

Клепиков Володимир Борисович, доктор технічних наук, професор, Тел. +380506478170, E-mail: klepikovvladimir390@gmail.com.

Беляєв Олег Сергійович, асп., Тел. +380506928284, E-mail: guzozzzo@gmail.com.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Курпичова 2, м. Харків, Україна, 61002

НЕЙРОРЕГУЛЯТОР ЗІ СПРОЩЕНОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ФРИКЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Анотація. Запропоновано регулятор для електромеханічних систем електроприводу за структурою вихідного нейрона. На відміну від синтезу традиційної нейронної мережі нейроконтролера, для запропонованого регулятора знаходження вагових коефіцієнтів, що вимагають багаторазових ітераційних комп'ютерних розрахунків, виключається. Вони визначаються за виведеними аналітичними співвідношеннями. Порівняно з модальним регулятором, для якого потрібно вимірювати ряд координат електроприводу, у тому числі й важко вимірюваних, у запропонованому можна обмежитися виміром лише однієї вихідної координати. Для лінійної системи достатньо одного вихідного нейрона, для нелінійної їх кількість дорівнює числу ділянок, що лінеаризують нелінійність.

Ключові слова: нейрорегулятор, нейронна мережа, фрикційне навантаження, квазінейрорегулятор, синтез електромеханічної системи.

Klepikov Vladimir Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tel. +380506478170, E-mail: klepikovvladimir390@gmail.com.

Beliiaiev Oleh Sergiyovich, Postgraduate, Tel. +380506928284, E-mail: guzozzzo@gmail.com.

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

NEURO-REGULATOR WITH SIMPLIFIED STRUCTURE FOR ELECTRIC DRIVE WITH FRICTION LOAD

Abstract. A controller for electromechanical electric drive systems based on the structure of the output neuron is proposed. In contrast to the synthesis of a traditional neural network of a neurocontroller, for the proposed regulator, the finding of weighting coefficients, which require multiple iterative computer calculations, is excluded. They are determined by derived analytical ratios. Compared to the modal controller, for which it is necessary to measure a number of coordinates of the electric drive, including those that are difficult to measure, in the proposed one, you can limit yourself to the measurement of only one output coordinate. For a linear system, one output neuron is enough, for a nonlinear system, their number is equal to the number of sections that linearize the nonlinearity.

Keywords: neuroregulator, neural network, friction load, quasi-neuroregulator, synthesis of electromechanical system.

Вступ. Призначення електроприводу (ЕП) машин та механізмів – забезпечити якість руху їх робочих органів відповідно до вимог технологічного процесу. ЕП багатьох машин і механізмів (прокатних станів, металорізальних верстатів, електровозів, роботів та ін.) в нормальних або аномальних режимах мають навантаження типу «пара тертя» з нелінійною механічною характеристикою) [1-4]. Її лінеаризований за типовими ділянками вигляд надано на рис. 1.

Така характеристика при проковзуванні (буксуванні, юзі) містить падаючу ділянку, на якій збільшення швидкості проковзування $\omega_{ск}$ супроводжується зниженням моменту опору M_c (так звана ділянка від'ємного в'язкого тертя [5]). Нелінійність характеристики призводить у ряді випадків до виникнення фрикційних автоколиваний (АКФ). У зарубіжній літературі подібний характер руху отримав назву «stick-slip» (прилипання-ковзання) [5-

7, 9, 10], однак автоколивальний режим може і не містити зупинок (нерелаксаційні АКФ [11, 12]). АКФ, зазвичай, погіршують показники технологічного процесу, а в окремих випадках можуть призвести до поломок кінематичних ланок [7].

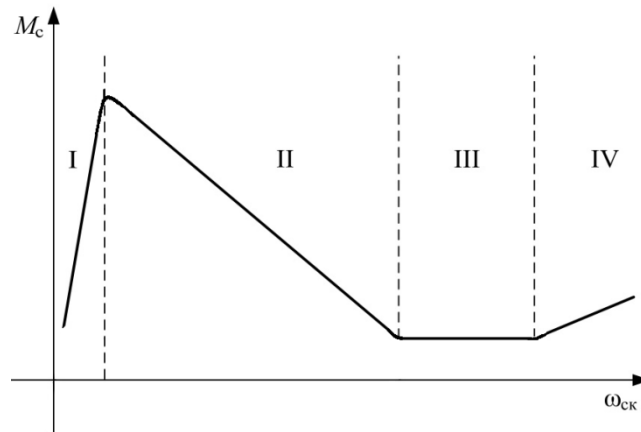


Рис. 1. Характеристика фрикційного навантаження
 На рис. 1 : I – ділянка пружного ковзання;
 II - падаюча ділянка; III - $M_c \approx \text{const}$;
 IV - слабовисхідна ділянка.

