

УДК 656.259.12

А. Ю. ЖУРАВЛЬОВ<sup>1\*</sup>, О. І. САБЛІН<sup>2\*</sup>, В. І. ЩЕКА<sup>3\*</sup>, К. І. ЯЩУК<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта a.yu.zhuravlov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6885-5177

<sup>2\*</sup> Каф. «Екологічна та цивільна безпека», Український державний університет науки і технологій, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 13 03, ел. пошта o.i.sablin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

<sup>3\*</sup> Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.i.shcheka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2184-2827

<sup>4\*</sup> Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта k.i.yashchuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8606-5790

## ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РЕЙКОВИХ КІЛ В УМОВАХ ВПЛИВУ ТЯГОВОГО СТРУМУ

**Мета.** Метою роботи є підвищення електромагнітної сумісності рейкових кіл із системою тягового електропостачання залізниць в умовах впливу завад зворотного тягового струму. Проведення дослідження та аналіз причин порушення роботи рейкових кіл на електрифікованих ділянках залізниці, існуючих засобів та методів підвищення завадостійкості рейкових кіл і забезпечення електромагнітної сумісності пристроїв сигналізації, централізації та блокування із системою тягового електропостачання, та розробка ефективних технічних рішень щодо нормалізації роботи та рейкових кіл в умовах впливу завад тягового струму. Проведення дослідження електромагнітних характеристик колійного дросель-трансформатора ДТ-1-150 в нормальному режимі та при впливі зовнішніх факторів на магнітну систему. **Методика.** Під час дослідження використані методи порівняльного аналізу, синтезу, теорії нелінійних електричних та магнітних кіл, методи спектрального аналізу сигналів, а також методи математичного, схемотехнічного та фізичного моделювання. **Результати.** В роботі проаналізовано ситуації при яких зворотній тяговий струм істотно впливає на роботу апаратури рейкових кіл. Розглянуто вплив постійної складової зворотного тягового струму на нормальний режим роботи рейкового кола полігону електротяги змінного струму. Визначено чисельні значення коефіцієнтів чотирьохполюсника дросель-трансформатора ДТ-1-150 за умов наявності асиметрії зворотного тягового струму. Проведено порівняльний аналіз стійкості до завад зворотного тягового струму колійних приймачів станційних рейкових кіл, що використовуються на станції стикування. Розроблено алгоритм роботи та принципово-структурна схема захисного блоку для блокування витоку завад постійного тягового струму на ділянку електротяги змінного струму. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає в виявленні та обґрунтованні причин деяких специфічних збоїв рейкових кіл, що експлуатуються на ділянках полігону електротяги змінного струму, прилеглих до станцій стикування. В роботі підтверджено інтегральну дію насичення сталі осердя дросель-трансформатора, яке створюється постійною складовою зворотного тягового струму, що розтікається у бік полігону електротяги змінного струму, прилеглою до станції стикування. **Практична значимість.** На основі проведених досліджень підтверджено завадостійкість рейкового кола 25 Гц з колійним реле ДСШ-16 і дросель-трансформатором ДТ-06-500С. Розроблено захисний вентиляційний блок, що унеможливило протікання у рейкових колах, які він захищає, перших періодів перехідного струму найбільшої амплітуди та забезпечує, тим самим, нормальну роботу рейкових кіл.

*Ключові слова:* рейкове коло, станція стикування, завади тягового струму, завадостійкість

### Вступ

Досвідом експлуатації встановлено [1-3, 7-9], що на електричних дорогах змінного струму, тяговий струм істотно впливає на роботу апаратури рейкових кіл (РК), відмови та порушення роботи яких відбуваються в наступних ситуаціях:

- при включенні головних вмикачів (ГВ) на електровозі;
- у разі виникнення електричної дуги на пантографі електровоза при ожеледицях;
- при в'їзді електровоза під навантаженням у зону нейтральної вставки;

- при розтіканні завад постійного тягового струму у бік полігону електротяги змінного струму (в районі станції стикування двох положів електричної тяги).

Існуючі рішення щодо усунення проблеми відмов і збоїв роботи РК внаслідок впливу завад тягового струму на даний момент є не ефективними. Причина у частковому вирішенні глобальної проблеми. Тому на сьогоднішній день існує актуальна потреба у розробці технічних заходів щодо забезпечення перешкодостійкості РК.

