

СИНТЕЗ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ СПРОЩЕНОЇ СТРУКТУРИ ТА НЕЛІНІЙНИМ ФРИКЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

В.Б. Клепиков*, докт. техн. наук, **О.С. Беляєв****, **І.В. Обруч*****, канд. техн. наук
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.
E-mail: klepikovvladimir390@gmail.com; olehbieliaiev@gmail.com; ihor.obruch@khpi.edu.ua.

Запропоновано методику синтезу регулятора для електромеханічної системи, що забезпечує необхідні показники регулювання. У разі лінеаризації окремих ділянок нелінійного навантаження від регулятора подібний до нейронної мережі, тому він був названий квазінейрорегулятором (НРК). Регулятор, на відміну від нейронної мережі типу PERCEPTRON, не містить середніх шарів, а вагові коефіцієнти від входів до вихідного нейрона визначаються не шляхом багаторазових ($10^5 - 10^6$) ітераційних розрахунків, а за виведеними аналітичними співвідношеннями. Ці співвідношення є універсальними та застосовними для будь-якої з лінеаризованих ділянок. Використання узагальнених безрозмірних параметрів робить їх справедливими для широкого класу електроприводів машин та механізмів. Використано модифіковану сукупність узагальнених безрозмірних параметрів. Перевагою запропонованого регулятора є усунення потреби у вимірюванні координат, які важко визначити експериментально, наприклад, пружного моменту, а також побудови спостерігачів стану. Достатньо використання лише однієї вихідної величини. Сутність квазінейрорегулювання полягає у створенні передатної функції зворотного зв'язку у вигляді полінома-доповнення, який забезпечує характеристичний поліном замкненої системи з необхідними значеннями коренів. Задля розрахунку похідних квазінейрорегулятором запропоновано використання методу кінцевих різниць. Пояснення методу квазінейрорегулювання виконано на прикладі усунення квазінейрорегулятором фрикційних автоколивань у двомасовій електромеханічній системі з квазінейрорегулятором та нелінійним фрикційним навантаженням. Бібл. 23, рис. 11.

Ключові слова: двомасова електромеханічна система, електропривод, системи управління, передатна функція, характеристичний поліном, метод кінцевих різниць, характеристика тертя, фрикційні автоколивання, нейронна мережа, квазінейрорегулятор.

Вступ. Електромеханічним системам належить важлива роль у народному господарстві країни. Електричний привод є одним з основних споживачів електроенергії, який керує рухом багатьох машин і механізмів [1]. Від його показників управління залежать показники технологічних процесів: продуктивність, точність і чистота обробки матеріалів, надійність, втрати електроенергії та витратних матеріалів тощо. До відомих методів управління електромеханічними системами зокрема належать: частотні, кореневі, поліноміальні, метод модального управління, підпорядковане регулювання координат. Кожен із методів має певні переваги та недоліки, описані в літературі [2, 3]. Більшість їх створювалися для лінійних одномасових систем за постійного моменту опору навантаження. Типові настройки контурів, що рекомендуються, не завжди забезпечують стійкість і необхідні показники регулювання в системах з нелінійним фрикційним навантаженням і наявністю пружного кінематичного зв'язку. Метод модального управління передбачає визначення важко-вимірюваних координат як, наприклад, пружного моменту, а введення спостерігачів стану збільшує порядок системи та ускладнює синтез.

© Клепиков В.Б., Беляєв О.С., Обруч І.В., 2025
ORCID: *<https://orcid.org/0009-0003-9186-0769>; **<https://orcid.org/0009-0000-4839-3948>;
***<https://orcid.org/0000-0001-8239-1428>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

З 90-х років минулого століття набули розвитку інтелектуальні методи управління, що функціонують за аналогією з мозком людини: методи нечітких множин (методи «fuzzy logic») та метод нейронних мереж [4–6]. Задля визначення параметрів нейронної мережі під час оптимізації параметрів електроприводу став використовуватися метод генетичних алгоритмів [4]. Такі налаштування регуляторів не завжди забезпечують необхідні параметри регулювання в системах з нелінійним фрикційним навантаженням, коли електромеханічна система поводить себе як система з від’ємним в’язким тертям [7].

Існує широкий клас машин і механізмів, в яких у нормальних або аномальних режимах навантаженням електроприводу є «пара тертя» з нелінійною характеристикою, а під час динамічних процесів необхідно враховувати наявність в електромеханічній системі пружного кінематичного зв'язку. У літературі наведено досить широке різноманіття залежності коефіцієнта тертя від швидкості прослизання поверхонь пари тертя [8–10]. Для нелінійних залежностей загальним є наявність так званої «падаючої» ділянки, на якій збільшення швидкості прослизання супроводжується зниженням коефіцієнта тертя.

Це має місце в електроприводах прокатних станів під час пробуксовки валків, рейкових електротранспортних засобах у разі буксування та юзі коліс, металорізальних верстатів та багатьох інших машин та механізмів [7, 9, 11]. Відомо, що в цьому випадку можуть виникати так звані фрикційні автоколивання (АКФ), що погіршують показники технологічного процесу: зниження продуктивності, точності та якості обробки, точності позиціонування та ін., а іноді призводять до поломок кінематичних ланок. Відомий випадок, коли через АКФ на шахтах Донбасу вийшло з ладу близько 150 рудничних електровозів через поломки осей колісних пар [12]. Послідовне підвищення діаметра осей від 90 мм до 100 мм, 110 мм, 120 мм і 135 мм (причому в останньому випадку з легованої сталі) не призвело до усунення поломок. Причиною виявилися фрикційні автоколивання під час буксування коліс в умовах механічного резонансу, що виникало після зміни конструкції під час модернізації механічної частини електровоза внаслідок переміщення зубчастого колеса до центру осі.

Нелінійна характеристика тертя має ділянки, які можуть бути з прийнятною для практичних цілей точністю апроксимовані лінійною залежністю (рис. 1)

$$M_F = M_{C0} + \omega_{sk} \beta_s. \quad (1)$$

Слід зазначити, що на ділянці II жорсткість механічної характеристики навантаження β_s може бути від’ємною, що і створює динамічну нестійкість розімкнутої системи. Лінеаризація характеристики тертя забезпечує універсальність отриманих аналітичних співвідношень щодо вагових коефіцієнтів для будь-якої з її ділянок.

На рис. 1: I - ділянка пружного ковзання; II - падаюча ділянка; III - $M_C \approx \text{const}$; IV - повільно висхідна ділянка.

