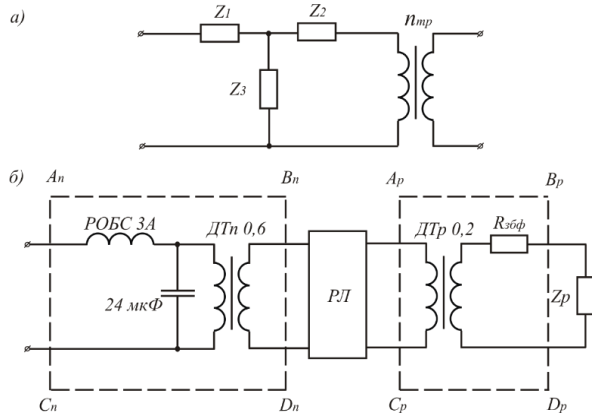


Рис. 1. Схема заміщення апаратури СЦБ:  
 а) дросель-трансформатору; б) кодового РК 50 Гц

Метод розрахунку має наступні припущення:

– еквівалентна схема заміщення ДТ представлена Т-подібною та ідеальною схемами трансформатору з відповідними коефіцієнтами;

– опори  $z_1$  та  $z_2$ , що враховують втрати у ДТ, вважаємо неперервними, тоді схема заміщення виходить симетричною, внаслідок чого спрощуються розрахунки.

У [8] приведені значення опорів, що входять до складу симетричної СЗ ДТ-0,2-1000 та ДТ-0,6-1000, яка застосовується у схемі кодового РК частотою (рис. 1 б), що підлягає розрахунку.

Приведені дані отримані з використанням довідкових величин коефіцієнтів схем заміщення колійних ДТ, що використовуються для розрахунків кодового РК. Згідно Т-подібної схеми заміщення ДТ відомі коефіцієнти чотириполюсників ДТ.

$$\begin{vmatrix} A_{\Pi} & B_{\Pi} \\ C_{\Pi} & D_{\Pi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_{\Pi} & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_{\Pi}} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{\text{ТП}} & B_{\text{ТП}} \\ C_{\text{ТП}} & D_{\text{ТП}} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

$$A_{\Pi} = n_{\Pi} \cdot A_{\text{ТП}}, \quad B_{\Pi} = n_{\Pi} \cdot B_{\text{ТП}},$$

$$C_{\Pi} = \frac{1}{n_{\Pi}} \cdot C_{\text{ТП}}, \quad D_{\Pi} = \frac{1}{n_{\Pi}} \cdot D_{\text{ТП}},$$

де  $A_{\text{ТП}}, B_{\text{ТП}}, C_{\text{ТП}}, D_{\text{ТП}}$  – коефіцієнти чотириполюсника СЗ живлячого кінця;  $n_{\Pi} = 15$  – коефіцієнт трансформації ДТ живлячого кінця (ДТп).

Знаючи коефіцієнти ДТп, знаходимо коефіцієнти (1).

Аналогічно запишемо матричні рівняння для визначення коефіцієнтів чотириполюсника релейного кінця:

$$\begin{vmatrix} A_{\text{Р}} & B_{\text{Р}} \\ C_{\text{Р}} & D_{\text{Р}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_{\text{Р}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_{\text{Р}}} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{\text{ТР}} & B_{\text{ТР}} \\ C_{\text{ТР}} & D_{\text{ТР}} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

де  $A_{\text{ТР}}, B_{\text{ТР}}, C_{\text{ТР}}, D_{\text{ТР}}$  – коефіцієнти чотириполюсника СЗ релейного кінця;  $n_{\text{Р}} = 23$  – коефіцієнт трансформації ДТ релейного кінця (ДТр).