Для розуміння всієї глибини проблеми

обов'язково слід детально дослідити причини порушень роботи РК. А надалі запропонувати технічні рішення щодо захисту РК від впливу перешкод тягового струму.

### Вплив завад тягової мережі на нормальний режим роботи РК

На Одеській залізниці було проведено низку експериментальних досліджень, як об'єкти використовувалися: фазочутливе РК 25 Гц з колійним приймачем ДСШ-13А (нормаль ГТСС РК25-ЕТ50-С-88); тональне РК з колійним приймачем типу ПП9 (нормаль ГТСС-ТРК-ЕТ50(АЛС 25, 75)-С-96) та РК для станції стикування (нормаль ГТСС РК25-ЕТ 00/50-С-90).

На станції стикування рейкова лінія для протікання зворотного постійного та змінного тягового струму загальна, відповідно завада постійного тягового струму може проникати на полігон електротяги змінного струму. [3, 7] Фрагмент форми струму в рейці при наближенні рухомої одиниці до дросельного пункту біля вхідного світлофора станції стикування, наведено на рис. 1.

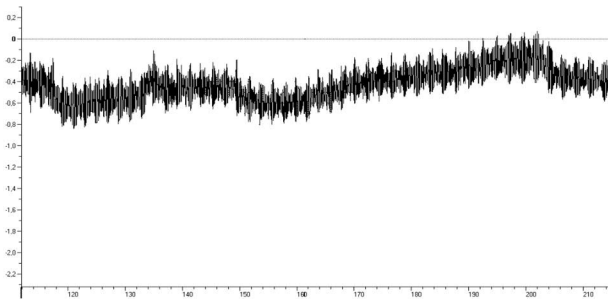


Рис. 1. Форма тягового струму в рейці біля вхідного світлофора станції стикування

Встановлено, що при нормальному (штатному) режимі роботи рівень викиду завади постійного тягового струму у бік полігону електротяги змінного струму мінімальний і становить близько 20-35 А. При переході на вимушений режим тягової підстанції відбувається викид постійного струму до 150 А, який поширюється

далі 25 км від станції стикування у бік полігону електротяги змінного струму, що призводить до виникнення постійного потенціалу рейки-земля до 60 В.

Відомо, що постійний струм призводить до насичення феромагнітного осердя дросель-трансформатор ДТ1-150, що використовується на ділянці електротяги змінного струму [2-4, 6].

В результаті насичення ДТ1-150 опір кола намагнічування на сигнальній частоті 25 Гц та інших падає з 0,9 до 0,18 Ом, що супроводжується зниженням напруги на колійному реле.

Особливо інтенсивно перехідний електричний процес протікає при включенні струму ГВ електровоза і ненавантаженому трансформаторі: відношення амплітуд перехідного струму, що встановився, може досягати 20; при навантаженому трансформаторі – 3,4.

Відомо, що первинний струм трансформатора  $I_1 = I_0 + I'_H$ , або

$$I_1 W_1 - I'_H W_2 = R_\mu \Phi \quad (1)$$

де  $W_{12}$  – кількість витків обмотки трансформатора;  $R_\mu$  – магнітний опір обмотки магнітопроводу;  $\Phi$  – магнітний потік;  $I_0, I_H$  – струм намагнічування та наведений струм навантаження. Потік у колі намагнічування (1) менший у навантаженому трансформаторі, у тому числі в перехідному режимі. Зауважимо, що величина потокозчеплення в колі намагнічування залежить від фази включення ГВ:

$$\psi(t) = \psi_M \sin(\omega t + \alpha - \phi) - \psi_M \sin(\alpha - \phi) e^{-t/\tau} \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кут увімкнення напруги ГВ;

$$\phi = \arctg \frac{\omega L}{R} \approx \frac{\pi}{2} - \text{фаза між напругою та потокозчепленням.}$$

Якщо  $\alpha = 0$ , то за перший період потокозчеплення досягає значення  $\psi(t) = 2\psi_M + \psi_0$ , де  $\psi_0$  – потокозчеплення при  $t=0$ , що пояснює настільки потужний імпульс перехідного струму трансформатора.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів ДТ-1-150 при асиметрії тягового струму