У разі переміщення робочої точки по падаючій ділянці електромеханічна система може ставати динамічно нестійкою з розбіжним характером коливального процесу. Вихід робочої точки на інші ділянки призводить до усталених фрикційних автоколивальних.

Електропривод є гнучким засобом управління механічним рухом і дає змогу засобами автоматичного регулювання (наприклад, за допомогою використання нейрорегулятора на основі нейронної мережі типу PERCEPTRON) усувати фрикційні автоколивання та зменшувати прослизання у парі тертя. Синтез такого нейрорегулятора передбачає визначення числа шарів, нейронів у середніх шарах, вагових коефіцієнтів від вхідного шару до середніх і від середніх до вихідного нейрона. Це потребує значної кількості (до $10^5 - 10^6$) ітераційних обчислень і навіть за високої швидкодії комп'ютера займає значний час [4, 13]. Також за аномального прослизання робоча точка переміщається по різних ділянках характеристики тертя. При цьому структура нейрорегулятора стає громіздкою.

На кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» запропоновано та запатентовано новий тип регулятора [15], що дає можливість усунути АКФ та забезпечити необхідні показники регулювання. Структура даного регулятора за нелінійного фрикційного навантаження з лінеаризованими на окремих ділянках, але нелінійному «у великому», подібна до спрощеної нейронної мережі (рис. 2), що визначило дану йому авторами назву – **квазінейрорегулятор** (НРК).

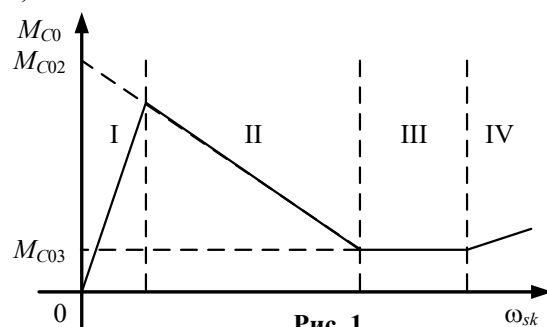


Рис. 1

У цій схемі: n – кількість вихідних нейронів, що дорівнює кількості лінеаризованих ділянок характеристики навантаження; m – число входних сигналів, що залежить від порядку характеристичного полінома системи; LB – логічний блок, що включає вихідний нейрон, що відповідає лінеаризованій ділянці навантаження, на якій у даний момент перебуває робоча точка системи; BCS – блок сигналу керування та сигналів зворотного зв'язку регульованої координати з часовими затримками; $U_1 \dots U_m$ – входні сигнали НРК, що є поточним значенням вихідної координати та її значень із затримками; $W_{m1} \dots W_{mn}$ – розраховані аналітично вагові коефіцієнти.

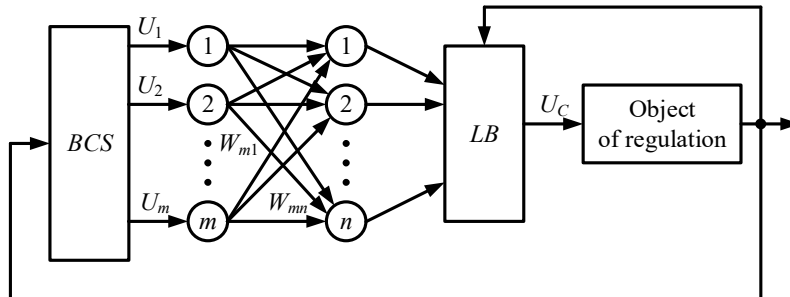


Рис. 2

Квазінейрорегулятор використовує задля врахування динамічних властивостей системи зворотний зв'язок фазової координати із затримкою, а також має один вихідний нейрон. На відміну від нейронної мережі у ньому відсутні проміжні шари, а вагові коефіцієнти від входних сигналів до вихідного розраховуються за виведеними аналітичними співвідношеннями, справедливими для кожної з характерних лінеаризованих ділянок нелінійного тертя. Використання узагальнених безрозмірних параметрів робить ці співвідношення універсальними під час переходу до фізичних величин.

Відмінністю даної статті від попередніх публікацій [16] є новий підхід до теоретичного обґрунтування методики синтезу НРК, який не потребує використання під час виведення аналітичних виразів вагових коефіцієнтів передач зворотних зв'язків по всіх фазових координатах ЕМС. Задля універсалізації аналітичних виразів використовується не поєднання класичних безрозмірних узагальнених параметрів [17], а модифіковане з новим значенням часового параметра для безрозмірного оператора диференціювання [18].

Мета роботи: теоретично обґрунтувати та створити на основі модифікованих безрозмірних узагальнених параметрів методику синтезу квазінейрорегулятора для двомасової електромеханічної системи з пружним кінематичним зв'язком і нелінійним фрикційним навантаженням, що забезпечує задані показники регулювання та усунення фрикційних автоколивань під час прослизання.

Постановка задачі: за спрощеною структурою нейронної мережі (без середніх шарів), вимірюючи лише одну вихідну координату, знайти вирази для вагових коефіцієнтів і побудувати регулятор, що забезпечує задані показники регулювання. Забезпечити універсальність виведених співвідношень для кожної з лінеаризованих ділянок фрикційного навантаження шляхом використання модифікованих безрозмірних узагальнених параметрів.

1. Теоретичні основи квазінейрорегулювання. Структурну схему замкнутого контуру з від'ємним зворотнім зв'язком наведено на рис. 3, де $W_R(p)$ – передатна функція об'єкта регулювання; $W_C(p)$ – передатна функція ланки зворотного зв'язку.

Динамічні властивості САР визначаються розташуванням коренів характеристичного полінома (ХП) замкнутої системи. Встановимо, яким буде ХП замкнутої системи $D_Z(p)$.

Передатна функція замкнутої системи дорівнює

$$W_Z(p) = \frac{W_R(p)}{1 + W_C(p) \cdot W_R(p)}. \quad (2)$$

Передатна функція об'єкта регулювання у загальному випадку має вигляд

$$W_R(p) = \frac{A_R(p)}{D_R(p)}, \quad (3)$$

де $D_R(p)$ – ХП розімкненої системи.