Забезпечення необхідних показників руху засобами електроприводу досягається синтезом електромеханічної системи (ЕМС) із заданими показниками регулювання координат ЕП (крутного моменту, швидкості, переміщення). Широко відомі такі методи синтезу: підпорядковане регулювання координат, модальне управління, поліноміальні методи, при яких визначаються значення параметрів регуляторів, датчиків і коефіцієнтів передачі зворотних зв'язків (ЗС) [13-15].

На кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» Харківського політехнічного інституту було вперше запропоновано використовувати для розв'язання задач управління ЕП метод нейронних мереж у поєднанні з методом генетичних алгоритмів, який у 1995 р. було докладено на Міжнародній конференції з електроприводу «АЕП-95» [16]. При апробації методу використовувалася нейронна мережа (НМ) виду «прямопрямований перцептрон», який містив середній шар з 10 нейронами, вхідний шар, зсув та вихідний нейрон. Вирішувалося завдання усунення фрикційних автоколивань та забезпечення заданих показників регулювання при роботі на падаючій ділянці. Синтез нейронної мережі полягав у знаходженні 50 значень вагових коефіцієнтів при передачі сигналів від шару до шару. Синтез, що виконувався методом генетичних алгоритмів [17], вимагав багаторазових до 10^5 ітераційних розрахунків. На персональному комп'ютері того часу «РС-3» зайняв більше 30 годин. Швидкий розвиток комп'ютерної техніки, підвищення швидкодії дозволило суттєво прискорити синтез НМ для ЕМС. Однак і зараз він іноді вимагає до однієї години, і більше.

У 2006 році було отримано патент на регулятор, який усуває необхідність багаторазових ітераційних розрахунків при знаходженні вагових коефіцієнтів. Їх визначення здійснюється за одержаними аналітичними співвідношеннями. При лінійній апроксимації характерних ділянок нелінійного навантаження такий регулятор за своєю архітектурою схожий на нейронну мережу (рис. 2), і у зв'язку з цим був названий квазінейрорегулятором (КНР) [8].

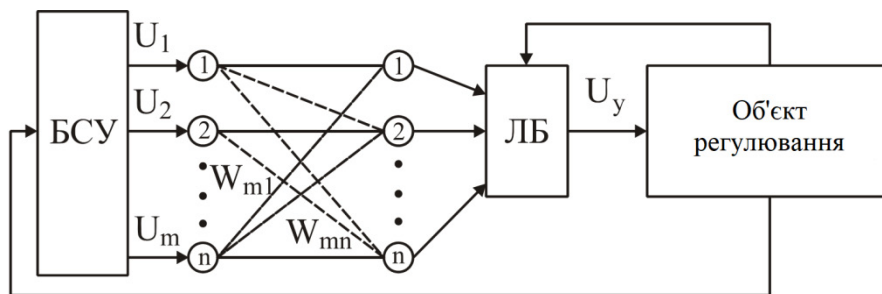


Рис. 2. Функціональна схема квазінейрорегулятора

На рис. 2: n – кількість вихідних нейронів, яка дорівнює кількості лінеаризованих ділянок характеристики навантаження; m – число вхідних сигналів, яке залежить від порядку характеристичного поліному системи. ЛБ – логічний блок, який підключає вихідний нейрон, що відповідає лінеаризованій ділянці навантаження на якій в даний момент знаходиться робоча точка системи; БСУ – Блок сигналу управління та сигналів зворотного зв'язку регульованої координати із затримками; $U_1 - U_m$ – вхідні сигнали КНР, що являють собою поточне значення вихідної координати ті її значень із затримками; $W_{m1} \dots W_{mn}$ – розраховані аналітично вагові коефіцієнти.

На відміну від традиційних нейронних мереж коефіцієнти ваги визначаються за допомогою виведених аналітичних співвідношень. Отримані після перемноження на вагові коефіцієнти значення сигналів передаються безпосередньо на вихідні нейрони ($1 \dots n$), а не на нейрони прихованого шару, як в традиційних нейронних мережах. Сигнали вихідних нейронів можуть перетворюватися активаційною функцією, як це має місце у нейронній мережі, після чого здійснюють функцію сигналу управління U_y .