$U_{дв}, В$	$I_k, А$	$A$	$\phi_A, \text{ГР}$	$B$	$\phi_B, \text{ГР}$	$C$	$\phi_C, \text{ГР}$	$D$	$\phi_D, \text{ГР}$	$Z_{xx} = \frac{A}{C}$
0,3	0	0,337	2,5	0,046	18,26	0,355	-66,7	2,82	-0,75	0,905
	50	0,335	-5,1	0,177	99	1,69	-86	3,2	45	0,89
0,7	0	0,334	2,5	0,056	54,1	0,277	-60	2,73	3,76	1,2
	50	0,335	-4	0,187	105	1,69	-85	3,27	48,5	0,197

Були виміряні коефіцієнти чотириполюсника схеми заміщення ДТ-1-150 (табл.1) в режимі його насичення і розраховано напругу на колійному реле РК довжиною 0,2 км (9,15 В). Коефіцієнти виміряно на частоті 25 Гц методом двох відомих навантажень, оскільки методи КЗ та ХХ виявилися тут непридатними.

Розрахунки показали, що при напрузі 9 В колійне реле може ще замикати фронтів контакти, але, як встановлено, що розмиканню контактів у перший період перехідного процесу сприяє перекидний момент сектора реле. Момент виникає за певної різниці фаз між магнітним потоком колійної обмотки (50 Гц) в перший напівперіод і потоком (25 Гц) місцевого елемента. Можна показати, що час  $\tau \approx \pi$  середнє значення сили, що створює момент:

$$\tilde{F} = \frac{1}{b \cdot \tau} \left[ \int_0^{\tau} \Phi_{II} \cdot i_M d\omega t + \int_0^{\tau} \Phi_M \cdot i_{II} d\omega t \right] > F_p \quad (3)$$

де  $i_{II}$ ,  $i_M$ ,  $\Phi_{II}$ ,  $\Phi_M$  – відповідно струми та потоки в колійній та місцевій обмотках реле;

$b$  – ширина полюсів, м.

$F_p$  – зусилля сектора при мінімальній напрузі 9 В.

Перетворюючи формулу (3) для сили, отримаємо:

$$\tilde{F} = \frac{U_{II} \cdot k_M}{2\tau \cdot \omega \cdot W_{II}} \cdot \frac{e^{-\varepsilon t}}{\varepsilon^2 + \Omega^2} (\Omega \sin \Omega \tau - \varepsilon \cos \Omega \tau) \quad (4)$$

де  $U_{II}$  – напруга колійної обмотки;

$$k_M = \frac{\Omega \Phi_M}{Z_C};$$

де  $Z_C$  – опір сектора ( $0,55 \cdot 10^{-4}$  Ом);

$\varepsilon$  – коефіцієнт загасання перехідного струму;

$\Omega$  – кругова частота 25,  $\omega$  – 50 Гц;

$W_{II}$  – кількість витків колійної обмотки.

В результаті з'ясовано, що сила  $\tilde{F}$  в 1,2..1,5 раз перевищує робочу силу ( $\approx 0,5$  Н) сектора та сприяє розмиканню контактів. Нижче зазначено, що саме протягом 1-2 напівперіодів струму 50 Гц створюються умови для відключення вихідного реле приймача тональної РК.

Подальший підйом сектора при напрузі 9 В триває до 0,8 с протягом чого повторюється черговий цикл перехідного процесу. В результаті реле може утримувати фронтів контакти розімкнутими до 8 с до першої зміни фази перших імпульсів струму завади.

## Оцінка нормального режиму роботи РК в умовах впливу завад тягового струму

Існуюче РК (нормаль РК25-ЕТ50-С-88) має низьку завадостійкість до потужних імпульсних завад.

При асиметрії тягового струму понад 15% сектор реле входить у нижнє положення у наслідок впливу на ДТ постійної складової під час включення ГВ [2, 5, 12]. Тут, як зазначалося, діють дві причини відпадання сектора – насичення сталі осердя ДТ і силове збудження першого імпульсу перехідного струму.

На рис. 2 представлена спектрограма тягового струму у перехідному процесі. Видно, що спектр струму суцільний, найбільш потужні непарні гармоніки, що досягають 20..30% від основної гармоніки. Помітні також комбінаційні гармоніки, наприклад, 330 Гц, 380 Гц.