Підставивши (3) у (2), отримуємо

$$W_Z(p) = \frac{A_R(p)}{D_R(p) + W_C(p) \cdot A_R(p)}. \quad (4)$$

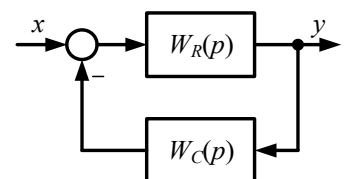


Рис. 3

Тобто, ХП замкненої системи дорівнює сумі ХП розімкненої системи із доданком $D_D(p) = W_C(p) \cdot A_R(p)$

$$D_Z(p) = D_R(p) + D_D(p). \quad (5)$$

Методику синтезу квазінейрорегулятора проілюстровано на прикладі відомої двомасової електромеханічної системи з фрикційним навантаженням, лінеаризованої по характерних ділянках нелінійності «пара тертя». У фізичних параметрах схему показано на рис. 4.

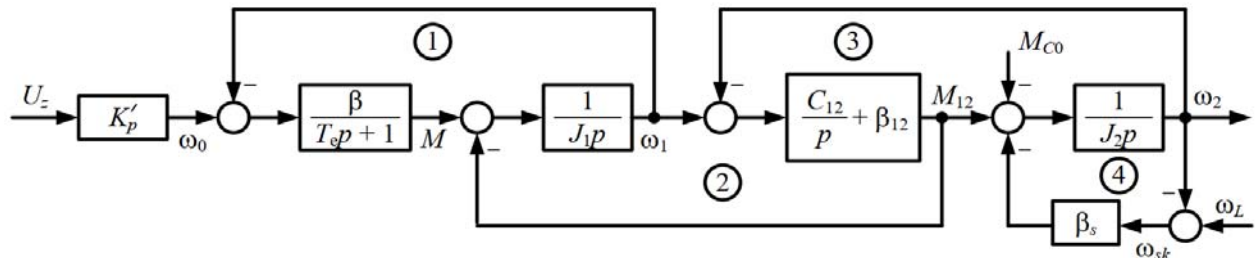


Рис. 4

У цій схемі: U_z – сигнал управління на напівпровідниковий перетворювач; K'_p – коефіцієнт передачі в перетворювачі, що живить електричний двигун; ω_0 – кутова швидкість холостого ходу електродвигуна; β – модуль жорсткості механічної характеристики ланки електромеханічного перетворювання; T_e – електромагнітна постійна часу силового кола електродвигуна; M – момент двигуна; J_1 – момент інерції ротора двигуна та жорсткопов'язаних з ним мас; ω_1 – кутова швидкість валу електродвигуна; інші змінні та параметри приведені до швидкості валу електродвигуна: C_{12} – механічна жорсткість пружного звена; β_{12} – коефіцієнт в'язкого тертя пружного звена; M_{12} – пружний момент; J_2 – момент інерції другої маси; ω_2 – кутова швидкість другої маси; β_s – жорсткість лінеаризованої ділянки механічної характеристики фрикційного навантаження; ω_L – швидкість руху до початку проковзування; ω_{sk} – швидкість проковзування.

Для універсалізації аналітичних виразів перейдемо до схеми в модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах, що запропоновані у [18], прийнявши такі припущення.

1. Вплив внутрішнього в'язкого тертя кінематичного пружного зв'язку не враховується (у реальній системі це забезпечить додатковий запас стійкості внаслідок демпфуючого характеру даної величини).

2. Складову ω_L вважаємо постійною, що не впливає на динамічні властивості системи.

3. Напівпровідниковий перетворювач вважаємо безінерційним з коефіцієнтом передачі K'_p та вхідним сигналом, що задає швидкість холостого ходу електродвигуна ω_0 .

4. Динамічні властивості ланки електромеханічного перетворення енергії відображаються аперіодичною ланкою першого порядку.

Побудуємо схему досліджуваної системи, використавши модифіковані узагальнені безрозмірні параметри:

- $m = T_M / T_e$ – відношення електромеханічної до електромагнітної постійних часу, де $T_M = J_1 / \beta$;
- $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$ – коефіцієнт співвідношення мас;
- $\nu = \Omega_{12}^2 / \Omega_{EM}^2$ – відношення квадратів частот недемпфованого механічного та електромеханічного резонансів;
- $b = \beta_s / \beta$ – відношення жорсткості лінеаризованої ділянки механічної характеристики навантаження до модуля жорсткості механічної характеристики електроприводу;
- $p_* = p \cdot T_e$ – оператор диференціювання у безрозмірній формі.

За базові величини для координат системи виберемо загальновідомі: для кутових швидкостей – швидкість холостого ходу електродвигуна ω_0 ; для моментів – момент короткого замикання M_{KZ} .

Прийнято, що всі параметри системи приведені до швидкості валу електродвигуна. Використане безрозмірне узагальнене представлення параметрів системи дає змогу суттєво

скоротити кількість фізичних параметрів, які враховуються у процесі синтезу, і надає отриманим результатам універсальний характер стосовно досить широкого класу електроприводів.

Схема, що розглядається, має вигляд (рис. 5).

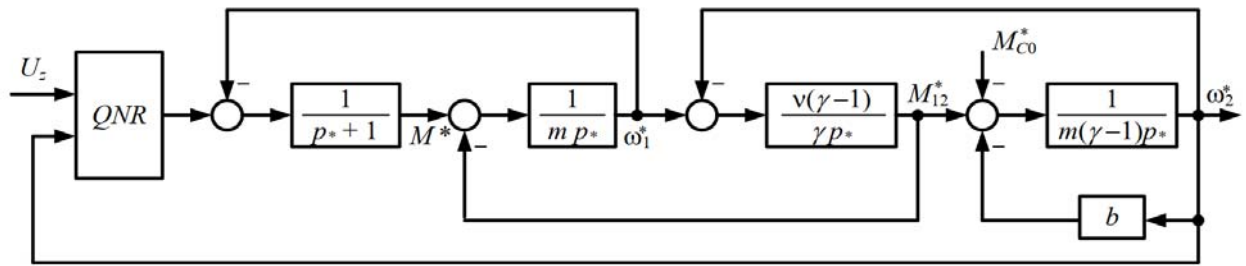


Рис. 5

Характеристичний поліном розімкнутої системи знайдемо, використовуючи топологічні методи [19, 20]. За формулою Мезона

$$W(p_*) = \frac{\sum_{i=1}^q P_i \Delta_{*i}}{\Delta_*}, \quad (6)$$

де P_i – i -й шлях від вхідного сигналу до заданої координати; q – кількість шляхів (у нашому випадку $q = 1$, тому $\Delta_{*i} = 1$); Δ_* – визначник системи, обчислюється за формулою

$$\Delta_* = \prod_{k=1}^m (1 - L_{*k}^{**}), \quad (7)$$

де L_{*k} – передача k -го контуру, яка представляє множення передавальних функцій ланок, що входять до нього, а позначення ** вказує, що у виразі (7) контури, що мають загальні вузли, приймаються рівними нулю; m – число контурів розімкнутої системи (для нашої схеми $m = 4$).

