

УДК 656.259/519.7

АНАНЬЄВА О. М., д.т.н., доцент,  
БАБАЄВ М. М., д.т.н., професор,  
БЛИНДЮК В. С., д.т.н., професор,  
ДАВИДЕНКО М. Г., к.т.н., доцент  
(Український державний університет залізничного транспорту)

## Математична модель суміші сигналу та багатокомпонентної завади на вході колійних пристроїв тональних рейкових кіл

Спотворення інформаційних сигналів у тональних рейкових колах обумовлене багатьма факторами. Головним фактором є електромагнітні завади. Для створення пристроїв завадостійкого приймання інформаційних сигналів треба мати достатньо повну, обґрунтовану, гнучку й відносно просту математичну модель суміші сигналу та завад. В роботі запропоновано таку модель у вигляді адаптивної суміші. В якості врахованих завадових факторів виступають: завадова напруга від тягового струму в рейках та наведена напруга від лінії електропередач, завадова напруга від тягового перетворювача локомотива, імпульсна завада та стаціонарна випадкова напруга. Обґрунтовано та сформовано аналітичні описи цих завад, які допускають певні варіювання відповідно до апріорної неповноти експериментальних даних щодо них.

**Ключові слова:** тональне рейкове коло, завада, математична модель, оцінювання параметрів.

### Вступ

Сучасні рейкові кола зазнають впливу багатьох факторів, котрі в кінцевому підсумку призводять до спотворення інформаційних сигналів. В умовах штатного функціонування головним чинником спотворень є електромагнітні завади як природного, так і техногенного характеру. Склад і характеристики цих завад варіюються в часі вельми швидко та малопередбачувано. Функціональна ж безпека тональних рейкових кіл вимагає дотримання одних і тих самих показників незалежно від поточної завадової ситуації. Тому аналіз можливих завад з метою застосування його результатів для конструктивного вирішення проблеми гнучкої та ефективної протидії завадовим впливам на тональні рейкові кола (ТРК) є вельми актуальним.

### Постановка проблеми і аналіз досліджень і публікацій

Наявність та інтенсивність завад конкретного виду на даній ділянці ТРК залежить від багатьох факторів: наявності та типу електричної тяги, виду силових установок при локомотивній тязі, якості та стабільності контактів струмознімачів і проводів та (або) коліс і рейок, від наявності та характеристик близькорозташованих ліній електропередачі, від стану атмосфери (наявність блискавок), від степеню електромагнітного зв'язку з місцевим радіоелектронним обладнанням. Крім того, в рейковому колі завжди існує електромагнітний фон,

створений тепловим рухом носіїв електричного заряду, а також сумарним впливом великої кількості слабких електромагнітних подій аж до подій астрономічного характеру.

В роботі [1] наведені спектральні характеристики завад, притаманних колійним перетворювачам, та вказано на адитивність цих завад щодо інформаційних сигналів. Однак спектральні дані носять вельми ескізний характер, недостатній для формування математичних моделей конкретних завад. Адитивність же як таку варто прийняти до уваги. В роботі [2] наведені в табличному вигляді амплітуди гармонічних складових завад від тягового струму та відносна інтенсивність імпульсних завад від тягового струму. Ці дані самі по собі не дають повного визначення математичних моделей відповідних завад, але частково визначають їх структуру та взаємодію із завадами інших типів. Монографія [3] містить майже вичерпний перелік електромагнітних завад роботі рейкових кіл та деякі числові характеристики цих завад; охоплення фактичного матеріалу в ній більше, аніж у роботі [2]. Наведені в монографії [3] дані теж мають важливий, але не визначальний характер, аналогічний такому для роботи [2]. У монографії [4] детально розглянуто всі аспекти завад від тягового струму, і з цього боку вона цілком задовольняє потреби математичного моделювання завад саме цього типу; ця ж причина обмежує її інформативність тільки рамками вказаного типу завад. Випадки адитивного впливу кількох

однотипних завад розглянуті в роботах [5, 6]. Але саме однотипність завад звужує область застосовності розглянутих там моделей. В статтях [7, 8] запропоновано адитивну модель впливу на сигнал з боку детермінованих доданків і шумової компоненти. Однак отримані результати носять спеціалізований характер, оскільки обмежені специфікою сигналів автоматичної локомотивної сигналізації неперервного типу. Таким чином, на даний час опубліковані як фактичні дані, що описують числові параметри завад, характерних для рейкових кіл, так і низка математичних моделей адитивного впливу електромагнітних завад на інформаційні сигнали. Однак авторам не вдалося виявити публікацій, в яких була б в чіткій математичній формі наведена фактично обґрунтована модель адитивної суміші сигналу та завад, притаманної саме тональним рейковим колам. Тому фактологічне і математичне формулювання такої моделі у вигляді, придатному для подальшої розробки пристроїв завадостійкого прийому сигналів ТРК, наразі потребує прикладення певних дослідницьких зусиль.

#### Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є побудова математичної моделі суми інформаційного сигналу та завад на вході колійного пристрою тонального рейкового кола. Для дослідження цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати існуючі експериментальні дані щодо вказаних завад і обґрунтовано визначити найвпливовіші з них;
- розробити математичну модель кожної з відібраних завад за існуючих умов, коли їх наявність експериментальні характеристики носять частково уривчастий та (або) нечисловий характер;
- обмежити складність розроблених моделей маючи на увазі їх придатність до економічної з точки зору обчислень та фізично обґрунтованої числової оцінки їх параметрів.

#### Основна частина

##### Розробка математичної моделі суміші сигналу та завад

Визначимо як місце знімання напруги, що підлягає моделюванню, затискачі первинної обмотки колійного трансформатора приймального кінця ТРК. Довжину  $[T_1, T_2]$  інтервалу спостереження оберемо такою, щоб 1) він був не більшим ніж обраний з умов експлуатації час сповільнення спрацьовування вихідного виконавчого реле; 2) на ньому проявлялися ті властивості завад, котрі не залежать від причин їх виникнення та від величин їх параметрів на цьому інтервалі; 3) параметри сигналу та завад на цьому інтервалі можна було б вважати сталими. Прийнятною

величиною можна вважати  $T_2 - T_1 = 1$  с. Це приблизно середня величина часу сповільнення спрацьовування реле [2]. Крім того, на такому інтервалі цілком вкладається найбільш короткочасна із завад – імпульсна, протяжність якої не перевищує 0,4 с [2].

Перелік завад, котрий можна скласти за підсумками експериментальних досліджень, наведеними в джерелах [1-4, 9], розбивається на такі групи:

- такі, що походять власне із елементів конструкції рейкового кола;
- такі, що утворені системою електропостачання;
- такі, що утворені тяговим обладнанням локомотива;
- такі, що утворені позазалізничними факторами.

Виходячи з цього переліку, модельовану суміш сигналу та завад як функцію часу  $t$  можна записати в такому вигляді:

$$u(t) = s(t) + v_c(t) + v_q(t) + v_T(t) + v_p(t) + n(t), \quad (1)$$

де  $s(t)$  – інформаційний сигнал;  $v_c(t)$  – завада від суміжного ТРК;  $v_q(t)$  – завада від тягового струму в рейках та наведення від лінії електропередач;  $v_T(t)$  – завада від тягового перетворювача локомотива;  $v_p(t)$  – імпульсна завада;  $n(t)$  – гаусівська стаціонарна випадкова завада.

Інформаційний сигнал можна представити в такому вигляді:

$$s(t) = U_{ms} \cdot g_s(t - \tau_s) \cdot \sin(\omega_s t + \varphi_s). \quad (2)$$

Тут  $U_{ms}$  – амплітуда несучого синусоїдного коливання;  $g_s(t - \tau_s)$  – кодова обвідна, яка описує модулюючу послідовність сигналу ТРК;  $\tau_s$  – часовий зсув моменту появи сигналу відносно точки початку відліку часу;  $\omega_s$  – кутова частота несучого синусоїдного коливання;  $\varphi_s$  – початкова фаза цього коливання. Величина  $\varphi_s$  автоматично враховує й часовий зсув  $t'$  несучої, оскільки  $\sin[\omega_s(t - t') + \varphi] = \sin[\omega_s t + (\varphi - \omega_s t')]$ . Звідси, позначивши  $\varphi_s = \varphi - \omega_s t'$ , приходимо до виразу (2).

Завада від суміжного ТРК має аналогічний (2) вигляд

$$v_c(t) = U_{mc} \cdot g_c(t - \tau_c) \cdot \sin(\omega_c t + \varphi_c). \quad (3)$$

де фізичний сенс параметрів той самий, що й для інформаційного сигналу (2), але стосовно до суміжного ТРК.

Заваду від тягового струму в рейках та наведення від лінії електропередач можна описати таким виразом:

$$v_Q(t) = \sum_{n=1}^N U_{mQn} \cdot \sin(n\omega_Q t + \varphi_{Qn}), \quad (4)$$

де  $N$  – кількість врахованих гармонік тягової напруги;  $U_{mQn}$  – амплітуда  $n$ -ї гармоніки;  $\omega_Q = 100\pi$  рад/с – кутова частота першої гармоніки;  $\varphi_{Qn}$  – початкова фаза  $n$ -ї гармоніки.

