

УДК 621.335.04:621.333

Т. М. МІЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (097) 485 68 21, ел. пошта mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ. МЕТОД ВАГОВОЇ ФУНКЦІЇ

Мета. Розробка та обґрунтування нового методу структурної ідентифікації електротехнічних пристроїв систем електричної тяги як постійного, так і змінного струмів. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використовуються: методи і методики лінійної електротехніки, зокрема, операторний метод за Лапласом; чисельний метод розв'язання інтегрального рівняння, що базується на представленні рівняння Вінера-Хопфа системою лінійних рівнянь, що дозволяє формувати розв'язання поставленої задачі в математичному вигляді кореляційної і вагової функцій; метод факторизації, що передбачає певне розбивання кореляційних функцій випадкових процесів. **Результати.** Розроблено метод вагової функції ідентифікації електротехнічних пристроїв, який у повній мірі може використовуватись у системах електричної тяги. В якості прикладу застосування розробленого методу розглянуто фідерну ділянку електричної тяги постійного струму з одностороннім живленням, по якій рухаються два електровози типу ДЕ 1, які й були ідентифіковані ваговими функціями. Шукані струми і напруги електровозів та тягової мережі сформульовано в імовірно-статистичному вигляді, тобто, визначені функції математичного сподівання та кореляційних функцій. При цьому враховано, що кореляційна функція суми випадкових функцій дорівнює сумі кореляційних функцій доданків, а кореляційна функція від інтегралу випадкової функції визначається як подвійний інтеграл від кореляційної функції вихідної випадкової функції. **Наукова новизна.** Полягає, по-перше, в адаптації розробленого методу структурної ідентифікації до пристроїв систем електричної тяги. По-друге, власне в розробці нового методу вагової функції. І, нарешті, в розв'язанні рівняння Вінера-Хопфа кореляційним методом факторизації. **Практична значимість.** Запропонований метод і методика, що на ньому базується, дозволяють прогнозувати електротягові навантаження тягової мережі, а також інших пристроїв систем тягового електропостачання та електрорухомого складу в різних режимах їх роботи і, зокрема, при швидкісному русі поїздів. Метод дозволяє враховувати вплив навантаження (і його режим роботи) сусідніх фідерних зон на електромагнітні процеси в досліджуваній міжпідстанційній зоні. При цьому важливо те, що шукані напруги і струми розглядаються як випадкові функції.

Ключові слова: ідентифікація; вагова функція; електрична тяга; кореляційна функція; електровоз; випадковий процес; напруга; струм

Вступ

За допомогою розроблених і викладених в [6, 7] методів можливе розв'язання задач, поперше, тільки параметричної ідентифікації, тобто коли структура (оператор, наприклад пасивний RLC-двополюсник) пристрою (чи системи, далі – системи), що ідентифікується, задається, і, по-друге, в перехідному режимі, наприклад за терміном часу, що дорівнює періоду (зокрема 20 мс) діючої в пристрої прикладеної напруги. Однак, більш важливою є задача структурної ідентифікації [1, 17], тобто визначення структури (оператора) ідентифікуючої системи. Застосовуються різні оператори [12], але найчастіше для лінійної чи лінеаризованої системи

використовують вагові функції, сутність яких впливає із методу інтеграла Дюамеля, відомого в теоретичній електротехніці.

Згідно із зазначеним методом реакція $y(t)$ пасивного двополюсника на дію $x(t)$, на яку вмикається цей двополюсник, визначається за формулою інтеграла Дюамеля:

$$y(t) = x(0)h(t) + \int_0^t x'_\tau(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$

де $h(t)$ – перехідна функція або перехідна характеристика двополюсника (системи).