Обчислений за співвідношеннями (6) – (7) характеристичний поліном розімкнутої системи у нормованій формі має вигляд

$$D_R(p_*) = p_*^4 + a_3 p_*^3 + a_2 p_*^2 + a_1 p_* + a_0, \quad (8)$$

де a_3, a_2, a_1, a_0 – залежать від значень узагальнених безрозмірних параметрів.

Підключення квазінейрорегулятора має змінити кожен з коефіцієнтів на величину Δa_i , внаслідок чого характеристичний поліном замкнутої системи у загальному випадку набуде вигляду

$$D_Z(p_*) = p_*^n + (a_{n-1} + \Delta a_{n-1}) p_*^{n-1} + \dots + (a_i + \Delta a_i) p_*^i + \dots + (a_1 + \Delta a_1) p_* + a_0 + \Delta a_0, \quad (9)$$

де значення Δa_i мають бути такими, щоб корені $D_Z(p_*)$ забезпечували необхідні показники регулювання. Такі корені має, так званий, бажаний поліном $D_B(p_*)$, який може бути або обраний серед стандартних поліномів [21] і має вигляд

$$D_B(p_*) = p_*^n + a'_{n-1} p_*^{n-1} + \dots + a'_i p_*^i + \dots + a'_1 p_* + a'_0, \quad (10)$$

або визначений, виходячи з бажаного розподілу коренів $p_{*1}, p_{*2}, p_{*3}, p_{*4}$ за викладеною в [1] методикою і співвідношенням

$$D_B(p_*) = (p_* - p_{*1})(p_* - p_{*2})(p_* - p_{*3})(p_* - p_{*4}). \quad (11)$$

2. Розрахунок вагових коефіцієнтів квазінейрорегулятора. Теоретичною основою виведення виразів для визначення значень вагових коефіцієнтів квазінейрорегулятора є таке.

Як відомо, показники регулювання визначаються значеннями коренів характеристичного полінома замкнутої системи, які, своєю чергою, залежать від значень його коефіцієнтів a'_i .

Якщо обрати бажаний поліном $D_B(p_*)$, корені якого забезпечать потрібні показники регулювання та виконати умову

$$D_Z(p_*) = D_B(p_*), \quad (12)$$

то необхідних показників регулювання буде досягнуто. Задля виконання умови (12) необхідно, щоб кожен з коефіцієнтів полінома $D_R(p_*)$ отримав необхідне доповнення внаслідок дії зворотного зв'язку, що досягається, якщо

$$\Delta a_i = c_i = a'_i - a_i. \quad (13)$$

Враховуючи, що коефіцієнти за вищої степені оператора диференціювання p_*^n обох поліномів однакові і рівні одиниці, поліном-доповнення від дії зворотних зв'язків має вигляд

$$D_D(p_*) = c_{n-1}p_*^{n-1} + \dots + c_i p_*^i + \dots + c_1 p_* + c_0. \quad (14)$$

Розглянута електромеханічна система (рис. 5) є системою 4-го порядку, тому поліном доповнення $D_D(p_*)$ має бути поліномом 3-го порядку.

Для досліджуваної системи підстановка узагальнених параметрів у формулу Мезона і відповідні перетворення призвели до наступних співвідношень для коефіцієнтів нормованого полінома розімкненої системи:

$$a_3 = 1 - \frac{b}{m(\gamma - 1)}; \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{1}{m} \left(1 + \frac{v(1 + (\gamma - 1))}{\gamma} + \frac{b}{\gamma - 1} \right); \quad (16)$$

$$a_1 = \frac{vm(\gamma - 1)(1 + (\gamma - 1)) + b(v(\gamma - 1) + \gamma)}{m^2\gamma(\gamma - 1)}; \quad (17)$$

$$a_0 = \frac{v(b + 1)}{m^2\gamma}. \quad (18)$$

Поліном-доповнення для неї дорівнює

$$D_D(p_*) = c_3 p_*^3 + c_2 p_*^2 + c_1 p_* + c_0. \quad (19)$$

Ідея квазінейрорегулювання полягає у побудові НРК за спрощеною структурою нейронної мережі (без середніх шарів) з чотирма входами, через які передаються вхідні сигнали після множення на вагові коефіцієнти з такими значеннями, що забезпечать у підсумовуванні на вихідному нейроні значення доповнення до характеристичного полінома розімкненої системи, які задовольняють співвідношенню (12). Тобто передатна функція квазінейрорегулятора повинна бути того ж виду, що і додатковий поліном.

Так як числові значення коефіцієнтів a_i полінома $D_B(p_*)$ відомі, а коефіцієнти розімкнутої системи $D_R(p_*)$ визначаються її параметрами, числові значення коефіцієнтів c_i розраховуємо за співвідношенням (13).

Задля обчислення похідних p_*^i , що входять у вираз полінома-доповнення $D_D(p_*)$ за співвідношенням (19), пропонується використовувати метод кінцевих різниць [22, 23]. Сутність даного методу пояснюють співвідношення (20) – (22), в яких y_l – поточне значення регульованої координати y , а $y_2, y_3, \dots$ – її попередні значення з часовою затримкою Δt .

За малих значень Δt за методом кінцевих різниць похідні з певним степенем точності можуть бути розраховані за співвідношенням

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{\nabla_1}{\Delta t} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta t}; \quad (20)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \approx \frac{\nabla_1^2}{(\Delta t)^2} = \frac{\nabla_1 - \nabla_2}{(\Delta t)^2} = \frac{(y_1 - y_2) - (y_2 - y_3)}{(\Delta t)^2} = \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{(\Delta t)^2}; \quad (21)$$

$$\frac{d^3 y}{dt^3} \approx \frac{\nabla_1^3}{(\Delta t)^3} = \frac{\nabla_1^2 - \nabla_2^2}{(\Delta t)^3} = \frac{(y_1 - 2y_2 + y_3) - (y_2 - 2y_3 + y_4)}{(\Delta t)^3} = \frac{y_1 - 3y_2 + 3y_3 - y_4}{(\Delta t)^3}. \quad (22)$$

Задля досягнення мети регулювання використано лише одну вихідну координату – швидкість другої маси ω_2 . Щоб забезпечити необхідні показники регулювання, слід розрахувати значення c_0, c_1, c_2, c_3 до кожного з коефіцієнтів полінома-доповнення (19).