Тут враховано, що частота першої гармоніки тягової напруги збігається з частотою наведення від лінії електропередач і за умови постійності інших параметрів цих коливань їх сума теж є синусоїдальною тієї самої частоти.

Точний вигляд завади від тягового перетворювача локомотива як функція часу є слабо передбачуваним. Вона може бути утвореною як в результаті випрямлення мережної напруги частотою 50 Гц, так і в результаті роботи електрогенератора або інвертора напруги в автономних або імпульсних системах електроживлення тягових двигунів. За незмінної частоти такої напруги на обраному нами інтервалі спостереження протяжністю 1 с маємо в першому випадку сукупність гармонік з частотами, кратними 50 Гц, а в другому випадку – сукупність гармонік, частоти яких кратні основній частоті  $f_T$ , яка в різних системах і режимах тяги лежить в діапазоні від 2 Гц до 120 Гц [9]. Відповідною обом випадкам математичною моделлю завадової напруги є

$$v_T(t) = \sum_{m=1}^M U_{mTm} \cdot \sin(m\omega_T t + \varphi_{Tm}), \quad (5)$$

де  $M$  – кількість врахованих гармонік основної частоти завади від тягового перетворювача локомотива;  $U_{mTm}$  – амплітуда  $m$ -ї гармоніки;  $\omega_T = 2\pi f_T$  – кутова частота першої гармоніки;  $\varphi_{Tm}$  – початкова фаза  $m$ -ї гармоніки.

Зауважимо, що використання моделі (5) є коректним за припущення, що на ТРК впливає тільки один локомотив одночасно.

Експериментальні дані про імпульсну заваду, наведені в [2] у вигляді її спектру амплітуд, визначають цю заваду як відео процес, тобто таке коливання, в якого енергоємні спектральні компоненти лежать в діапазоні частот від нуля і до умовної граничної частоти. Згідно з роботою [2], ця гранична частота не більша 1 кГц, а за рівнем половинної потужності – близько 100 Гц. На підставі таких даних

виглядатиме несуперечливою модель імпульсної завади типу «відрізок синусоїди на п'єдесталі»:

$$v_P(t) = U_{0P} + U_{mP} \cdot \sin(2\pi f_P t + \varphi_P), \quad t \in [T_{P1}, T_{P2}]. \quad (6)$$

Тут  $U_{0P}$  – висота «п'єдесталу», тобто амплітуда прямокутного імпульсу протяжністю від моменту часу  $T_{P1}$ ;  $U_{mP}$  – амплітуда синусоїди, з якої обирають вказаний відрізок;  $f_P$  – частота цієї синусоїди;  $\varphi_P$  – її початкова фаза. Часом існування імпульсної завади, таким чином, є відрізок  $[T_{P1}, T_{P2}]$ , протяжність якого менша ніж інтервал спостереження  $[T_1, T_2]$ . Вираз (6) забезпечує описання як імпульсу з крутими фронтами і коливаннями на вершині, так і (за умови, що  $f_P \lesssim 1/(T_{P1}, T_{P2})$ ) гладкого в часі імпульсу.

Нарешті останній компонент  $n(t)$  завади, який являє собою гаусівський стаціонарний випадковий процес, займає дуже широкий діапазон частот, починаючи з нуля, і згасаючи на частотах, на багато порядків вищих, ніж граничні частоти всіх попередніх компонентів. Тому його можна визначити відповідно до класичної монографії [10] як гаусівський процес з рівномірним обмеженням спектром.

## Висновки

За результатами аналізу підсумків експериментальних досліджень існуючі завади розбито на кілька визначених груп. Для кожної групи завад, а також для інформаційного сигналу розроблено математичні моделі, які враховують наявні експериментальні дані. Кожна з моделей припускає певні варіювання відповідно до апріорної неповноти (уривчастості та нечислового характеру) експериментальних даних. Розроблені математичні моделі чітко визначають сукупність параметрів, які підлягають числовому оцінюванню. Кожна з цих моделей визначається невеликою кількістю параметрів, що дозволяє сподіватися на можливість синтезу економної з точки зору обчислень процедури їх числового оцінювання.

## Список використаних джерел

1. Соболев Ю. В. Путевые преобразователи автоматизированных систем управления железнодорожного транспорта. Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 1999. 150 с.
2. Кулик П. Д., Ивакин Н. С., Удовиков А. А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности. Киев: Издательский дом «Мануфактура», 2004. 288 с.