У випадку, коли функцією-дією $x(t)$ являється дельта-функція (функція Дірака) $\delta(t)$,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тоді реакцією системи є імпульсна або вагова функція $g(t)$ і реакцією системи $y(t)$ на будь-яку дію $x(t)$ можна записати оскільки при $t \leq 0$ функція $g(t) = 0$.

$$y(t) = \int_0^t g(\tau)x(t-\tau)d\tau, \quad (2)$$

Визначною особливістю зв'язку $x(t)$ і $y(t)$ за формулою (2) є те, що якщо прикладена до системи дія $x(t)$ та її реакція $y(t)$ являються випадковими стаціонарними процесами, то для їх імовірнісних характеристик, зокрема для кореляційних функцій, існує зв'язок за рівнянням Вінера-Хопфа [10, 13]:

$$K_{yx}(t) = \int_0^T g(\tau)K_x(t-\tau)d\tau, \quad (3)$$

де $K_{yx}(t)$ – автокореляційна функція вхідного випадкового процесу $X(t)$; $K_{yx}(t)$ – взаємна кореляційна функція випадкових процесів $Y(t)$ і $X(t)$; $g(t)$ – вагова функція системи; T – деякий фіксований проміжок часу, що обмежує час дії системи.

Рівняння (3) дає оптимальну за критерієм мінімуму середнього значення квадрата помилки вагової функції $g(t)$ в класі нестационарної лінійної системи.

Тоді задача ідентифікації системи, тобто визначення її вагової функції $g(t)$, полягає у розв'язанні інтегрального рівняння (3) при відомих функціях $K_x(t)$, $K_{yx}(t)$, що можливо за допомогою методів, наведених далі.

Мета

Розробка та обґрунтування нового методу структурної ідентифікації електротехнічних пристроїв систем електричної тяги.

Методика

Під час викладення методів розв'язання рівняння (3), з метою коректності, будемо вважати, що вхідною випадковою дією є напруга $u(t)$, а вихідною – струм $i(t)$; як відомо [5, 8], в системах електричної тяги вони дійсно є випадковими функціями $U(t)$, $I(t)$. Тоді в рів-

нянні (3) будемо мати справу з кореляційними функціями $K_U(t)$, $K_{IU}(t)$.

Одним із методів розв'язання рівняння (3) є операторний метод за допомогою перетворення Лапласа; розглянемо його.

Рівняння (3) є інтегральним рівнянням Вольтера 1-го роду, в якому $g(t)$ є шуканою функцією.

Оскільки $K_U(t-\tau)$, $\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t}$, $K_{IU}(t)$ і $\frac{\partial K_{IU}(t)}{\partial t}$ є неперервними при $0 \leq t \leq a$, $0 \leq t \leq \tau$, тоді візьмемо похідну від обох частин рівняння (3) по t , отримаємо:

$$K_U(t, t)g(t) + \int_0^t \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} g(\tau)d\tau = K'_{IU}(t). \quad (4)$$

Рівняння (4) можна переписати у вигляді:

$$g(t) = \frac{K'_{IU}(t)}{K_U(t, t)} - \int_0^t \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} g(\tau)d\tau. \quad (5)$$

Вираз (5) є рівнянням Вольтера 2-го роду (типу згорки функцій $\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t}$, $g(\tau)$) оскільки його ядро, $\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t}$, залежить від різниці $(t-\tau)$ аргументів.

Скористаємося теоремою множення (теоремою Бореля, теоремою про згортку) [3], згідно з якою зображення згортки будь-яких функцій-оригіналів $f(t)$ і $\varphi(t)$ дорівнює добутку зображень цих функцій:

$$f(t) \varphi(t) = F(p) \Phi(p).$$

Тоді із (5) лапласове зображення підінтегральних функцій дорівнює

$$\int_0^t \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} g(\tau)d\tau = L \left[\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} \right] L[g(t)]. \quad (6)$$

Застосовуючи до обох частин рівняння (5) перетворення Лапласа і враховуючи (6), запишемо:

$$L[g(t)] = L \left[\frac{K'_{IU}(t)}{K_U(t, t)} \right] - L \left[\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} \right] L[g(t)].$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Звідки

$$L[g(t)] = \frac{L\left[\frac{K'_{IU}(t)}{K_U(t,t)}\right]}{1 + L\left[\frac{\partial K_U(t-\tau)}{dt}\right]}. \quad (7)$$

Функція-оригінал $g(t)$ із (7) і буде розв'язком інтегрального рівняння (3).