Для лінійної системи достатньо одного вихідного нейрона, але у разі нелінійної системи її нелінійність лінеаризується. У загальному випадку число лінійних ділянок вибирається з умови необхідної точності апроксимації, а кількість нейронів у вихідному шарі КНР встановлюється рівною числу лінійних ділянок.

Порівняно з нейронною мережею квазінейрорегулятор має низку переваг. Він має простішу структуру; не містить нейронів прихованих шарів, завдяки чому виключаються необхідність їх обчислення; спрощується визначення вагових коефіцієнтів; забезпечується не наблизені до заданого

критерію, а встановлені значення параметрів регулювання. Порівняно з модальним регулятором КНР не вимагає інформації щодо повного вектора стану координат, деякі з яких можуть бути важко вимірюваними (наприклад, пружний момент); не потребує спостерігачів стану, використання яких підвищує порядок характеристичного полінома; забезпечує всі переваги властиві мікропроцесорним системам управління.

Мета і завдання роботи. У [1] була запропонована методика винайдення вагових коефіцієнтів, яка передбачає визначення характеристичних поліномів замкнутої та розімкнутої систем у безрозмірних узагальнених параметрах, а також доповнень від кожного із зворотних зв'язків, після чого проводиться знаходження вагових коефіцієнтів.

Ціль статті – теоретичне обґрунтування можливості створення та розробки більш простої методики визначення вагових коефіцієнтів, а також перевірка її адекватності шляхом комп'ютерного моделювання, і можливість ознайомити з запропонованою методикою українських вчених та фахівців.

Теоретична частина і методика. Нехай об'єктом регулювання є ЕП. Розімкнена електромеханічна система ЕП має характеристичний поліном у нормованому вигляді:

$$D_p(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_i p^i + \dots + a_1 p + a_0. \quad (1)$$

Коефіцієнти полінома a_i визначаються параметрами об'єкта регулювання. Необхідні показники регулювання можна забезпечити з допомогою зворотних зв'язків від координат ЕП. У монографії [1] показано, що для ЕМС з нелінійним фрикційним навантаженням для кожної з ділянок механічної характеристики (рис. 1) в системі із загальним суматором характеристичний поліном замкнутої системи $D_3(p)$ дорівнює сумі полінома розімкнутої $D_p(p)$ і додаткового полінома $D_d(p)$ кожний складник якого залежить від значення зворотного зв'язку відповідної координати.

$$D_3(p) = D_p(p) + D_d(p) \quad (2)$$

Порівняно з коефіцієнтами розімкнутої системи, кожен із коефіцієнтів замкнутої змінюється на величину Δa_i , тобто.

$$D_3(p) = p^n + (a_{n-1} + \Delta a_{n-1})p^{n-1} + \dots + (a_i + \Delta a_i)p^i + \dots + (a_1 + \Delta a_1)p + a_0 + \Delta a_0. \quad (3)$$

Показники регулювання визначаються значеннями коренів характеристичного полінома замкнутої системи, які, своєю чергою, залежать від значень його коефіцієнтів. Якщо за рахунок зворотних зв'язків забезпечити коефіцієнти $D_3(p)$ такими ж, як у деякого бажаного полінома $D_{ж}(p)$ з необхідними коренями:

$$D_{\text{ж}}(p) = p^n + a'_{n-1}p^{n-1} + \dots + a'_i p^i + \dots + a'_1 p + a'_0, \quad (4)$$

тобто виконати умову:

$$D_3(p) = D_{\text{ж}}(p), \quad (5)$$

то необхідних показників регулювання буде досягнуто. Для виконання умови (5) необхідно, щоб кожен із коефіцієнтів полінома $D_p(p)$ отримав від дії зворотного зв'язку доповнення:

$$\Delta a_i = a'_i - a_i = b_i, \quad (6)$$

з чого витікає:

$$D_{\text{д}}(p) = b_{n-1}p^{n-1} + \dots + b_i p^i + \dots + b_1 p + b_0. \quad (7)$$

Приклад використання методики. Моделювання. Ідея квазінейрорегулювання полягає у формуванні за структурою вихідного нейрона сигналу, що реалізує співвідношення (7) і подачі цього сигналу на вхід об'єкта регулювання. Так як числові значення коефіцієнтів a'_i полінома $D_{\text{ж}}(p)$ відомі, а коефіцієнти розімкнутої системи $D_p(p)$ визначаються її параметрами, тобто також відомі, то за співвідношенням (6) знаходяться числові значення b_i . Для обчислення похідних p^i , що входять до складу доданків співвідношення (7), пропонується використовувати метод зворотних кінцевих різниць [14].