Із СЗ (рис. 1 б) знаходимо значення коефіцієнтів ДТ-0,6-1000:

$$A_{\text{ТП}} = \frac{A_{\Pi}}{n_{\Pi}} = \frac{15,5 \cdot e^{-j3^{\circ}10'}}{15} = 1,033 \cdot e^{-j3^{\circ}10'},$$

$$B_{\text{ТП}} = \frac{B_{\Pi}}{n_{\Pi}} = \frac{1,815 \cdot e^{-j73^{\circ}}}{15} = 0,1134 \cdot e^{-j73^{\circ}}, \quad (3)$$

$$C_{\text{ТП}} = C_{\text{П}} \cdot n_{\text{П}} = 0,135 \cdot e^{-j80^\circ} \cdot 15 = 2,025 \cdot e^{-j80^\circ},$$

$$D_{\text{ТП}} = D_{\text{П}} \cdot n_{\text{П}} = 0,08 \cdot e^{j1,5^\circ} \cdot 15 = 1,2 \cdot e^{j1,5^\circ}.$$

Аналогічно коефіцієнти ДТ-0,2-1000 знаходяться наступним чином:

$$A_{\text{ТР}} = A_{\text{Р}} \cdot n_{\text{Р}} = 0,152 \cdot e^{-j3^\circ} \cdot 23 = 0,529 \cdot e^{-j3^\circ},$$

$$B_{\text{ТР}} = \frac{B_{\text{Р}}}{n_{\text{Р}}} = \frac{0,842 \cdot e^{j61^\circ}}{23} = 0,0366 \cdot e^{j61^\circ}, \quad (4)$$

$$C_{\text{ТР}} = C_{\text{Р}} \cdot n_{\text{Р}} = 0,244 \cdot e^{-j82^\circ} \cdot 23 = 5,612 \cdot e^{-j82^\circ},$$

$$D_{\text{ТР}} = \frac{D_{\text{Р}}}{n_{\text{Р}}} = \frac{23 \cdot e^{-j1^\circ}}{23} = 1 \cdot e^{-j1^\circ}.$$

У [8] приведені коефіцієнти схеми заміщення основної обмотки, на основі яких можна знайти значення опорів Т-подібної СЗ, приведеної до основної обмотки ДТ. Коефіцієнти чотириполіусників Т-подібної СЗ (рис. 1 б) знаходяться за виразами:

$$A_{\text{ТП}} = 1 + \frac{z_1}{z_3}; \quad B_{\text{ТП}} = 2z_1 + \frac{z_3 \cdot z_2}{z_1}; \quad (5)$$

$$C_{\text{ТП}} = \frac{1}{z_3}; \quad C_{\text{ТП}} = 1 + \frac{z_2}{z_3}.$$

Підставляючи сюди значення коефіцієнтів СЗ, знайдемо значення складових СЗ основної обмотки ДТ.

#### Дослідження роботи рейкового кола в умовах підмагнічення магнітопроводів ДТ

Перейдемо до розрахунку кодового РК частотою 50 Гц [8, 9]. Для розрахунку використовуються наступні вихідні дані:

– коефіцієнти чотириполіусника РЛ при  $f_{\text{С}} = 50$  Гц;

– довжина рейкового кола  $l_{\text{РК}} = 2600$  м;

– опір ізоляції РЛ з урахуванням опор контактної мережі для літнього періоду року  $r_{\text{із літо}} = 0,9$  Ом·км;

– коефіцієнти чотириполіусника РЛ влітку:

$$A = D = 3,9 \cdot e^{j75^\circ}; \quad B = 3,4 \cdot e^{j108^\circ};$$

$$C = 4,722 \cdot e^{j43,5^\circ}.$$

– опір ізоляції РЛ для зимового періоду року  $r_{\text{із зима}} = 50$  Ом·км;

– коефіцієнти чотириполіусника РЛ взимку:

$$A = D = 1,024 \cdot e^{j3^\circ}; \quad B = 2,1 \cdot e^{j66^\circ};$$

$$B = 0,052 \cdot e^{j1^\circ}.$$

– опір опор контактної мережі  $r_{0 \text{ min}} = 2$  Ом·км;

– для колійного приймача реле ИМВШ-110 з коефіцієнтом запасу  $k_3 = 1,2$  напруга спрацювання  $U_{\text{Р}} = 3,84$  В;