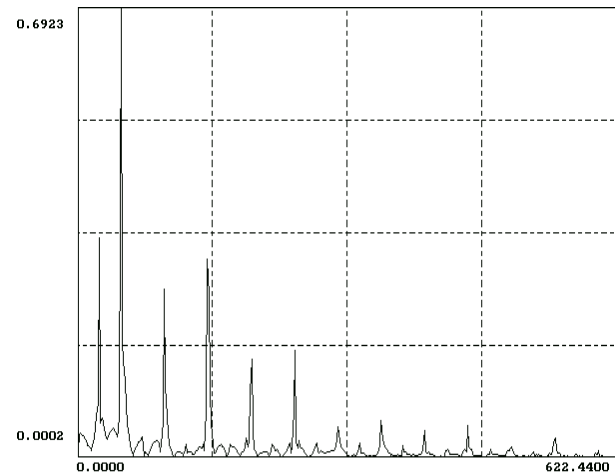


Рис. 2. Амплітудний спектр тягового струму у перехідному процесі

Тональна РК частотою 480 Гц при перехідних процесах тягового струму працювала зі збоями. З осцилограм (рис. 3, рис. 4) струму на виході приймача ПП9/8 видно, що завада пригнічує випрямлений низькочастотний сигнал на відрізок часу до 80 мс. При цьому вихідне реле встигає відпустити якір. З урахуванням часу спрацьовування реле пауза може досягати 180..200 мс.

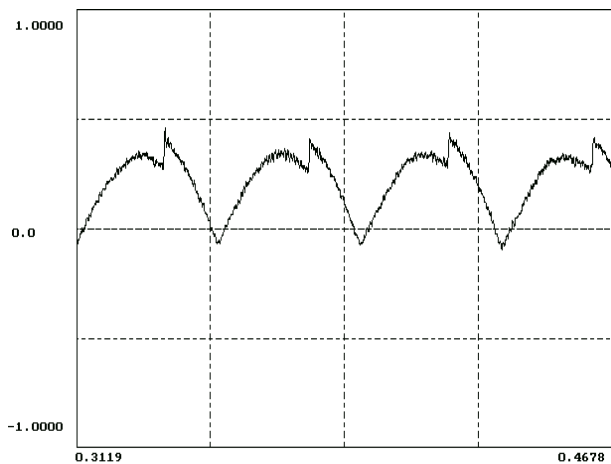


Рис. 3. Часова залежність струму на виході котійного приймача

Підвищення завадостійкості тонального РК досягається підключенням паралельно до обмотки реле конденсатора ємністю 400..500 мкФ [9-12]. Доцільно також застосувати стабілітрони, включені на вході фільтра приймача, з порогом спрацьовування 12..15 В.

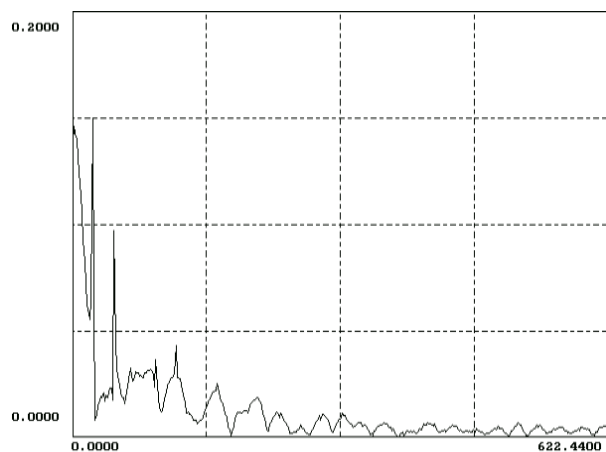


Рис. 4. Амплітудний спектр струму на виході котійного приймача

Крім того, необхідно усунути недоліки, притаманні ТРК: низький коефіцієнт повернення приймача, внаслідок нестабільності мережі живлення; коливань напруг спрацьовування, а також вхідного опору приймача від температури середовища та зміни параметрів фільтра (АЧХ стає двогорбою); удосконалити теорію розрахунку режимів роботи ТРК, застосувати більш надійну елементну базу та ін.