Сутність методу пояснює рис. 3 і співвідношення (8) - (10). На малюнку: y_1 – поточне значення регульованої координати y_1 , а y_2, y_3, \dots – її попередні значення із затримкою на час Δt .

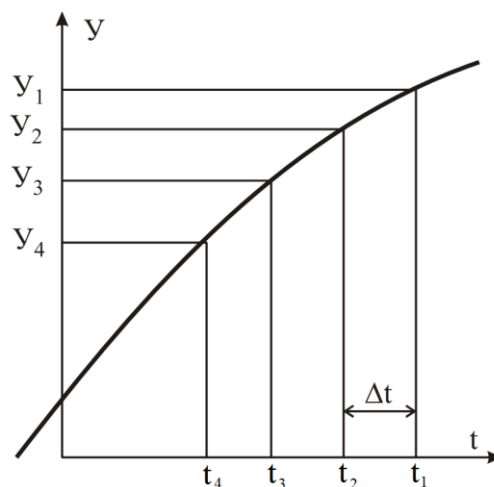


Рис. 3. Метод зворотних кінцевих різниць

При малих значеннях Δt очевидно, що похідна поточного значення y_1 близька до:

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{v_1}{\Delta t} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta t}; \quad (8)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} \approx \frac{v_1^2}{(\Delta t)^2} = \frac{v_1 - v_2}{(\Delta t)^2} = \frac{(y_1 - y_2) - (y_2 - y_3)}{(\Delta t)^2} = \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{(\Delta t)^2}; \quad (9)$$

$$\frac{d^3y}{dt^3} \approx \frac{v_1^3}{(\Delta t)^3} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{(\Delta t)^3} = \frac{(y_1 - 2y_2 + y_3) - (y_2 - 2y_3 + y_4)}{(\Delta t)^3} = \frac{y_1 - 3y_2 + 3y_3 - y_4}{(\Delta t)^3}; \quad (10)$$

.....

Таким чином, методика синтезу КНР включає наступні етапи:

1. Побудова структурної схеми електромеханічної системи ЕП як об'єкта регулювання та знаходження його характеристичного полінома розімкнутої системи.
2. Визначення бажаного полінома, що забезпечує необхідні показники регулювання шляхом вибору коренів, або вибором стандартного полінома.
3. Визначення доповнення $D_d(p)$ до поліному розімкнутої системи.
4. Вибір числа координат регулювання за якими будуть здійснені зворотні зв'язки.
5. Визначення параметрів зворотних зв'язків, що реалізують бажані показники регулювання.
6. Заміна в поліномі-доповнення $D_d(p)$ похідних p^i відповідними їм виразами у зворотніх кінцевих різницях і угруповання доданків з однойменними сигналами затримки.
7. Визначення вагових коефіцієнтів передачі від однойменних сигналів до вихідного нейрона.

Пояснимо методику синтезу КНР на прикладі двомасової ЕМС ЕП з пружним кінематичним зв'язком і з фрикційним навантаженням, механічна характеристика якої містить падаючу ділянку з жорсткістю β_c має негативне значення. Структурна схема системи представлена рис. 4.

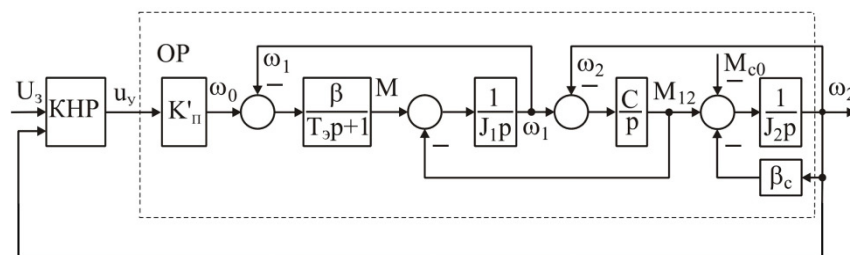


Рис. 4. Структурна схема ЕМС із фрикційним навантаженням

Завдання регулятора не допустити виникнення автоколивального режиму шляхом усунення динамічного процесу, що розходиться при знаходженні робочої точки на падаючій ділянці, і забезпечити при цьому необхідні динамічні показники регулювання. Ця система, як об'єкт регулювання, має характеристичний поліном $D_p(p)$ четвертого порядку.

$$D_p(p) = p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0. \quad (11)$$

Коефіцієнти a_0, \dots, a_3 визначаються значеннями параметрів об'єкта регулювання.