Як бажаний виберемо нормований поліном Баттерворта 4-го порядку [21]

$$D_{Bat}(p_*) = p_*^4 + 2,6 p_*^3 + 3,4 p_*^2 + 2,6 p_* + 1. \quad (23)$$

Задля узгодження часового параметра під час нормування полінома Баттерворта та безрозмірного часу системи з узагальненими модифікованими параметрами прийнято, що базова величина часу в поліномі Баттерворта дорівнює базовій величині прийнятій раніше схемі.

Необхідні чисельні значення коефіцієнтів c_0, c_1, c_2, c_3 знаходяться як різниця між коефіцієнтами полінома Баттерворта та розімкнутої системи при однакових степенях похідних p_*^i . Підставивши (15) – (18) та (23) у (13) отримаємо

$$c_3 = 2,6 - a_3; \quad c_2 = 3,4 - a_2; \quad c_1 = 2,6 - a_1; \quad c_0 = 1 - a_0.$$

У виразі (19) представимо похідні у формі кінцевих різниць. Як вхідні сигнали використано поточні значення ω_2^* , які відповідають y_1 , та попередні значення y_2, y_3, y_4 відповідні значенням $\omega_2^*(t - \Delta t), \omega_2^*(t - 2\Delta t), \omega_2^*(t - 3\Delta t)$. Тоді

$$D_D(p_*) \approx c_3 \frac{y_1 - 3y_2 + 3y_3 - y_4}{\Delta t^3} + c_2 \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{\Delta t^2} + c_1 \frac{y_1 - y_2}{\Delta t} + c_0. \quad (24)$$

Структуру квазінейрорегулятора, що використовує для зворотного зв'язку тільки одну вихідну координату досліджуваної системи – швидкість другої маси, показано на рис. 6.

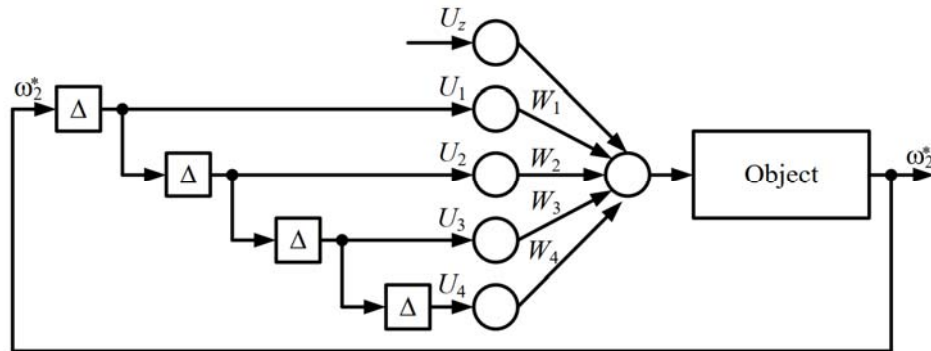


Рис. 6

Згрупувавши доданки співвідношення (24) по кожному з сигналів y_1, y_2, y_3, y_4 , знайдемо вагові коефіцієнти W_1, W_2, W_3, W_4 , що забезпечують необхідний сигнал управління

$$W_1 = -\left(\frac{c_3}{\Delta t^3} + \frac{c_2}{\Delta t^2} + \frac{c_1}{\Delta t} + c_0\right); \quad W_2 = \frac{3c_3}{\Delta t^3} + \frac{2c_2}{\Delta t^2} + \frac{c_1}{\Delta t}; \quad (25, 26)$$

$$W_3 = -\left(\frac{3c_3}{\Delta t^3} + \frac{c_2}{\Delta t^2}\right); \quad W_4 = \frac{c_3}{\Delta t^3}. \quad (27, 28)$$

Отримані вирази для розрахунку вагових коефіцієнтів справедливі для кожної з лінеаризованих ділянок характеристики навантаження.

3. Комп'ютерне моделювання. Адекватність викладених теоретичних положень та отриманих співвідношень перевіримо шляхом комп'ютерного моделювання. Комп'ютерну схему досліджуваної системи показано на рис. 7. Позначення елементів у цій схемі відповідають схемі досліджуваної системи (рис. 5) та принципу дії квазінейрорегулятора. Схема запускається вхідним стрибкоподібним сигналом завдання швидкості ω_{0S} . Введений у схему блок множення дає змогу підключати сигнал поточного значення і затриманих сигналів квазінейрорегулятора в процесі режиму, що сформувався після подачі вхідного сигналу. Схема дає можливість отримувати часові діаграми зміни швидкості другої маси за надмірного прослизання, а також моменту двигуна. Кожна затримка відповідає попередньому значенню сигналу вихідної координати затриманому на величину Δt . По мірі зміни вихідної координати відповідно змінюються затримані сигнали. Під час моделювання значення затримки було встановлено як $\Delta t = 0,01 T_e$.