Рейкове коло 25Гц з ДТ-06-500С і приймачем ДСШ-16 виявилось більш завадостійким: при випробуваннях не спостерігалось розмикання контактів реле. Це РК, поряд із тональним РК, (із підключенням до вусовиків ДТ чи з підключенням до сигнальної обмотки ДТ з повітряним проміжком) рекомендовані для застосування в експлуатаційних умовах впливу постійного

тягового струму на ділянках електротяги змінного тягового струму. Спектр зворотного тягового струму в апаратурі приймального кінця цього кола містить значно менше гармонік, що пояснюється лінійністю параметрів осердя; у спектрі немає комбінаційних частот, які в лінійному електричному колі принципово отримати неможливо.

### Підвищення завадостійкості рейкових кіл

В роботі розроблено і приведено захисний вентиляний блок, що включається у розрив середніх точок дросель-трансформаторів (рис. 5) дросельного пункту на ділянці електротяги змінного струму. Призначення блоку – блокувати проходження через середні точки ДТ-1-150 перших періодів максимальної амплітуди перешкод.

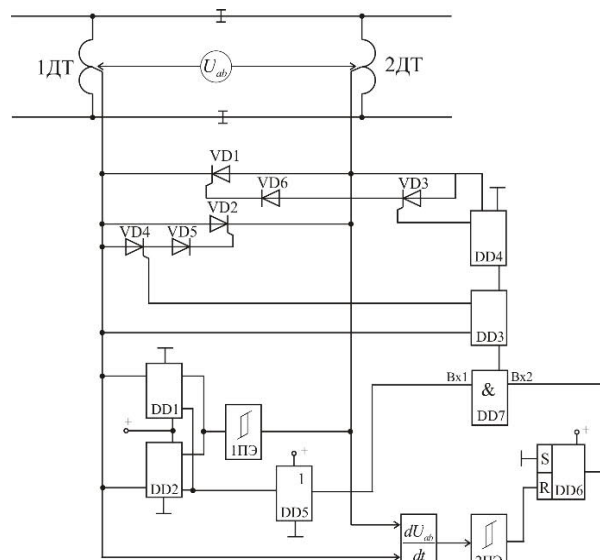


Рис. 5. Принципово-структурна схема захисного блоку

1ДТ, 2ДТ – дроселі; VD1-VD4 – тиристри; VD5, VD6 – діоди; DD1-DD4 – оптрони; DD5 – елемент «I»; DD6 – тригер-одновібратор; DD7 – елемент «I»; 1ПЭ, 2ПЭ – порогові елементи;

$$\frac{dU_{ab}}{dt} \text{ – диференціююча схема.}$$

Блок містить: два силові тиристри; два порогові елементи, один з яких спрацьовує від нижчого рівня потенціалу між середніми точками ДТ-1-150, інший – від вищого, що формується елементом, який реагує на похідну потенціалу; оптрони, два з них включені до схеми управління силових тиристорів, два інших керують роботою порогового елемента; одновібратор, що працює від іншого порогового елемента та створює блокування для пропуску перешкоди тягового струму (суми постійного та змінного

тягових струмів) на ділянку віддалення з електро тягою змінного струму, де використовуються ДТ-1-150 в РК.

Схема, завдяки блокуванню проходження декількох перших напівперіодів максимальних амплітуд завад у тяговій мережі, виключає насичення магнітної системи ДТ і, як наслідок, збоїв в роботі РК. Ефективність роботи запропонованого захисного блоку необхідно випробувати на ділянках доріг, де спостерігаються інтенсивні відмови РК внаслідок впливу завад тягового струму.

### Висновки

В роботі розглянуто причини деяких збоїв РК з ДТ-1-150 в результаті насичення магнітопроводу, що приводить до знеструмлення реле ДСШ, в наслідок зменшення вхідного опору ДТ.

Висвітлено результати експериментальних досліджень впливу завад на РК. Дослідження показали, що більшу завадостійкість має РК 25 Гц з колійним реле ДСШ-16 і ДТ-06-500С; розповсюджене РК з реле ДСШ-13 та ДТ-1-150 не може протистояти впливу потужних завад які спроможні змінювати характеристики елементів кола.

Створено та випробувано захисний вентиляційний блок, що блокує протікання у РК, які він захищає, перших періодів перехідного струму найбільшої амплітуди та забезпечує, тим самим, нормальну роботу РК.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила технічної експлуатації залізниць України. Затв.: Наказ Міністерства транспорту України від 20.12.96 № 41 і зареєстровані Міністерством юстиції України 25.02.97 за № 50/184. Київ : Трансп. України, 2002. 140 с.