Другим методом визначення імпульсної вагової функції є чисельне розв'язання інтегрального рівняння (3). Сутність цього методу полягає у можливості подання рівняння Вінера-Хопфа (3) системою лінійних рівнянь [10]. Для цього враховуємо, що при $t \leq 0$ вагова функція $g(t) = 0$, а інтервал взаємної кореляції $U(t)$ і $I(t)$ розбиваємо на N рівних інтервалів часу $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, N\Delta t$. Тоді рівняння (3) може бути подано у вигляді такої кінцевої суми:

$$K_{IU}(t_j) = \Delta t \sum_{i=1}^N g(t_i) K_U(t_j - t_i), \quad (8)$$

при $j = 1, 2, 3, \dots; i = 1, 2, 3, \dots, N$.

Таким чином, за всіма значеннями $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, N\Delta t$ отримаємо значень ординат вагової функції $g(t)$ в точках $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, N\Delta t$. В матричному вигляді цю систему лінійних рівнянь можна подати як

$$\|K_{IU}\| = \|g\| \|K_U\|, \quad (9)$$

де $\|K_U\|$ – кореляційна матриця, що складена за миттєвими значеннями ординат кореляційної функції вхідної випадкової функції $U(t)$:

$$\|K_U\| = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1i} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2i} & \dots & K_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{j1} & K_{j2} & \dots & K_{ji} & \dots & K_{jN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{N1} & K_{N2} & \dots & K_{Ni} & \dots & K_{NN} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$K_{ij} = K_{ji}; K_{ij} = K_U(j-i), i, j = 1, 2, 3, \dots, N$;
 $\|K_{IU}\|$ – матриця-стовпець, що складається із елементів, які є миттєвими значеннями ординати взаємної кореляційної функції вихідної $I(t)$ та вхідної $U(t)$ випадкових функцій; ця матриця має вигляд

$$\|K_{IU}\| = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_i \\ \dots \\ K_N \end{pmatrix}, \quad K_i = \frac{K_{IU}(i \Delta t)}{\Delta t}; \quad (11)$$

в (9) $\|g\|$ – матриця-стовпець елементів, що є шуканими миттєвими значеннями вагової функції:

$$\|g\| = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_i \\ \dots \\ g_N \end{pmatrix}. \quad (12)$$

В результаті розв'язання рівняння (8) отримаємо дискретні чисельні значення $g(t_i)$ шуканої вагової функції, які апроксимуються (якщо потрібно) певним аналітичним виразом.

Недолік зазначеного методу полягає, поперше, у трудомісткості формування (складання) рівнянь і, по-друге, у їх великій кількості у випадку, якщо тягові випадкові напруга $U(t)$ і струм $I(t)$ досліджуються за тривалий термін часу, а інтервал часу Δt приймається занадто малим.

Третій метод, який можливо застосовувати для визначення вагової функції, є кореляційний метод [11, 15, 16], метод факторизації, який передбачає певне розбиття заданих кореляційних функцій. Згідно з цим методом зображення за Лапласом передатної функції досліджуваної системи можна записати як

$$G(p) = \frac{K_{IU}^+(\bar{p}) - f(p)}{K_U^+(\bar{p}) - K_U^-(\bar{p})}, \quad (13)$$

де $K_U^+(\bar{p}), K_U^-(\bar{p}), K_{IU}^+(\bar{p})$ – зображення за Лапласом таких форм кореляційних функцій

$$K_U(t) = \begin{cases} K_U^+(t) & \text{при } t \geq 0, \\ K_U^-(t) & \text{при } t < 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$K_{IU}(t) = \begin{cases} K_{IU}^+(t) & \text{при } t \geq 0, \\ K_{IU}^-(t) & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (15)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Для отримання зображення $F(p)$ в (13) уводиться, згідно з [11], функція

$$f(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) K_U^-(t - \tau) d\tau. \quad (16)$$

Можна довести [11], що шукана функція $F(p)$ є лапласовим зображенням уведеної функції $f(t)$:

$$F(p) = L[f(t)].$$

Після знаходження $G(p)$ шукана вагова функція $g(t)$ визначається як обернене лапласове зображення від $G(p)$.