– робочий струм реле  $I_{\text{Р}} = 0,0233$  А;

– опір рейок  $z_{\text{Р}} = 0,8 \cdot e^{j65^\circ}$  Ом;

– коефіцієнт повернення  $k_{\text{ВН}} = 0,75$ ;

– коефіцієнт надійного повернення  $k'_{\text{ВН}} = 0,625$ ;

– ємність обмежувача конденсатору  $C_{\text{П}} = 24$  мкФ;

Коефіцієнти чотириполіусника ДТп (без підмагнічування):

$$A_{\text{П}} = 15,5 \cdot e^{-j3^\circ 10'}; \quad B_{\text{П}} = 1,815 \cdot e^{j73^\circ};$$

$$C_{\text{П}} = 0,135 \cdot e^{-j80^\circ}; \quad D_{\text{П}} = 0,08 \cdot e^{j1,5^\circ}.$$

Коефіцієнти чотириполіусника ДТр (без підмагнічування):

$$A_{\text{Р}} = 0,052 \cdot e^{-j3^\circ}; \quad B_{\text{Р}} = 0,842 \cdot e^{j61^\circ};$$

$$C_{\text{Р}} = 0,244 \cdot e^{-j86^\circ}; \quad D_{\text{Р}} = 23.$$

Використовуючи розрахункові параметри, розрахуємо нормальний режим роботи (без підмагнічування). Коефіцієнти загальної схеми заміщення живлячого та релейного кінців РК знайдені з добутку матриць коефіцієнтів чотириполіусників:

$$A_{\text{Н}} = 16,424 e^{j1^\circ}; \quad B_{\text{Н}} = 4,81 e^{j81^\circ}$$

$$C_{\text{Н}} = 0,031 e^{j31^\circ}; \quad D_{\text{Н}} = 0,067 e^{j5^\circ}$$

$$A_{\text{К}} = 0,051 e^{-j3^\circ}; \quad B_{\text{К}} = 6,65 e^{j3,5^\circ}$$

$$C_{\text{К}} = 0,243 e^{-j82^\circ}; \quad D_{\text{К}} = 40 e^{j47,5^\circ}$$

Результати розрахунку:

– напруги та струми в кінці та на початку РЛ

$$U_K = 0,354 \text{ В}; I_K = 1,78e^{-j85^\circ} \text{ А};$$

$$U_H = 7,25e^{j49^\circ} \text{ В}; I_H = 8,363e^{j16^\circ} \text{ А};$$

– напруга та струм живлячого трансформатора

$$U_{\text{ПТ}} = 149 \cdot e^{j62^\circ} \text{ В};$$

$I_{\text{ПТ}} = 0,793 \cdot e^{j21^\circ} \text{ А}$ , перемножуючи на

$k_{\text{НС}} = 1,1$ , отримаємо  $U_{\text{ПТ}} = 164,9 \cdot e^{j62^\circ} \text{ В};$

$$I_{\text{ПТ}} = 0,872 \cdot e^{j21^\circ} \text{ А};$$

– опір передачі для зимового періоду:

$$z_{\text{П min}} = k_{\text{ТН}}' k_{\text{ТК}}' (z_{\text{ВХК}} + z_l + z_{\text{ВХН}}) = 3220 \cdot e^{j3^\circ}.$$

– опір передачі для літнього періоду:

$$z_{\text{П max}} = k_{\text{ТН}}' k_{\text{ТК}}' (A \cdot z_{\text{ВХК}} + B + (C \cdot z_{\text{ВХН}} + D) \cdot z_{\text{ВХН}}) = 6416,6e^{j62^\circ};$$

$$k = \frac{z_{\text{П min}}}{z_{\text{П max}}} = 2;$$

– максимальне значення напруги на колійному приймачі згідно регулювальних таблиць дорівнює:  $U_{\text{ПП}} = 2 \cdot 3,84 = 7,65 \text{ В}$ .

Ці розрахункові значення є базовими для оцінки результатів підмагнічування ДТ.