Встановимо, що для вирішення поставленого завдання буде використано лише одну вихідну координату – швидкість другої маси ω_2 . Щоб забезпечити необхідні показники регулювання, необхідно розрахувати доповнення $b_0 - b_3$ до кожного з коефіцієнтів полінома (11). Тобто. поліном доповнення $D_d(p)$ повинен мати вигляд:

$$D_d(p) = b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0. \quad (12)$$

Як бажаний виберемо поліном Баттерворта четвертого порядку:

$$D_{ж}(p) = D_B(p). \quad (13)$$

Прийmemo середньгеометричний корінь рівним одиниці:

$$\omega_0 = \sqrt[4]{p_1p_2p_3p_4} = 1,$$

у цьому випадку поліном Баттерворта має вигляд:

$$D_B(p) = p^4 + 2,6p^3 + 3,4p^2 + 2,6p + 1. \quad (14)$$

Необхідні чисельні значення коефіцієнтів b_0, b_1, b_2, b_3 знаходяться, як різниця полінома Баттерворта і полінома розімкнутої системи при однойменних ступенях похідних p^i .

Перейдемо у виразі (12) до похідних у зворотних різницях. Як вхідні сигнали використовуємо поточні значення $\omega_2(t)$ рівне y_1 і 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

$$D_d(p) \approx b_3 \frac{y_1 - 3y_2 + 3y_3 - y_4}{\Delta t^3} + b_2 \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{\Delta t^2} + b_1 \frac{y_1 - y_2}{\Delta t} + b_0 \quad (15)$$

Згрупувавши доданки щодо кожного із сигналів y_1, y_2, y_3, y_4 знайдемо співвідношення для розрахунку вагових коефіцієнтів W_1, W_2, W_3, W_4

представлені на рис. 5 нейронної мережі, що забезпечує необхідний сигнал управління:

$$W_1 = \frac{b_3}{\Delta t^3} + \frac{b_2}{\Delta t^2} + \frac{b_1}{\Delta t} + b_0 \quad (16)$$

$$W_2 = -\frac{3b_3}{\Delta t^3} + \frac{2b_2}{\Delta t^2} + \frac{b_1}{\Delta t} \quad (17)$$

$$W_3 = \frac{3b_3}{\Delta t^3} + \frac{2b_2}{\Delta t^2} \quad (18)$$

$$W_4 = \frac{b_3}{\Delta t^3} \quad (19)$$

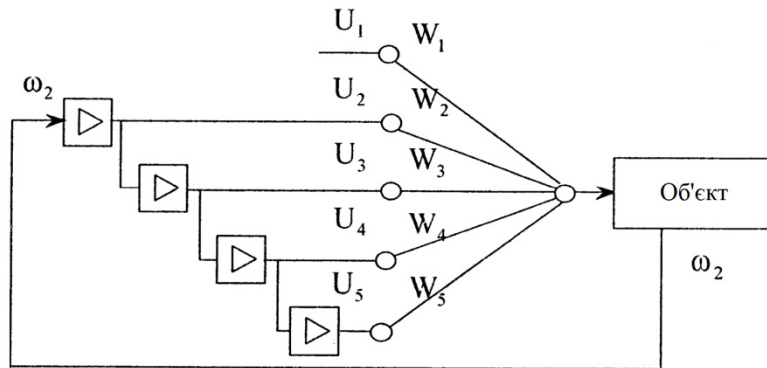


Рис. 5. Нейромержева структура квазінейрорегулятора

Моделювання виконувалося за наступних узагальнених безрозмірних параметрів ЕМС з фрикційним навантаженням [1]. Коефіцієнт співвідношення мас:

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1} = 1.5. \quad (20)$$

Відношення квадратів кутових частот недемпфованих механічних до електромеханічних коливань:

$$\nu = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{EM}^2} = 5. \quad (21)$$

Відношення жорсткості механічної характеристики фрикційного навантаження до модуля жорсткості характеристики електропривода:

$$b = \frac{\beta_s}{\beta} = -0.2. \quad (22)$$

Відносне значення електромеханічної постійної часу 1-ї маси (ротора ЕД та суми жорстко пов'язаних з ним мас):

$$T_{m1}^* = T_{m1} \cdot \Omega_{12} = \frac{J_1}{\beta} \Omega_{12} = 0.365. \quad (23)$$

Характеристичний поліном розімкненої системи, що розглядається, має четвертий порядок і визначається чотирма узагальненими безрозмірними параметрами. Для співставлення запропонованої методики - визначення вагових коефіцієнтів з виразу до полінома доданку, з методикою, що використовувалася раніше [18], параметри розімкнутої системи були прийняті такими ж.