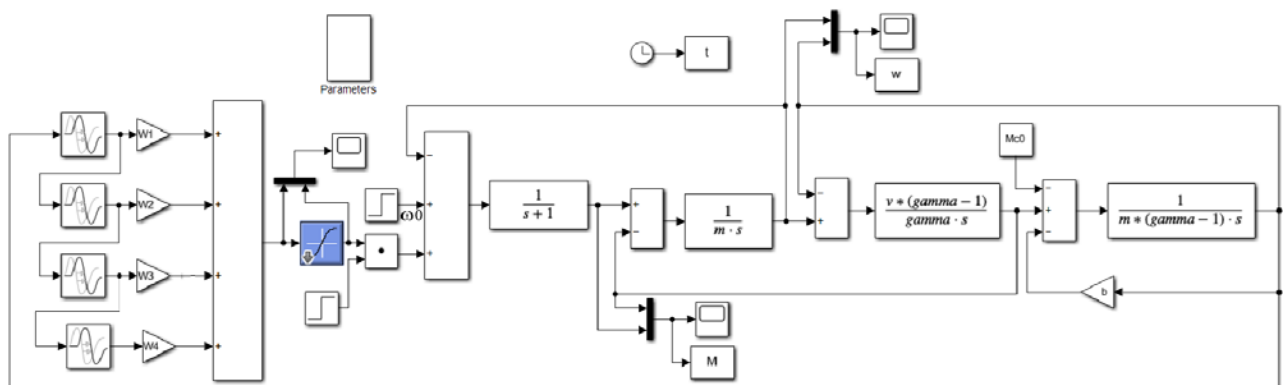


Рис. 7

Режими моделювання встановимо, виходячи з необхідності усунення за допомогою квазінейрорегулятора фрикційних автоколивань (АКФ). Їх виникнення є наслідком розбіжного коливального процесу у разі переміщення робочої точки по падаючій ділянці характеристики тертя. Тому моделювання виконувалося наступним чином. Задавалася точка, яка для розімкненої системи відповідала незагасаючому коливальному та розбіжному коливальному процесам згідно меж стійкості розімкненої системи, визначених методом D -розбиття. Після встановлення цих процесів у визначений момент здійснювалося підключення квазінейрорегулятора. Усунення коливального (для консервативної системи) і розбіжного процесів та забезпечення сталої швидкості свідчать, що фрикційні автоколивання усунені. Тобто, якщо регулятор усуне розбіжний процес на падаючій ділянці, то і АКФ не виникнуть. Жорсткість механічної характеристики навантаження на цій ділянці має від'ємний знак, тому моделювання будемо здійснювати за від'ємних значень параметра b .

Результати моделювання для випадку, коли параметри системи належать межі коливальної стійкості, $b = -0,01$, $m = 2,887$, $\gamma = 1,2$, $\nu = 10$, що відповідає консервативній системі, представлені на рис. 8. Як і очікувалося, у системі встановлюються незагасаючі коливання постійної амплітуди. Це свідчить про те, що кількість розсіюваної енергії у вигляді втрат на активному опорі силового кола електроприводу протягом періоду коливання дорівнює кількості коливальної енергії, що вводиться внаслідок того, що на падаючій ділянці фрикційного навантаження система являє собою електромеханічну систему з від'ємним в'язким тертям.

Моделювання для значень $b = -0,1$, $m = 2,887$, $\gamma = 1,2$, $\nu = 10$, що відповідає точці поза межі стійкості, в якій під час переміщення робочої точки по падаючій ділянці виникає розбіжний коливальний процес, підтверджується отриманими часовими діаграмами (рис. 9).

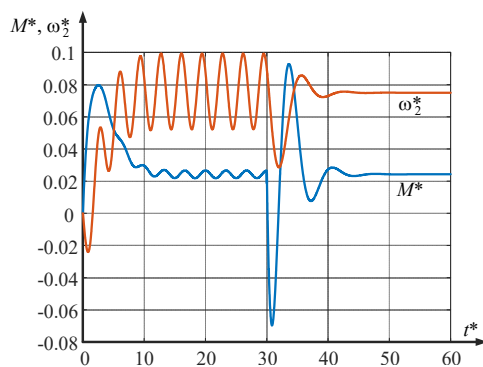


Рис. 8

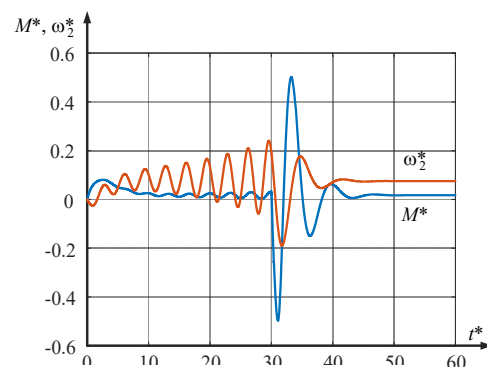


Рис. 9

Проаналізуємо відповідність отриманих часових діаграм фізичній сутності процесів, що протікають під час моделювання.

Стрибоподібне завдання керуючого сигналу (рис. 8) викликає швидке зростання моменту електродвигуна з переходом до незагасаючого коливального процесу швидкості другої маси, що відповідає знаходженню обраних параметрів на межі стійкості. Від'ємне значення швидкості на початку моделювання пояснюється дією закладеного в комп'ютерну модель моменту опору M_{C0} доки момент не зросте до цього значення. Підключення квазінейрорегулятора на 30-й одиниці безрозмірного часу швидко усуває коливання та стабілізує швидкість і момент. Аналогічна дія регулятора має місце і під час усунення розбіжного коливального процесу (рис. 9).

Таким чином, комп'ютерне моделювання в узагальнених параметрах показало повну відповідність очікуваного характеру процесів згідно з теоретичними положеннями даної роботи. Квазінейрорегулятор запропонованої структури забезпечує усунення розвитку фрикційних автоколивань під час перебування робочої точки на падаючій ділянці характеристики тертя. Це актуально, коли ковзання має нормальний характер, наприклад, під час різання металу. Якщо ковзання є аномальним, що має місце у разі буксування коліс електровоза, то враховуючи, що виведені співвідношення застосовні для кожної з лінійних ділянок, для усунення надлишкового прослизування необхідно управлінням забезпечити переміщення робочої точки на першу висхідну ділянку I характеристики тертя (рис. 1). Для цього необхідно передбачити для кожної з його характерних ділянок квазінейрорегулятор подібний до розглянутого вище, з відповідними ваговими коефіцієнтами.

Перевіримо додатково запропоновану методику синтезу на адекватність, виходячи з фізичних параметрів електроприводу блюмінг-1300. Розраховані згідно з раніше наведеними співвідношеннями узагальнені безрозмірні параметри модифікованої сукупності електроприводу блюмінг-1300 дорівнюють: $m = 1,5$; $\nu = 19,259$; $\gamma = 1,1875$, $b = -0,01$.

Результати моделювання наведено на рис. 10 ($b = -0,01$) та рис. 11 ($b = -0,045$). НРК підключається на 30-й одиниці відносного часу.

