

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

Оптимальне приймання інформаційних сигналів в умовах дії п'ятикомпонентної завади

Тональні рейкові кола (ТРК) є важливим засобом підтримки безпеки залізничного руху. В складній електромагнітній обстановці інформаційні сигнали ТРК зазнають сильних спотворень від завад різного типу та походження. Це знижує безпеку руху. Розглянуто випадок, коли інформаційний сигнал спостерігають на фоні суми імпульсної завади, завади від тягового перетворювача локомотива, завади від тягового струму та лінії електропередач промислової частоти, завади від суміжного ТРК та широкосмугового гаусівського шуму. Визначено критерій оптимальності завадостійкого приймання інформаційного сигналу. Сформовано цільову функцію відповідно до цього критерію. Вигляд сформованої цільової функції оптимізовано шляхом виключення з неї доданків, які відповідають слабким кореляційним зв'язком як між інформаційним сигналом і завадами, так і завад між собою. В результаті отримано базову обчислювальну структуру, яка має забезпечити завадостійке приймання шляхом сумісної оцінки параметрів інформаційного сигналу та структурно-детермінованих завад.

Ключові слова: тональне рейкове коло, інформаційний сигнал, структурно-детермінована завада, взаємна кореляція.

Вступ

Тональні рейкові кола (ТРК) є важливим засобом підтримки безпеки залізничного руху. Просторова протяжність ТРК та їх фізична відкритість для зовнішніх електромагнітних впливів призводять до утворення в них одночасно кількох електричних завад різного характеру та походження. Загальна кількість радіоелектронних засобів, що локалізуються поблизу ТРК, невпинно зростає. Тому зростає і їх спотворюючий вплив на інформаційні сигнали ТРК, що викликає збої в роботі систем інтервального регулювання руху. Це призводить до зниження безпеки руху. Тому розв'язання задачі розробки стійких до завад методів і засобів приймання інформаційних сигналів ТРК набуває зростаючої важливості.

Постановка проблеми і аналіз досліджень і публікацій

При помірному рівні електромагнітних діянь рейкове коло є лінійним. За цієї умови для нього найбільш характерні адитивні завади, які часто мають кілька компонент. На даний час в літературі розглянуто кілька підходів до захисту від таких завад. В роботі [1] наведено синтез пристрою оптимального приймання сигналу на фоні адитивної трикомпонентної завади. Область застосування вказаного пристрою не є досить широкою з огляду на

малу кількість взятих до уваги компонент. Приймачу з поліноміальною апроксимацією фази [2] також притаманний цей недолік. В роботі [3] описано спосіб попереднього оцінювання просторового розташування кількох джерел завад. Таке оцінювання являє собою додатковий етап обробки вхідної напруги, який штучно приєднаний до процедури традиційної обробки сигналу. Тому сукупність двох таких етапів не є процедурою оптимальної обробки сигналу. В статті [4] представлено метод приймання в умовах, коли багатоконпонентна завада виникла в результаті багатознакового поширення сигналу. Компоненти завади в цьому випадку являють собою копії корисного сигналу. Такий тип завад притаманний досить вузькому колу систем зв'язку – гідроакустичним і тому має обмежену область застосування. П'ятикомпонентну модель завади Ю складові якої характерні саме для ТРК, сформовано в роботі [5]. Однак ця модель ще не є фактором, який однозначно визначає методику обробки подібної суміші і сигналу та завад. Взагалі, авторам не вдалося виявити опублікованих матеріалів досліджень, які б висвітлювали завадостійке приймання в умовах дії більш ніж трьох різнотипних завад. Тож викликає теоретичний та практичний інтерес розгляд можливості завадостійкого приймання сигналів ТРК в ситуації одночасної дії п'ятих різнотипних за характером та походженням завад.

© О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв, М. Г. Давиденко, В. В. Панченко, 2021

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження було визначено синтез базової обчислювальної структури пристрою, який забезпечує завадостійке приймання сигналів ТРК в умовах дії п'ятикомпонентної завади. При цьому чотири її компоненти являють собою структурно детерміновані коливання, а п'ята є ширококутовим гаусівським шумом.

Для досягнення вказаної мети слід було розв'язати такі задачі:

- визначити критерій оптимальності завадостійкого приймання;
- сформувати цільову функцію відповідно до визначеного критерію оптимальності;
- оптимізувати вигляд сформованої цільової функції з урахуванням степенів кореляційних зв'язків як між сигналом та завадами, так і завад між собою.