Як бажаний обрано поліном Баттерворта четвертого порядку з безрозмірним оператором диференціювання $p^* = \frac{p}{\Omega_0}$ при значенні середньгеометричного кореня $\Omega_0 = 1/c$. Результати моделювання з кроком дискретизації $\Delta t^* = 0.1$ представлені рис. 6.

Достовірність результатів базується на коректності математичних співвідношень та відповідності виду отриманих тимчасових діаграм фізичної сутності досліджуваних процесів. До моменту часу $t^* \leq 55$ процес, як і має бути, носить коливальний характер, що розходиться. Після підключення квазінейрорегулятора $t^* > 55$ – відбувається загасання коливань відповідно до розподілу коренів по поліному Баттерворта. Достовірність результатів підтверджується також їх узгодженням із раніше отриманими результатами за попередньою методикою.

Комп'ютерне моделювання динамічного процесу вище представленої електромеханічної системи, при знаходженні робочої точки на падаючій ділянці показало [18], що підключення регулятора, синтезованого за запропонованим методом, усувало коливальний процес, що розходиться, і забезпечувало задані показники регулювання.

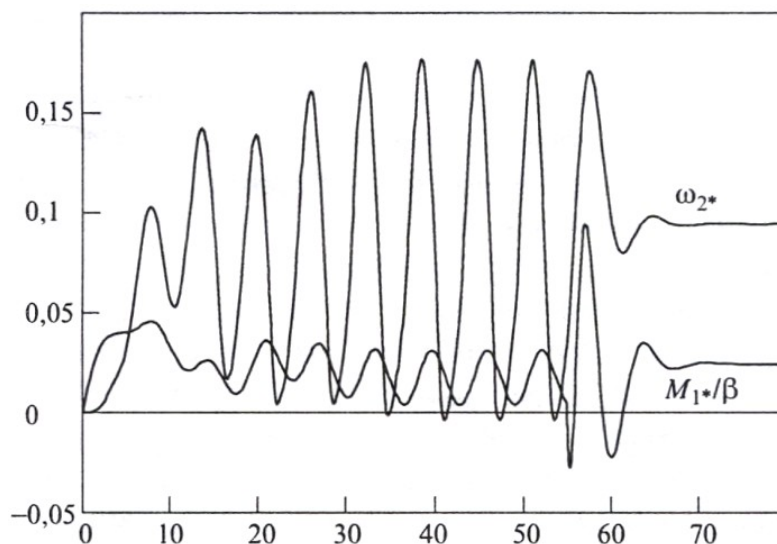


Рис. 6. Перехідний процес у двомасовій ЕМС із фрикційним навантаженням

Висновок. Виконано теоретичне обґрунтування можливості побудови регулятора за структурою вихідного нейрона для лінійних електромеханічних систем електроприводу, що забезпечує задані показники

регулювання. Цей регулятор усуває автоколивальний режим та забезпечує необхідні показники регулювання. Регулятор не вимагає, як при модальному управлінні, вимірювання ряду координат (у тому числі важко вимірюваних), створення спостерігача стану і дозволяє обмежитися лише однією вихідною координатою. На відміну від синтезу нейронної мережі традиційних нейроконтролерів, виключається етап багаторазових ітераційних комп'ютерних розрахунків значень вагових коефіцієнтів. Запропоновано методику аналітичного визначення вагових коефіцієнтів замість багаточисельних ітераційних комп'ютерних розрахунків при синтезі нейронної мережі. Достовірність одержаних результатів підтверджується: коректним використанням відомої математичної моделі об'єкта; коректністю математичних співвідношень; узгодженням результатів моделювання при використанні запропонованою у даній статті методики з запропонованою раніше та їх відповідністю фізичній сутності досліджуваних процесів.