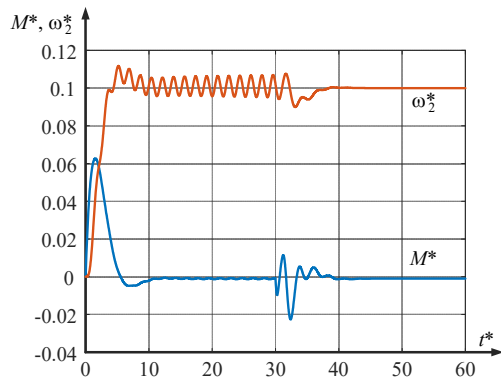


Рис. 9

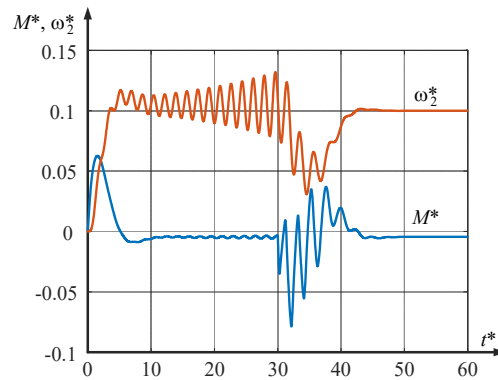


Рис. 10

Результати моделювання також підтверджують усунення розбіжного коливального процесу, який в нелінійній системі призводить до фрикційних автоколивань.

4. Методика синтезу. Виходячи з наведеного вище, пропонується така методика синтезу двомасової електромеханічної системи з нелінійним фрикційним навантаженням і квазінейрорегулятором, який забезпечує усунення розбіжного процесу і фрикційних автоколивань:

- за фізичними даними ЕМС розраховуються узагальнені безрозмірні параметри системи m , γ , ν , b (рис. 5);
- за виразами (1) – (18) розраховуються коефіцієнти нормованого характеристичного полінома розімкненої системи $a_3 \dots a_0$;
- за вибраним розподілом коренів створюється бажаний нормований поліном або вибирається стандартний поліном з відомими числовими значеннями коефіцієнтів $a'_3 \dots a'_0$;
- розраховуються значення коефіцієнтів полінома-доповнення до розімкненої системи c_0, c_1, c_2, c_3 ;
- встановлюються дискретні значення часу затримки вихідної координати під час розрахунку похідних методом кінцевих різниць;
- за наданими у статті виразами (25) – (28) розраховуються значення вагових коефіцієнтів $W1 \dots W4$ квазінейрорегулятора;
- за комп'ютерною моделлю виконується моделювання очікуваних режимів функціонування за умов надмірного ковзання;
- виконується перехід до фізичних величин координат та параметрів динамічного процесу, визначається потреба у використанні й тип активаційної функції вихідного нейрона та закон керування системою.

Висновки. Теоретично обґрунтовано та отримано аналітичні співвідношення для визначення вагових коефіцієнтів нейрорегулятора зі спрощеною структурою (квазінейрорегулятора) та створено методику синтезу двомасової електромеханічної системи з пружним кінематичним зв'язком та нелінійним фрикційним навантаженням. Використано модифіковану сукупність узагальнених безрозмірних параметрів. Результати комп'ютерного моделювання підтверджують ефективність роботи квазінейрорегулятора з точки зору усунення фрикційних автоколивань, які виникають унаслідок переміщення робочої точки по падаючій ділянці характеристики тертя. Запропонована структура квазінейрорегулятора потребує лише вимірювання однієї фазової координати – швидкості другої маси, не потребує середніх шарів нейронів та багаторазових ($10^5 - 10^6$) комп'ютерних ітераційних розрахунків значної кількості вагових коефіцієнтів, як це має місце для класичної нейронної мережі типу PERCEPTRON. Отримані аналітичні вирази мають універсальний характер і можуть бути застосовані до будь-якої з типових лінеаризованих ділянок нелінійності тертя.

Роботу виконано за держбюджетною тематикою НТУ «Харківський політехнічний інститут» з проблеми «Наукові основи електроенергетики» за темою «Динаміка нелінійних електромеханічних систем (К3401)».

1. Загірняк М.В., Клепиков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. Энергоэффективные электромеханические системы широкого технологического назначения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2018. 310 с.
2. Palani S. Automatic Control Systems: With MATLAB. 2nd ed. Cham: Springer, 2022. 908 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93445-3>.
3. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підручник. К.: Либідь, 2007. 656 с.
4. Simões M.G., Morales Paredes H.K. (eds.) Applied Neural Networks and Fuzzy Logic in Power Electronics, Motor Drives, Renewable Energy Systems and Smart Grids. Basel: MDPI, 2020. 203 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03943-335-3>.
5. Alateeq M., Pedrycz W. Logic-oriented fuzzy neural networks: A survey. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 257. P. 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125120>.
6. Rubaai A., Young P. Hardware/Software Implementation of Fuzzy-Neural-Network Self-Learning Control Methods for Brushless DC Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. No 1. Pp. 414–424. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2468191>.
7. Клепиков В.Б. Динаміка електромеханічних систем з нелінійним тертям: монографія. Харків: Підручник НТУ ХПІ, 2014. 408 с.
8. Hirani H. Fundamentals of Engineering Tribology with Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. 442 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107479975>.
9. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М.: Транспорт, 1965. 267 с.
10. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 358 p.
11. Иванченко Ф.К., Красношарпа В.А. Динамика металлургических машин. М.: Металлургия, 1983. 294 с.
12. Ренгевич А.А., Шахтарь П.С., Володько К.П., Ющенко А.И., Галушко М.К., Кузнецов Б.А., Куделя Г.Я., Мехеда М.К., Охримчук О.Х. Причины поломок осей рудничных электровозов. *Вопросы рудничного транспорта: сб. статей*. М.: Госгортехиздат, 1962. Вып. 6. С. 192–203.
13. Клепиков В.Б., Сергеев С.А., Махотило К.В., Обруч И.В. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами. *Электротехника*. 1999. № 5. С. 2–6.
14. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2009. 1024 p.
15. Клепиков В.Б., Колотило В.І., Полянська І.С., Руденко А.В. Квазінейрорегулятор для електромеханічної системи. Деклараційний патент України № 12362. 2006.
16. Клепиков В.Б., Полянская И.С. Квазінейрорегулирование двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением. *Электротехника*. 2003. № 3. С. 29–33.
17. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
18. Обруч И.В., Хорева А.В. Новая модель двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах. *Вестник Нац. техн. ун-та ХПИ. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. 2015. № 12 (1121). С. 160–163.
19. Долбня В.Т. Топологический анализ и синтез электрических и электромеханических систем. Харьков: НТУ ХПИ, 2005. 356 с.
20. Mason C., Zimmerman H. Electronic Circuits, Signals, and Systems. New York: Wiley, 1960. 536 p.
21. Sohn D.L. Practical Analog and Digital Filter Design. Norwood: Artech House, 2003. 400 p.
22. Chapra S.C., Canale R.P. Numerical Methods for Engineers. New York: McGraw-Hill, 2015. 944 p.
23. Esfandiari R. Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB. Boca Raton: CRC Press, 2013. 550 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b14941>.