2. Zhuravlev A. Y. About track circuit calculation method dependent on ferromagnet properties in conditions of traction current noise influence. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University

of Railway Transport. 2016. No. 1(61). P. 19–29.

3. Lee R. R., Park S. S. Experience of EMC assurance in high-speed railway systems. ECPS. 2021. Vol. 15, no. 2. P. 78–85.

4. Smulders H. W. M., Koopal R. Peaceful coexistence between AC and DC systems. 11th World Congress on Railway Research-WCRR. 2016

5. Track circuits adjusting calculation method under current influence traction interference and electromagnetic compatibility / S. Razghonov et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 985. P. 012-017.

6. Wang G. J., Lee H. K. Advanced measurement methods of electromagnetic interference in traction network. IEEE EMC Magazine. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 83–90.

7. Havryliuk V., Nibaruta R. Mathematical Model of the Induced AC Interference in DC Rails of a Double-Track System. 2022 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Beijing, China, 1–4 September 2022.

8. Scheka V. I., Romancev I. O., Jaschuk E. I. The investigation of reverse traction current influence on tone track circuit modes. Science and Transport Progress. 2012. No. 42. P. 24–28.

9. Zhang G., Wang H., Yang J. Measurement and evaluation methods of electromagnetic interference in AC traction network. IEEE Trans. EMC. 2022. Vol. 64, no. 4. P. 1123–1130.

10. Liu M., Zhao Q. Electromagnetic interference management in railway track circuits with real-time monitoring. IEEE transactions on industrial informatics. 2024. Vol. 20, no. 2. P. 998–109.

11. Park S., Kim T. Electromagnetic compatibility strategies for railway track circuits in high interference environments. IEEE transactions on electromagnetic compatibility. 2024. Vol. 66, no. 3. P. 434–445.

12. Wang J., Jian Y., Zheng J. Analysis of interference and protective measures of electrified traction current on signal track circuit based on Moire signal. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1345. P. 052-051.

Надійшла до редколегії 18.03.2024.

Прийнята до друку 28.05.2024.

A. ZHURAVLOV, O. SABLIN, V. SHCHEKA, K. YASHCHUK

## TRACK CIRCUITS INTERFERENCE RESISTANCE INCREASE UNDER THE TRACTION CURRENT INFLUENCE

**Purpose.** The aim of the work is to increase the electromagnetic compatibility of track circuits with the traction power supply system of railways under the influence of reverse traction current disturbances. Conducting research and analysis of the causes of malfunctions of rail circuits on electrified sections of the railway, existing means and methods of increasing the interference resistance of track circuits and ensuring the electromagnetic compatibility of signaling, centralization and blocking devices with the traction power supply system, and the development of effective technical solutions for normalizing the operation and rail circuits in the conditions influence of traction current interference. Conducting a study of the electromagnetic characteristics of the DT-1-150 track choke-transformer in normal mode and under the influence of external factors on the magnetic system. **Methods.** During the research, methods of

comparative analysis, theories of electric and magnetic circuits, methods of spectral analysis of signals, as well as mathematical, schematic and physical modeling were used. **Findings.** Situations in which the traction current significantly affects the operation of the rail wheel equipment have been analyzed in the work. The effect of the traction current constant component on the normal operation mode of the track circuits is considered. The coefficients value of the choke-transformer DT-1-150 with traction current asymmetry was determined. A comparative analysis of resistance to reverse traction current disturbances of track receivers of station rail wheels used at the docking station was conducted. The principle-structural scheme of the protective unit for blocking the leakage of direct traction current interference on the section of alternating current traction was developed. **The scientific novelty.** The scientific novelty of the work consists in identifying and justifying the causes of some specific failures of track circuit; in confirming the integral effect of choke-transformer steel core saturation, created by the constant component of the traction current in the railway power supply system. **Practical significance.** Based on the conducted research, the interference resistance of the 25 Hz track circuit with the DSSH-16 track relay and DT-06-500S was confirmed. A protective valve block was developed, which prevents the flow of the first periods of the largest amplitude transient current in the track circuit its protects and ensures, thereby, normal operation of track circuit.

*Key words:* track circuit, docking station, traction current interference, interference immunity