Якщо вагова функція $g(t)$ досліджуваної системи знайдена і відома дія, в загальному випадку це випадкова функція $X(t)$, тоді реалізація $Y(t)$ такої системи визначається за формулою [9]:

$$Y(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) X(t, \tau) d\tau. \quad (17)$$

Результати

Розроблено метод вагової функції ідентифікації електротехнічних пристроїв, який у повній мірі може використовуватись в системах електричної тяги [19]. Метод базується на розв'язанні інтегрального рівняння Вінера-Хопфа для авто- і взаємно кореляційних функцій випадкових процесів вхідної і вихідної величин пристрою. Для розв'язання зазначеного рівняння застосовано операторний метод за Лапласом та кореляційні методи, зокрема метод факторизації. Як приклад використання розробленого методу вагової функції розглянуто фідерну ділянку електричної тяги постійного струму з одностороннім живленням, на якій рухаються два електровоза типу ДЕ 1, які і були ідентифіковані ваговими функціями. Шукані струми і напруги електровозів в тяговій мережі сформульовано в імовірно-статистичному вигляді, тобто визначені їх математичні сподівання та дисперсії.

Схема ділянки наведена на рис. 1, на якому ТП – тягова підстанція; R_1, R_2 – активні опори ділянок контактної мережі (розглядається усталений режим, тому індуктивність контактної

мережі не враховується); $g(t)$ – вагові функції, які ідентифікують (заміщують) електровози і вважаються відомими; U – напруга на виході ТП (відома); I_1, I_2 – фідерні струми; $U_{e1}, U_{e2}, I_{e1}, I_{e2}$ – напруги і струми електровозів.

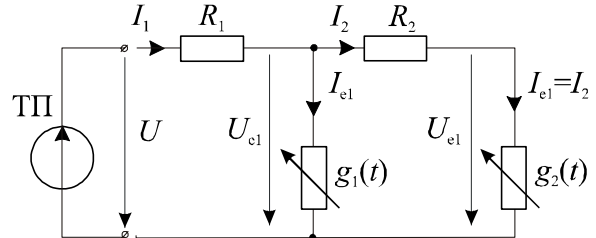


Рис. 1

Fig. 1

Не зважаючи на те, що ділянка постійного струму, однак всі напруги і струми в ній є випадковими процесами [2, 5, 8, 18], тобто змінними в часі. Виходячи з цього, система рівнянь електричного стану розглядуваної системи (рис. 1) має вигляд

$$U(t) = R_1 I_1(t) + U_{e1}(t); \quad (18)$$

$$U(t) = R_1 I_1(t) + R_2 I_2(t) + U_{e2}(t) =$$

$$= R_1 I_1(t) + R_2 \int_0^{\infty} U_{e2}(t) g_1(t) dt + U_{e2}(t); \quad (19)$$

$$I_1(t) - I_{e1}(t) - I_2(t) = I_1(t) - \int_0^{\infty} U_{e1}(t) g_1(t) dt -$$

$$- \int_0^{\infty} U_{e2}(t) g_2(t) dt = 0. \quad (20)$$

Застосовуючи операцію математичного сподівання до випадкових функцій системи рівняння (18)–(20), отримуємо систему рівнянь для математичних сподівань:

$$m_U(t) = R_1 m_{I1}(t) + m_{U_{e1}}(t); \quad (21)$$

$$m_U(t) = R_1 m_{I1}(t) +$$

$$+ R_2 \int_0^{\infty} m_{U_{e2}}(t) g_1(t) dt + m_{U_{e2}}(t); \quad (22)$$

$$m_{I1}(t) - \int_0^{\infty} m_{U_{e1}}(t) g_1(t) dt -$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$-\int_0^{\infty} m_{U_{e2}}(t)g_2(t)dt = 0. \quad (23)$$

Враховуючи, що $U(t)$, $U_{e1}(t)$, $U_{e2}(t)$ – стаціонарні випадкові функції [5], тоді $m_U(t) = \text{const}$, $m_{U_{e1}}(t) = \text{const}$, $m_{U_{e2}}(t) = \text{const}$ і система (21)–(23) спрощується

$$m_U = R_1 m_{I_1}(t) + m_{U_{e1}}, \quad (24)$$

$$m_U = R_1 m_{I_1}(t) + R_2 m_{U_{e2}}(t) \int_0^{\infty} g_1(t)dt + m_{U_{e2}} = 0, \quad (25)$$

$$m_{I_1}(t) - m_{U_{e1}}(t) \int_0^{\infty} g_1(t)dt - m_{U_{e2}}(t) \int_0^{\infty} g_2(t)dt = 0. \quad (26)$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, отримаємо математичні сподівання функцій $I_1(t)$, $I_2(t)$, $U_{e1}(t)$, $U_{e2}(t)$.