Основна частина

Визначення критерію оптимальності

Як показано в роботі [5], обґрунтованою довжиною інтервалу спостереження сигналу на приймальному кінці ТРК є відрізок часу $\Delta T = T_2 - T_1 = 1$ с, де T_1 – момент початку

$$\epsilon_H^2 = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \left\{ u(t) - [s(t) + v_P(t) + v_T(t) + v_Q(t) + v_C(t)] \right\}^2 dt. \tag{1}$$

Вважатимемо, що $T_1 = 0$ (тобто сумісно з нулем початок інтервалу спостереження). Також вважатимемо, що напруга на вході кінцевого пристрою ТРК рівномірно продискретизована в часі з інтервалом

спостереження, T_2 – момент кінця спостереження. З точки зору безпеки руху рішення щодо стану контрольованої ділянки рейкової лінії треба приймати якомога частіше. В даному випадку це означає, що таке рішення треба приймати за підсумками спостереження на кожному з інтервалів. Параметри і склад описаних в роботі [5] структурно-детермінованих завад можуть змінюватися щоділянки інтервалу. Їх також неможливо спостерігати в окремому від сигналу каналі. Тому єдиним виходом є сумісне оцінювання параметрів сигналу та структурно-детермінованих завад на фоні єдиної з введених в роботу [5] випадкової завади у вигляді ширококутового стаціонарного гаусівського шуму. В такій ситуації найкращу точність отримуваних оцінок забезпечує оцінювання за критерієм мінімуму середнього квадрату похибки [6].

Формування цільової функції

Всі подальші розрахунки будемо виконувати, базуючись на термінології та позначеннях, які введені в роботу [5]. Отже, за прийнятим в попередньому підрозділі критерієм найкращими оцінками параметрів сигналу і завад беруть такі їх числові значення, які забезпечують мінімум величини

Δt . При кількості відліків напруги K матимемо $T_2 = (K - 1) \cdot \Delta t$, а вираз (1) перетвориться на

$$\epsilon_H^2 = (K - 1)^{-1} \cdot \sum_{k=1}^K \left\{ u_k - (s_k + v_{Pk} + v_{Tk} + v_{Qk} + v_{Ck}) \right\}^2, \tag{2}$$

де $u_k = u(t_k) = u((k - 1)\Delta t)$; аналогічний сенс мають й інші доданки суми (2).

Оскільки $K = const$, то з мінімумом величини ϵ_H^2 збігатиметься й мінімум величини

$$\epsilon_u^2 = (K - 1)\epsilon_H^2 = \sum_{k=1}^K \left\{ u_k - (s_k + v_{Pk} + v_{Tk} + v_{Qk} + v_{Ck}) \right\}^2 \tag{3}$$

Після піднесення до другого степеня та групування доданків отримаємо таку цільову функцію:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_u^2 = & \sum_{k=1}^K u_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Pk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Tk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Qk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Ck} - 2 \sum_{k=1}^K u_k s_k + \\
 & + \sum_{k=1}^K v_{Pk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Tk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Qk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Ck}^2 + \sum_{k=1}^K s_k^2 + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk} + \\
 & + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Ck} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} s_k + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck} + \\
 & + 2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} v_{Ck} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k + 2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k + 2 \sum_{k=1}^K v_{Ck} s_k .
 \end{aligned} \tag{4}$$

Перший доданок цього виразу є постійною величиною для вибірки числових значень $\{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, отриманої на кожному конкретному інтервалі спостереження. Отже, ця величина не впливає на положення мінімуму числової величини ϵ_u^2 в просторі параметрів сигналу та завад і тому її можна виключити з кінцевого виразу для цільової функції. Доданки у вигляді сум квадратів сигналу та завад мають фізичний сенс енергій цих коливань на інтервалі спостереження; вони суттєво впливають на ϵ_u^2 . Також суттєво впливають на цю величину і взаємні кореляційні функції сигналу і вибірки $\sum_{k=1}^K u_k s_k$ та кожної із завад та вибірки $\sum_{k=1}^K u_k v_k$. Всі інші доданки суми (4) є взаємними кореляційними функціями завад та кожної з завад із сигналом. Як буде показано нижче, деякі з них дають знехтувано малий внесок в цільову функцію.

Оптимізація вигляду цільової функції

Спочатку оцінимо взаємні кореляційні зв'язки сигналу з кожною із завад. Зв'язок сигналу з імпульсною завадою описується у виразі (4) взаємно кореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} s_k$. Для оцінки її величини перейдемо до неперервного часу. Згідно з (7), для комплексних процесів $x(t)$ та $y^*(t)$ (зірочка означає комплексне спряження) справедлива рівність

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot y^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot Y^*(f) df, \tag{5}$$

де $X(f)$ та $Y(f)$ – спектральні щільності вказаних процесів.