SYNTHESIS OF A TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH SIMPLIFIED-STRUCTURE NEUROREGULATOR AND NONLINEAR FRICTION LOAD

V.B. Klepikov, O.S. Bieliaiev, I.V. Obruch

**National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kirpichova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.**

E-mail: klepikovvladimir390@gmail.com; guzozzzo@gmail.com; ihor.obruch@khpі.edu.ua.

This paper proposes a synthesis methodology for an electromechanical system controller that ensures the required control performance. When linearizing individual sections of a nonlinear load, the structure of the controller resembles a neural network, leading to its designation as a quasi-neurocontroller (QNC). Unlike a PERCEPTRON-type neural network, the proposed controller does not include hidden layers, and its weight coefficients, instead of being determined through multiple iterative calculations ($10^5 - 10^6$), are derived analytically. These relationships are universal and valid for any linearized section. The use of generalized dimensionless parameters makes these

relationships applicable to a wide range of electric drives used in machines and mechanisms. A modified set of dimensionless generalized parameters has been introduced, allowing for a simple transition to expressions for systems with absolutely rigid couplings. One of the key advantages of the proposed controller is that it eliminates the need to measure hard-to-obtain system coordinates, such as elastic torque and the need of state observers. Instead, it operates using only a single output variable. The essence of quasi-neurocontrol consists in the construction of the feedback transfer function in the form of a polynomial complement, which ensures that the characteristic polynomial of the closed-loop system matches a polynomial with the desired root locations. To compute the required derivatives, the finite difference method is proposed for use within the quasi-neurocontroller. The methodology of quasi-neurocontrol is illustrated by the example of eliminating friction-induced self-oscillations in a two-mass electromechanical system with a quasi-neurocontroller and a nonlinear frictional load. References 23, figures 11.

Keywords: two-mass electromechanical system, electric drive, control systems, transfer function, characteristic polynomial, finite difference method, friction characteristic, friction-induced self-oscillations, neural network, quasi-neurocontroller.

1. Zahirniak M.V., Klepikov V.B., Kovbasa S.M., Mykhalskyi V.M., Peresada S.M., Sadovyi O.V., Shapoval I.A. Energy-Efficient Electromechanical Systems for Broad Technological Applications. Kyiv: Institut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2018. 310 p. (Ukr)
2. Palani S. Automatic Control Systems: With MATLAB. 2nd ed. Cham: Springer, 2022. 908 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93445-3>.
3. Popovych M.H., Kovalchuk O.V. Automatic Control Theory. Kyiv: Lybid, 2007. 656 p. (Ukr)
4. Simões M.G., Morales Paredes H.K. (eds.) Applied Neural Networks and Fuzzy Logic in Power Electronics, Motor Drives, Renewable Energy Systems and Smart Grids. Basel: MDPI, 2020. 203 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03943-335-3>.
5. Alateeq M., Pedrycz W. Logic-oriented fuzzy neural networks: A survey. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 257. P. 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125120>.
6. Rubaai A., Young P. Hardware/Software Implementation of Fuzzy-Neural-Network Self-Learning Control Methods for Brushless DC Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. No 1. Pp. 414–424. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2468191>.
7. Klepikov V.B. Dynamics of Electromechanical Systems with Non-Linear Friction. Kharkiv: NTU KhPI Press, 2014. 408 p. (Ukr)
8. Hirani H. Fundamentals of Engineering Tribology with Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. 442 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107479975>.
9. Minov D.K. Improving the Traction Properties of Electric and Diesel Locomotives with Electric Drive. Moskva: Transport, 1965. 267 p. (Rus)
10. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 358 p.
11. Ivanchenko F.K., Krasnoshapka V.A. Dynamics of Metallurgical Machines. Moskva: Metallurgiya, 1983. 294 p. (Rus)
12. Rengevich A.A., Shakhtar P.S., Volodko K.P., Yushchenko A.I., Galushko M.K., Kuznetsov B.A., Kudelya G.Ya., Mekheda M.K., Okhrimchuk O.Kh. Causes of Axle Failures of Mine Electric Locomotives. *Voprosy rudnichnogo transporta: sbornik statei*. Moskva: Gosgortekhzdat, 1962. Vol. 6. Pp. 192–203. (Rus)
13. Klepikov V.B., Sergeev S.A., Makhotilo K.V., Obruch I.V. Application of Neural-Network and Genetic-Algorithm Methods to Electric-Drive Control Problems. *Elektrotehnika*. 1999. No 5. Pp. 2–6. (Rus)
14. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2009. 1024 p.
15. Klepikov V.B., Kolotilo V.I., Polianska I.S., Rudenko A.V. Quasi-neuroregulator for an electromechanical system. Deklaratsiinyi patent Ukrainy No 12362. 2006. (Ukr)
16. Klepikov V.B., Polianska I.S. Quasineuroregulation of a two-mass electromechanical system with negative viscous friction. *Elektrotehnika*. 2003. No 3. Pp. 29–33. (Rus)
17. Klyuchev V.I. Electric drive theory. Moskva: Energoatomizdat, 2001. 704 p. (Rus)
18. Obruch I.V., Khoreva A.V. A New Model of a Two-Mass Electromechanical System in Generalised Parameters. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta KhPI. Tematicheskii vypusk: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriia i praktika*. 2015. No 12 (1121). Pp. 160–163. (Rus)
19. Dolbnia V.T. Topological Analysis and Synthesis of Electrical and Electromechanical Systems. Kharkiv: NTU KhPI, 2005. 356 p. (Rus)
20. Mason C., Zimmerman H. Electronic Circuits, Signals, and Systems. New York: Wiley, 1960. 536 p.
21. Sohn D.L. Practical Analog and Digital Filter Design. Norwood: Artech House, 2003. 400 p.
22. Chapra S.C., Canale R.P. Numerical Methods for Engineers. New York: McGraw-Hill, 2015. 944 p.
23. Esfandiari R. Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB. Boca Raton: CRC Press, 2013. 550 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b14941>.

Надійшла 26.02.2025
Остаточний варіант 15.05.2025