3. Лисенков В. М. Теория автоматических систем интервального регулирования. Москва : Транспорт, 1987. 150 с.
4. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. Москва : УМК МПС, 2002. 638 с.
5. Djukanovic S., Popovic V. A Parametric Method for Multicomponent Interference Suppression in Noise Radars. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. Vol. 48, Issue 3. P. 2730-2738. doi:<https://doi.org/10.1109/taes.2012.6237624>.
6. Liu Z., Liu H., Xu W., Chen Y. An Error-Minimizing Framework for Localizing Jammers in Wireless Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2014. Vol. 25. Issue 2. P. 508-517. doi:<https://doi.org/10.1109/tpds.2013.33>.
7. Ananieva O., Babaiev M., Blyndiuk V., Davidenko M. Improving and Interference Immunity of Railway Transport Control Systems. *ICTE in Transportation and Logistics 2019. E. Ginters et al. (Eds.) Springer Nature Switzerland AG*. 2020. P. 287-294. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_36).
8. Ананьева О. М. Математическая модель смеси сигнала и многокомпонентной помехи на входе путевых устройств железнодорожной автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 6. С. 16-19.
9. Шаманов В. И. Помехи и помехоустойчивость автоматической локомотивной сигнализации. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2005. 236 с.
10. Фалькович С. Е., Хомяков Э. Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. Москва : Радио и связь, 1981. 288 с.

**Ананьева О. М., Бабаев М. М., Блиндюк В. С., Давиденко М. Г. Математическая модель смеси сигнала и многокомпонентной помехи на входе путевых устройств тональных рельсовых цепей.**

**Аннотация.** Искажение информационных сигналов в тональных рельсовых цепях обусловлено многими факторами. Главным фактором являются электромагнитные помехи. Для создания устройств помехоустойчивого приема информационных сигналов надо иметь достаточно полную, обоснованную, гибкую и относительно простую математическую модель смеси сигнала и помех. В работе предложена такая модель в виде адаптивной смеси. В качестве учтенных факторов помех учитываются: напряжение помех от тягового тока в рельсах и приведенное напряжение от линии электропередач, напряжение помех от тягового преобразователя локомотива, импульсная помеха и стационарное случайное напряжение. Обоснованы и сформированы аналитические описания этих помех, которые допускают определенные варьирования согласно

априорной неполноте экспериментальных данных относительно них.

**Ключевые слова:** тональная рельсовая цепь, помеха, математическая модель, оценивание параметров.

**Ananieva O., Babaiev M., Blyndiuk V., Davidenko M. Mathematical model of mix of signal and multicomponent interference on entrance of track devices of tonal rail chains.**

**Abstract.** The distortion of information signals in tone rail chains is caused by many factors. The main factor are electromagnetic interferences. For creation devices of interference-immune reception and of information signals it is necessary to have rather full, reasonable, flexible and rather simple mathematical model of mix of a signal and interferences. In work such model in the form of adaptive mix is offered. As the examined factors of interference are considered: interference voltage from a traction current in rails and the specified tension from a transmission line, interference voltage from the traction transformer of the locomotive, impulse interference and stationary accidental tension. Analytical descriptions of these interferences which allow certain variations according to the aprioristic incompleteness of experimental data concerning them are proved and created.

**Keywords:** tonal rail chains, interference, mathematical model, parameter estimation.

*Надійшла 25.05.2020 р.*

**Ананьева Ольга Михайлівна**, д.т.н., доцент, кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [romashka13052015@gmail.com](mailto:romashka13052015@gmail.com) ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>

**Бабаев Михайло Михайлович**, д.т.н., професор, завідувач кафедри, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [mmbxii@gmail.com](mailto:mmbxii@gmail.com) ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3553-8786>

**Блиндюк Василь Степанович**, д.т.н., професор, проректор, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [akademyzd\\_bvs@ukr.net](mailto:akademyzd_bvs@ukr.net) ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2152-5773>

**Давиденко Михайло Георгійович**, к.т.н., доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [davdenk@kart.edu.ua](mailto:davdenk@kart.edu.ua) ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7255-3059>

**Olha Ananieva**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of automation and computer telecontrol train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [romashka13052015@gmail.com](mailto:romashka13052015@gmail.com) ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6686-8249>

**Mykhailo Babaiev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of electroenergy, electrical equipment and electromecanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [mmbxiit@gmail.com](mailto:mmbxiit@gmail.com) ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3553-8786>

**Vasyl Blyndiuk**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [akademyzd\\_bvs@ukr.net](mailto:akademyzd_bvs@ukr.net) ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2152-5773>

**Mykhailo Davidenko**, PhD, Associate Professor, Department of of electroenergy, electrical equipment and electromecanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, E-mail: [davdenk@kart.edu.ua](mailto:davdenk@kart.edu.ua) ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7255-3059>