За даними роботи [8], спектр імпульсної завади монотонно спадає із зростанням частоти. Тому слід очікувати, що ця завада чинить найбільший вплив на низькочастотні ТРК. Найнижча можлива несуча частота ТРК дорівнює 420 Гц; на цій частоті модуль спектральної щільності імпульсної завади складає менш ніж 5 % від свого амплітудного значення [8]; в той же час модуль спектральної щільності сигналу різко спадає при відході від несучої частоти. Тому наведений вище інтеграл від добутку спектральних щільностей дуже малий порівняно з енергією кожного з співмножників, а відтак малим є й інтеграл за часом від добутку сигналу та імпульсної завади і, відповідно, малою є й відповідна йому взаємнокореляційна сума $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} s_k$. Тож цим доданком виразу (4) можна знехтувати.

Зв'язок сигналу із завадою від тягового перетворювача локомотива описується у виразі (4)

взаємнокореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k$. Оскільки

частота імпульсів може сягати 120 Гц (а частоти їх найпотужніших гармонічних складових приблизно в 10 разів більші), то в певних випадках слід очікувати сильної кореляції сигналу із цим видом завади. Тож

доданок $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k$ треба залишати.

Зв'язок сигналу із завадою від тягового струму в рейках та від лінії електропередач описано у виразі (4)

взаємнокореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k$. Гармоніки

цієї завади мають частоти, кратні 50 Гц. Порівнюючи їх частоти із частотами гармонік інформаційних сигналів ТРК, неважко впевнитися, що мінімальна відстань між цими частотами складає не менш ніж 20 Гц. Взаємна кореляційна сума двох настільки

рознесених по частоті синусоїдних коливань на інтервалі спостереження протяжністю 1 с практично

дорівнює нулю. Тому доданком $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k$ виразу

(4) можна знехтувати.

Зв'язок сигналу із завадою від суміжного ТРК описано у виразі (4) взаємнокореляційною сумою

$2 \sum_{k=1}^K v_{Ck} s_k$. Як показано в роботі [9], цією

компонентою теж можна знехтувати.

Взаємнокореляційний зв'язок між імпульсною

завадою та завадою від тягового перетворювача локомотива описано у виразі (4) сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk}$.

Частоти прямування імпульсів тягового перетворювача лежать в діапазоні 2...120 Гц [5]. Цей діапазон повністю перекривається із спектром імпульсної завади [8], тому згідно із співвідношенням (5) розглянутою взаємнокореляційною сумою знехтувати не можна.

З тільки що наведеної причини не можна знехтувати й взаємнокореляційною сумою

$2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk}$. А ось сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Ck}$ знехтувати

можна з тієї ж самої причини, з якої ми знехтували взаємнокореляційною сумою імпульсної завади та інформаційного сигналу.

$$\begin{aligned} \xi = \varepsilon_u^2 - \sum_{k=1}^K u_k^2 \approx & \sum_{k=1}^K v_{Pk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Tk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Qk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Ck}^2 + \sum_{k=1}^K s_k^2 - \\ & - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Pk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Tk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Qk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Ck} - 2 \sum_{k=1}^K u_k s_k + \\ & + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck}. \end{aligned} \quad (6)$$

Отриманий вираз являє собою шукану базову обчислювальну структуру.

Висновки

В ході вирішення проблеми синтезу базової обчислювальної структури пристрою завадостійкого приймання сигналів ТРК в умовах дії складної адитивної завади, чотири компоненти якої є структурно-детермінованими, а п'ята являє собою широкосмуговий гаусівський шум, визначено критерій оптимальності приймання, а також сформовано

Взаємнокореляційна сума $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk}$ описує

зв'язок між завадою від тягового перетворювача локомотива та завадою від тягового струму в рейках та від лінії електропередач. Частоти гармонік останньої завади кратні 50 Гц, а частоти гармонік завади від тягового перетворювача локомотива кратні змінній величині, яка лежить в діапазоні 2...120 Гц [5]. В певних режимах роботи перетворювача в обидвох послідовностях гармонік можуть бути такі гармоніки, частоти яких співпадають або дуже близькі і тому їх взаємною кореляцією знехтувати не можна.

Далі, доданком $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck}$ знехтувати не можна

з тієї самої причини, з якої було залишено доданок

$2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k$, а доданок $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} v_{Ck}$ можна

відкинути з тієї самої причини, з якої було відкинуто

доданок $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k$.

Отже, нами оцінено значущість та внески всіх доданків цільової функції (4). Виходячи з наведених міркувань, можна досягти певної економії в обмеженнях без суттєвого впливу на результати оцінювання, якщо шукати таку сукупність параметрів сигналу та завад, що мінімізує величину

відповідну цьому критерію цільову функцію та оптимізовано її вигляд з урахуванням взаємних кореляційних зв'язків компонентів адитивної суміші сигналу та завад. Як напрямок подальшої роботи вбачається дослідження можливостей реалізації базової обчислювальної структури з мінімумом обчислювальних затрат.