У подальшому отримаємо систему рівнянь для визначення функцій дисперсій $D(t)$ випадкових функцій в системі (21)–(23). Для цього врахуємо, що дисперсія стаціонарної випадкової функції дорівнює кореляційній функції $K(\tau)$ цієї випадкової функції при $\tau = 0$. У свою чергу, кореляційна функція суми випадкових функцій дорівнює сумі кореляційних функцій доданків, а кореляційна функція (а, отже, і дисперсія) від інтегралу випадкової функції $Y(t)$ визначається як подвійний інтеграл від кореляційної функції вихідної випадкової функції $X(t)$ [4].

$$K_y(\tau = 0) = D_y = \sigma_y^2 = \int_0^{\infty} g(\tau_1) \left[\int_0^{\infty} g(\tau_2) K_x(\tau_1 - \tau_2) d\tau_2 \right] d\tau_1. \quad (27)$$

Обчислення $D(t)$ за цією формулою є складним та трудомістким процесом, тому що потребує обчислення двократних інтегралів. Тим більше, що в нашій задачі перехідні складові функцій U_{e1} , U_{e2} під інтегралом (27) невідомі, тобто задача перетворюється додатково в розв'язок інтег-

рального рівняння, що на порядок ускладнює задачу, тому поступимо таким чином.

Шляхом дискретизації з кроком Δt перетворимо випадкові функції $U_{e1}(t)$, $U_{e2}(t)$ в систему випадкових величин, в результаті отримаємо загальну повну (а не в перетинах) вибірку значень цих напруг. Багатьма дослідниками, зокрема в [5, 8], встановлено, що імовірнісний розподіл значень повної вибірки напруг на струмоприймачі різних видів ЕРС постійного струму (електровози, трамваї) з великою імовірністю підпорядковуються закону Гауса, який дозволяє подати випадкові величини U_{e1} , U_{e2} у відомій формі [14]:

$$\begin{cases} U_{e1} = m_{U_{e1}} \pm 3\sigma_{U_{e1}} = m_{U_{e1}} \pm 3\sqrt{D_{U_{e1}}} \\ U_{e2} = m_{U_{e2}} \pm 3\sqrt{D_{U_{e2}}}. \end{cases} \quad (28)$$

З врахуванням згаданих властивостей кореляційної та дисперсної функцій випадкових функцій, а також (28), система рівнянь (18)–(20) для дисперсій буде мати вигляд:

$$D[U] = R_1^2 D[I_1] \pm 3\sqrt{D[U_{e1}]}; \quad (29)$$

$$D[U] = R_1^2 D[I_1] \pm R_2 D[U_{e2}] \int_0^{\infty} g_2(t)dt; \quad (30)$$

$$D[I_1] \mp D[U_{e1}] \int_0^{\infty} g_1(t)dt \mp D[U_{e2}] \int_0^{\infty} g_2(t)dt = 0. \quad (31)$$

Розв'язуючи систему (24)–(26), знаходимо математичні сподівання, а розв'язуючи систему (29)–(31) – дисперсії шуканих $I_1(t)$, $I_2(t)$, $U_{e1}(t)$, $U_{e2}(t)$, що дозволяє подати їх в кінцевій імовірнісній формі (28).

Наукова новизна та практична значимість

Полягає, по-перше, в адаптації розробленого методу структурної ідентифікації до пристроїв систем електричної тяги. По-друге, власне в розробці нового методу вагової функції. І, нарешті, в розв'язанні рівняння Вінера-Хопфа кореляційним методом факторизації. Запропонований метод і методика, що на ньому базується, дозволяють прогнозувати електротягові навантаження тягової мережі, а також інших пристроїв системи тягового електропостачання та електрорухо-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

мого складу в різних режимах їх роботи, зокрема при швидкісному русі поїздів.