Зімітуємо «підмагнічування» магнітопроводів ДТ-0,6-1000 та ДТ-0,2-1000. Умовно вважаємо, що вони насичуються одночасно. Для ДТ-0,6-1000 приймемо  $z_3 = 0,35 \cdot e^{j81^\circ}$ , інші опори  $z_1, z_2$  залишимо такими ж.

Використовуючи (3), знайдемо коефіцієнти трансформатора ДТ-0,6-1000:

$$A_{\text{ПТ}} = 1 + \frac{0,045e^{j9^\circ}}{0,35e^{j81^\circ}} = 1,09e^{j1^\circ};$$

$$B_{\text{ПТ}} = 2z_1 + \frac{z_3 \cdot z_2}{z_1} = 0,096e^{j84^\circ} \text{ Ом};$$

$$C_{\text{ПТ}} = 2,86e^{-j81^\circ} \frac{1}{\text{См}};$$

$$D_{\text{ПТ}} = 1,12e^{-j1^\circ}.$$

Далі використовуємо вище знайдені коефіцієнти ДТ-0,6-1000 для

$$z_{3 \text{ ДТ-0,6}} = 0,35 \cdot e^{j81^\circ} \text{ Ом};$$

$$A_{\text{П}} = 16,8e^{j10^\circ}; B_{\text{П}} = 1,44e^{j85^\circ} \text{ Ом}$$

$$C_{\text{П}} = 0,191e^{-j81^\circ} \frac{1}{\text{См}}; D_{\text{П}} = 0,075e^{-j10^\circ}.$$

Аналогічним чином отримаємо коефіцієнти чотириполюсника СЗ ДТ-0,2-1000 для  $z_{3 \text{ ДТ-0,2}} = 0,12e^{j81^\circ} \text{ Ом}$ :

$$A_{\text{П}} = 0,0488e^{j1^\circ}; B_{\text{П}} = 0,759e^{-j17^\circ} \text{ Ом}$$

$$C_{\text{П}} = 0,362e^{-j81^\circ} \frac{1}{\text{См}}; D_{\text{П}} = 25,83e^{-j10^\circ}.$$

Були отримані параметри РЛ при нормальному режимі роботи:

– напруга і струм в кінці РЛ:

$$U_K = 0,332 \text{ В}; I_K = 2,52e^{-j67^\circ} \text{ А};$$

– напруга і струм на початку РЛ:

$$U_H = 9,92e^{j44,5^\circ} \text{ В}; I_H = 11,1e^{j13^\circ} \text{ А}.$$

– напруга та струм у додатковій обмотці ДТ-0,2-1000:

$$U_{\text{дДТ-0,2}} = 167e^{j16,5^\circ} \text{ В}; I_{\text{дДТ-0,2}} = 2,37 \text{ А}.$$

– напруга та струм на живлячому трансформаторі:

$$U_{\text{ПТ}} = 217e^{j28^\circ} \text{ В}; I_{\text{ПТ}} = 1,37e^{-j24^\circ} \text{ А}.$$

В результаті розрахунків отримана залежність напруги на колійному приймачі  $U_{\text{КП}}$  від величини струму асиметрії (рис. 2) при опорах ізоляції [10, 11] у зимовий (верхня крива) та літній період (нижня крива).

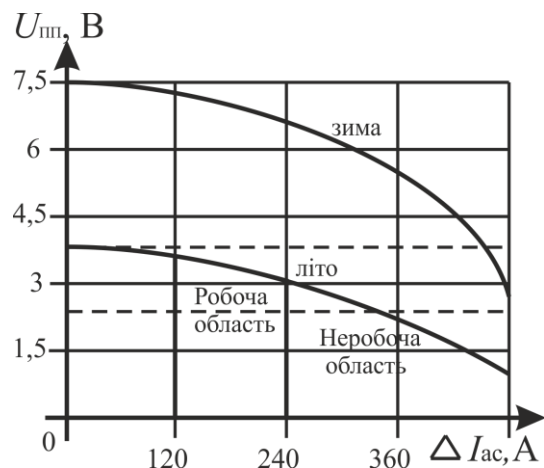


Рис. 2. Залежність напруги на колійному приймачі від струму асиметрії для опорів ізоляції у зимовий та літній період