Список використаних джерел

1. Development of a device for the optimal reception of signals against the background of an additive three-

- component interference / O. Ananieva, M. Babaiev, V. Blyndiuk, M. Davidenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, Issue 9 (98). P. 6 – 13. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.159310>.
2. 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>.
 3. An Error-Minimizing Framework for Localizing Jammers in Wireless Networks / Z. Liu, H. Liu, W. Xu, Y. Chen. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2014. Vol. 25, Issue 2. P. 508–517. doi:<https://doi.org/10.1109/tpds.2013.33>.
 4. Yoshizava S., Tanimoto H., Saito T. Data Selective Rake Reception for Underwater Acoustic [Electronic resource]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. Vol. 2017. P. 1-9. / doi: <https://doi.org/10.1155/2017/5793507>.
 5. Математична модель суміші сигналу та багатокомпонентної завади на вході колійних пристроїв тональних рейкових кіл / О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк, М. Г. Давиденко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 2. С. 3-7. doi: 10.18664/iksz.v25i2.206825.
 6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва : Радио и связь, 1989. 656 с.
 7. Сиберт У. М. Цепи, сигналы, системы. Ч. 2. Москва : Мир, 1988. 360 с.
 8. Кулик П. Д., Ивакин В. 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.
 9. Взаємна кореляція компонентів завад роботи тональних рейкових кіл / С. В. Панченко, О. М. Ананьєва, М. Г. Давиденко, М. М. Бабаєв. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 3. С. 3-7.

Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оптимальний прийом інформаційних сигналів в умовах дійства п'ятикомпонентної помехи.

Анотація. Тональні рельсові цепі (ТРЦ) являються важливим засобом підтримки безпеки залізничного руху. В складній електромагнітній обстановці інформаційні сигнали ТРЦ зазнають сильних спотворень від різних типів і походжень. Це знижує безпеку руху. Розглянуто випадок, коли інформаційний сигнал спостерігають на фоні сумми

імпульсної помехи, помехи від тягового перетворювача локомотива, помехи від тягового струму та лінії електропередач промислової частоти, помехи від сусідньої ТРЦ та широкополосного гаусовського шуму. Визначено критерій оптимальності помехостійкого прийому інформаційного сигналу. Сформульовано цільову функцію згідно цього критерію. Вид сформованої цільової функції оптимізовано шляхом виключення з неї складових, які відповідають слабкій кореляційній зв'язку між інформаційним сигналом і помехами, так і між самими собою. В результаті отримано базову обчислювальну структуру, яка повинна забезпечити помехостійкий прийом шляхом спільної оцінки параметрів інформаційного сигналу та структурно-детермінованих шумів.

Ключові слова: тональна рельсова ланка, інформаційний сигнал, структурно-детермінована помеха, взаємна кореляція.

Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V. Optimum reception of information signals in the conditions of action of the five-component interference.

Abstract. The Tone Rail Chains (TRC) is important means of support of safety of railway traffic. In a difficult electromagnetic situation information signals of TRC will experience strong distortions from interferences of different type and origin. It reduces traffic safety. The case when information signal is observed against the background of the sum of a pulse interference, a interference from the traction converter of the locomotive, a interference from traction current and the power line of industrial frequency, a interference from adjacent TRC and broadband Gaussian noise is considered. The optimality criterion of noiseproof reception of information signal is defined. Criterion function according to this criterion is created. The type of the created criterion function is optimised by an exception of it composed which answer with weak correlation communication as between information signal and interferences, and interferences among themselves. It is as a result received basic computing structure which has to provide noiseproof reception by joint assessment of options of information signal and the structural determined interferences.

Keywords: tonal rail chains, information signal, structurally deterministic interference, mutual correlation.

Надійшла 22.02.2021 р.

Ананьєва Ольга Михайлівна, д.т.н., професор, кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків,

Україна. E-mail: romashka13052015@gmail.com ID
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>

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

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 ID ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-7255-3059>

Панченко Владислав Вадимович, к.т.н., доцент,
кафедра електроенергетики, електротехніки та
електромеханіки, Український державний
університет залізничного транспорту, м. Харків,
Україна. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net ID ORCID:
<https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>

Olha Ananieva, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of automation and computer telecontrol train
traffic, Ukrainian State University of Railway Transport,
Kharkiv, Ukraine. E-mail:
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 electromechanics, Ukrainian State
University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-
mail: mmbxiit@gmail.com ID ORCID:
<http://orcid.org/0000-0003-3553-8786>

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

Vladyslav Panchenko, PhD, Associate Professor,
Department of of electroenergy, electrical equipment and
electromechanics, Ukrainian State University of Railway
Transport, Kharkiv, Ukraine, E-mail:
vlad_panchenko@ukr.net ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>