Висновки

1. Розроблений метод вагової функції є ефективним методом структурної ідентифікації пристроїв систем електричної тяги, в якій напруги і струми є випадковими процесами.

2. Найбільш раціональним методом розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Вінера-Хопфа при визначенні вагової функції є чисельний метод.

3. Єдиним недоліком розробленого методу є його застосування лише для стаціонарних випадкових процесів на вході і виході пристрою, що підлягає ідентифікації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Буштрук, А. Д. Структурная идентификация нелинейных динамических объектов / А. Д. Буштрук // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 10. – С. 84–89.
- Костин, Н. А. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Электротехника і електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 97–101.
- Краснов, М. Л. Интегральные уравнения / М. Л. Краснов, А. И. Кисенёв, Г. И. Макаренко. – М. : Наука, 1968. – 192 с.
- Лившиц, Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачёв. – М. : Сов. радио, 1963. – 483 с.
- Мищенко, Т. Н. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприёмнике первого украинского электровоза ДЭ 1 / Т. Н. Мищенко, П. Е. Михаличенко, Н. А. Костин // Электротехника і електро-механіка. – 2003. – № 2. – С. 43–46.
- Мищенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; паралельне з'єднання елементів / Т. М. Міщенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 86–91.
- Мищенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод циклічної вольтамперної характеристики / Т. М. Міщенко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 119–125.
- Петров, А. В. Методи спектрального аналізу випадкових технологічних коливань напруги та струму фідера тягової підстанції постійного струму / А. В. Петров // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 77–80.
- Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М. : Наука, 1968. – с. 463.
- Солодовников, В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. / В. В. Солодовников. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. – 655 с.
- Эйкхофф, П. Современные методы идентификации систем / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1983. – 400 с.
- Aström, K. J. System Identification-A Survey / K. J. Aström, P. Eykhoff. – Automatika. – 1971. – № 7. – P. 123–162. doi: 10.1016/0005-1098(71)90059-8.
- Barraud, A. De Minimal Realization and Approximation of Linear Systems from Normal Operating Records / A. Barraud, Ph. Larminat // Proc. of the 3rd IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. – Hague/Delft, 1973. – P. 953–956.
- Bingulac, S. P. Identification of multivariable dynamic systems / S. P. Bingulac // Proc. of the 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. – Tbilisi, Georgia, North-Holland, Hague, 1976. – P. 521–530.
- Guenod, M. Comparison of Some Methods Used for Process Identification / M. Guenod, A. P. Sage. – Automatika. – 1968. – № 4. – P. 235–269. doi: 10.1016/0005-1098(68)90016-2.
- Kostin, M. Statistics and Probability of the Pantograph of DC Electric Locomotive the Recuperation Mode / Mykolay Kostin, Anatoliy Nikitenko. – Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. – Vol. 2012, № 2a. – P. 273–275.
- Simulation of electric vehicles combining structural and functional approaches / L. I. Silva, G. A. Magallán, P. M. De la Barrera et al. // J. of Electrical Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 848–858.
- Szelag, A. A. 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand—problems of analysis and synthesis / A. A. Szelag, T. Maciołek. – 2013. – Vol. 89. – Iss. 3. A. – P. 21–28.
- Xuesong, F. Evaluating target speeds of passenger trains in China for energy saving in the effect of different formation scales and traction capacities / Xuesong Feng, Jia Feng, Keqi Wua. – Intern. J. of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – Vol. 42. – Iss. 1. – P. 621–626. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.04.055.

Т. Н. МИЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (097) 485 68 21, ел. пошта mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ. МЕТОД ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ

Цель. Разработка и обоснование нового метода структурной идентификации электротехнических устройств систем электрической тяги как постоянного, так и переменного токов. **Методика.** Для решения поставленной задачи используются: методы и методики линейной электротехники, в частности, операторный метод по Лапласу; численный метод решения интегрального уравнения, который базируется на представлении уравнения Винера-Хопфа системой линейных уравнений, что позволяет формировать решения поставленной задачи в математическом виде корреляционной и весовой функций; метод факторизации, который предусматривает определенное разбиение корреляционных функций случайных процессов. **Результаты.** Разработан метод весовой функции идентификации электротехнических устройств, который в полной мере может использоваться в системах электрической тяги. В качестве примера применения разработанного метода рассмотрен фидерный участок электрической тяги постоянного тока с односторонним питанием, по которому движется два электровоза типа ДЭ 1, которые и были идентифицированы весовыми функциями. Искомые токи и напряжения электровозов и тяговой сети сформулированы в вероятностно-статистическом виде, то есть, определены функции математического ожидания и корреляционных функций. При этом учтено, что корреляционная функция суммы случайных функций равна сумме корреляционных функций слагаемых, а корреляционная функция от интеграла случайной функции определяется как двойной интеграл от корреляционной функции выходной случайной функции. **Научная новизна.** Заключается, во-первых, в адаптации разработанного метода структурной идентификации к устройствам систем электрической тяги. Во-вторых, собственно в разработке нового метода весовой функции. И, наконец, в решении уравнения Винера-Хопфа корреляционным методом факторизации. **Практическая значимость.** Разработанный метод и методика, которая на нем базируется, позволяют прогнозировать электротяговые нагрузки тяговой сети, а также других устройств систем тягового электроснабжения и электроподвижного состава в разных режимах их работы и, в частности, при скоростном движении поездов. Метод позволяет учитывать влияние нагрузки (и её режим работы) соседних фидерных зон на электромагнитные процессы в исследуемой межподстанционной зоне. При этом важно то, что искомые напряжения и токи рассматриваются как случайные функции.

Ключевые слова: идентификация; весовая функция; электрическая тяга; корреляционная функция; электровоз; случайный процесс; напряжение; ток

T. N. MISHCHENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Electric Power Supply of Railroads», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 485 68 21, e-mail mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

THEORETICAL ASPECTS AND METHODS OF PARAMETERS IDENTIFICATION OF ELECTRIC TRACTION SYSTEM DEVICES. METHOD OF WEIGHT FUNCTION

Purpose. Development and substantiation of a new method of structural identification of electrical devices of electric traction systems for both DC and AC current. **Methodology.** To solve this problem the following methods are used: the methods and techniques of the linear electrical engineering, in particular, the Laplace operator method; the numerical method for solving the integral equation, which is based on the representation of the Wiener-Hopf linear equations system (this allows forming the solutions of the problem in a mathematical form of the correlation and weight functions); the factorization method, which provides certain partition of the correlation functions of the stochastic processes. **Findings.** It was developed the method of weight function of the electrical devices identifica-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

tion, which can be fully used in the systems of electric traction. As the use example of the developed method it was considered a feeder section of DC electric traction with the single power supply. On this section move two electric locomotives of the type DE 1, they have been identified by the weighting functions. The required currents and voltages of electric locomotives are also formulated in the electric traction network in probabilistic and statistical form, that is, the functions of mathematical expectation and the correlation functions are determined. At this, it is taken into account that the correlation function of the sum of random functions is equal to the sum of the correlation functions of additives, and the correlation function of the integral of a random function is defined as the double integral of the correlation function of the output of a random function. **Originality.** Firstly, originality consists of the adaptation of the developed method of structural identification for the devices of electric traction system. Secondly, it lies in the proper development of the new method of weight function. And finally, it lies in the solution of the Wiener-Hopf equation using the correlation method of factorization. **Practical value.** The developed method and the technique that is based on it, allow predicting electric traction loadings of the traction network, as well as the other devices of the traction energy systems and the electric motive power in the different modes of operation and, in particular, during the high-speed train traffic. The method takes into account the load influence (and its mode of operation) of the adjacent feeder zones on the electromagnetic processes in the studied inter-substation area. Thus, it is important that the required voltages and currents are considered as the random functions.