### Висновки

З отриманих залежностей (рис. 2) можна зробити висновки, що взимку вірогідність відмови РК значно зменшується, адже не дивлячись на те, що напруга на колійному приймачі має тенденцію до зниження (верхня крива), присутній деякий запас по напрузі. Найбільш вірогідні відмови влітку, адже, як видно з отриманого графіку,  $U_{\text{сп}}$  знижується нижче порогу спрацювання, що є небажаним негативним явищем.

Кодове РК 50 Гц працює у вкрай важких умовах, що було встановлено в результаті проведеного дослідження з застосуванням запропонованого спрощеного методу розрахунку коефіцієнтів чотириполюсника ДТ і РК і розрахунку нормального режиму роботи. У цьому випадку потрібно проводити профілактичні роботи зі зниження коефіцієнту асиметрії та застосовувати відповідні технічні рішення.

Запропонований непрямий метод може використовуватися для корегування розрахунків режимів роботи рейкових кіл з урахуванням насичення колійних ДТ.

### Бібліографічний список

1. Защита рельсовых цепей в зоне стыкования систем электротяги / А. П. Разгонов, В. А. Дьяков, А. Ю. Журавлев, С. А. Разгонов // Автоматика, связь информатика. – Москва, 2009. – № 9. – С.19–22.
2. Пат. 84968 Україна, МПК В61L 1/00. Пристрій захисту рейкових кіл ділянки тяги змінного струму від впливу зворотного постійного струму / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавльов, А. Ю. Лебедев; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2013 04391; заявл. 08.04.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. – 6 с.
3. Разгонов А. П. Дослідження роботи рейкових кіл та системи автоблокування на перевальних ділянках з крутим профілем / А. П. Разгонов, К. І. Ящук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені В. Лазаряна. – 2011. – № 37. – С. 186 – 190.

4. Разгонов А. П. Математическая модель перемагничивания ферромагнетиков в рельсовых цепях / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, С. А. Разгонов // Транспорт Урала. – 2008. – № 1 (16). – С. 35–39.
5. Журавльов А. Ю. Про метод розрахунку рейкових кіл з нелінійними ферромагнетиками в умовах впливу завад тягового струму / А. Ю. Журавльов // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 1(61). – С. 19–29.
6. Разгонов А. П. О математическом описании петли гистерезиса ферромагнитных сердечников / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук // Материалы IV Международной научно-практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте» / ДИИТ. – Днепропетровск, 2011. – С. 66.
7. Бабаєв М. М. Аналіз впливу зовнішніх факторів на роботу рейкового кола / М. М. Бабаєв, А. А. Прилипко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 80. – С. 102–113.
8. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва: Транспорт, 1991. – 296 с.
9. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – Москва: УМК МПС, 2002. – 638 с.
10. Разгонов А. П. Вплив тягового струму асиметрії на роботу рейкових кіл / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті EMCS-R 2011». – Д.:ДНУЗТ, 2011. – С.68.
11. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. ропетровського національного університету залізничного транспорту імені В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – № 37. – С. 186 – 190.

Марквардт. – Москва: Транспорт, 1982. – 528 с.

**Ключові слова:** рейкові кола, насичення дросель-трансформаторів, струм асиметрії, опір ізоляції, нормальний режим, гірська ділянка.

**Ключевые слова:** рельсовые цепи, насыщение дроссель-трансформаторов, ток асимметрии, сопротивление изоляции, нормальный режим, горный участок.

**Keywords:** track circuits, saturation of the impedance bonds, current asymmetry, insulation resistance, normal mode, mountain site.

**Рецензенти:**  
проф., д.т.н., А. П. Разгонов,  
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 03.04.2017.  
Прийнята до друку 10.04.2017.