Keywords: identification; weight function; electric traction; correlation function; electric locomotive; random process; voltage; current

REFERENCES

1. Bushtruk A.D. Strukturnaya identifikatsiya nelineynykh dinamicheskikh obyektov [Structural identification of non-linear dynamic object]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Telemechanics*, 1989, no. 10, pp. 84-89.
2. Kostin N.A., Sablin O.I. Koeffitsient moshchnosti elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka [The power factor of DC electric rolling stock]. *Elektrotehnika i elektrodinamika – Electric Engineering and Electrodynamics*, 2005, no. 1, pp. 97-101.
3. Krasnov M.L., Kisenev A.I., Makarenko G.I. *Integralnyye uravneniya* [Integral equations]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 192 p.
4. Livshits N.A., Pugachev V.N. *Veroyatnostnyy analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Probabilistic analysis of automatic control systems]. Moscow, Sov. radio Publ., 1963. 483 p.
5. Mishchenko T.N., Mikhailichenko P.Ye., Kostin N.A. Veroyatnostnyye kharakteristiki sluchaynoy funktsii napryazheniya na tokopriyemnike pervogo ukrainskogo elektrovoza DE 1 [Probabilistic characteristics of random function of voltage on the collectors of the first Ukrainian electric locomotive DE 1]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electric Engineering and Electromechanics*, 2003, no. 2, pp. 43-46.
6. Mishchenko T.M. Teoretychni aspekty ta metody identyfikatsii parametriv prystroiviv systemy elektrychnoi tiahuy. Metod myttievnykh potuzhnosti; paralelne ziednannia elementiv [Theoretical aspects and methods of parameters identification of devices of the electric traction system. Method of instantaneous powers; parallel connection of elements]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 86-91.
7. Mishchenko T.M. Teoretychni aspekty ta metody identyfikatsii parametriv prystroiviv systemy elektrychnoi tiahuy. Metod tsyklichnoi volt-ampernoï kharakterystyky [Theoretical aspects and methods of parameters identification of the electric traction systems devices. Method of cyclic current-voltage characteristics]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (43), pp. 119-125.
8. Petrov A.V. Metody spektralnoho analizu vypadkovykh tekhnolohichnykh kolyvan napruhy ta strumu fidera tiahovoi pidstantsii postiinoho strumu [Methods of spectral analysis of random technological oscillation of voltage and current of the DC traction substation feeder]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 77-80.
9. Sveshnikov A.A. *Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy* [Applied methods of the random functions theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 463 p.
10. Solodovnikov V.V. *Statisticheskaya dinamika lineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Statistical dynamics of the linear systems of automation control]. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-mat. lit-ry Publ., 1960. 655 p.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

11. Eykgoff P., Banegek A., Savaragi Ye. *Sovremennyye metody identifikatsii sistem* [Contemporary methods of systems identification]. Moscow, Mir Publ., 1983. 400 p.
12. Aström K.J., Eykhoff P. System Identification-A Survey. *Automatika*, 1971, no. 7, pp. 123-162. doi: 10.1016/0005-1098(71)90059-8.
13. Barraud A., Larminat Ph. De Minimal Realization and Approximation of Linear Systems from Normal Operating Records. Proc. of the 3rd IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Hague/Delft, 1973, pp. 953-956.
14. Bingular S.P. Identification of multivariable dynamic systems. Proc. of the 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Tbilisi, Georgia, North-Holland, Hague, 1976, pp. 521-530.
15. Guenod M., Sage A.P. Comparison of Some Methods Used for Process Identification. *Automatika*, 1968, no. 4, pp. 235-269. doi: 10.1016/0005-1098(68)90016-2.
16. Kostin M., Nikitenko A. Statistics and Probability of the Pantograph of DC Electric Locomotive the Recuperation Mode. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, vol. 2012, no. 2a, pp. 273-275.
17. Silva L.I., Magallán G.A., De la Barrera P.M., De Angelo C.H., García G.O. Simulation of electric vehicles combining structural and functional approaches. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, May 2014, vol. 9, issue 3, pp. 848-858.
18. Szelag A.A., Maciołek T. 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand—problems of analysis and synthesis, 2013, vol. 89, issue 3. A, pp. 21-28.
19. Xuesong Feng, Jia Feng, Keqi Wua, Haidong Liu, Qipeng Sun. Evaluating target speeds of passenger trains in China for energy saving in the effect of different formation scales and traction capacities. *Intern. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, vol. 42, issue 1, pp. 621-626. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.04.055.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. О. Костіним (Україна); д.т.н., проф. С. І. Випанасенком (Україна)

Надійшла до редколегії: 30.06.2014

Прийнята до друку: 15.09.2014