Список використаних джерел:

1. Клепиков В. Б. Динаміка електромеханічних систем з нелінійним тертям: монографія. Х.: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. 408 с.
2. Іванченко Ф. К., Красношапка В. О. Динаміка металургійних машин. М.: Металургія, 1983. 294 с.
3. Мінов Д. К. Підвищення тягових властивостей електровозів та тепловозів з електричною передачею. М.: Транспорт, 1965. 267 с.
4. Armstrong - Helouvry B. Control of Machines with Friction. Kluwer Academic Publishers. Boston/Dordrecht / London, 1991. 173 p.
5. Загірняк М. В., Клепиков В. Б., Ковбаса С. М., Михальський В. М., Пересада С. М., Садовой О. В., Шаповал І. А. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 310 с.
6. Kato S., Yamaguchi K., Matsubayashi T. On the dynamic behaviour of machine tool slideway. Characteristics of static friction in stick-slip motion. Bulletin of the JSME. 1970. Vol. 13. № 35. P. 170–179.
7. Ренгевич А. А., Шахтар П. С., Володько К. П., Ющенко А. І., Галушко М. К., Кузнецов Б. А., Куделя Г. Я., Мехеда М. К., Охрімчук О. Х. Причини поломок осей рудничних електровозів. Питання рудничного транспорту: зб. статей; за ред. Н.С. Полякова. М.: Госгортехіздат, 1962. Вип 6. С. 192-203.
8. Декларативний патент України 12362. Квазінейрорегулятор для електромеханічної системи / В.Б. Клепиков, В.І. Колотіло, І.С. Полянська, А.В. Руденко (Україна). - 2006, Бюл. №7.
9. A. A. Y. Mohammed and I. Rahim. Investigate Stick-Slip Intervals with One Equation of Motion and Analyse the Effect Of The Friction Noise. International Journal Of Scientific & Technology Research. 2013. pp. 96-117.
10. Derbal Massinissa, et al. Fractional-Order Controllers for Stick-Slip Vibration Mitigation in Oil Well Drill-Strings. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2021. vol. 40, no. 3. pp. 1571–1584.
11. Голоскоков Є. Г., Філіппов А. П. Нестационарні коливання механічних систем. Київ: Наукова думка, 1986. 336 с.
12. Клепиков В. Б. Особливості динаміки електромеханічних систем з негативним в'язким тертям. Технічна електродинаміка. Тим. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". К. 2000. Ч.1 С. 40–45.
13. Ключев В. І. Теорія електроприводу. М.: Вища школа, 2001. 704 с.
14. Зражевський Г. М. Чисельні методи в задачах механіки. Частина І. Теоретична та прикладна механіка. Навчально методичний посібник. Київ 2020. С. 28-31.
15. Толочко О. І., Коцегуб П. Х., Федоряк Р. В. Аналіз та синтез модальних систем, замкнених через спостерігач стану повного порядку. Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія: Електротехніка та енергетика, вип.4. Донецьк: ДонДТУ, 1999. с. 46-51.

16. Клепиков В. Б., Сергеев С. А., Вороновський Г. К. Генетичні алгоритми глобального пошуку для оптимізації електроприводів. 1 Міжнародна (12 Всеросійська) конференція з автоматизованого електроприводу: тези доповідей. СПб., 1995. С. 43-44.
17. Клепиков В. Б., Сергеев С. А., Махотило К. В., Обруч І. В. Застосування методів нейронних мереж та генетичних алгоритмів у вирішенні завдань управління електроприводами. Електротехніка. 1999. №5. С. 2-6.
18. Клепиков В. Б., Полянська І. С. Квазінейрорегулювання двомасової електро механічної системи з негативним в'язким тертям. Електротехніка. 2003. №3. С. 29–33.

Referenses:

1. Klepikov V. B. Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: a monograph. Kh. Ed.-vo "Textbook of NTU "KhPI"", 2014. 408 p.
2. Ivanchenko F. K., Krasnoshapka V. O. Dynamics of metallurgical machines. M. Metallurgy, 1983. 294p.
3. Minov D. K. Increasing traction properties of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission. M. Transport, 1965. 267 p.
4. Armstrong - Helouvry B. Control of Machines with Friction. Kluwer Academic Publishers. Boston/Dordrecht / London, 1991. p. 173
5. Zahirnyak M. V., Klepikov V. B., Kovbasa S. M., Mikhalskyi V. M., Peresada S. M., Sadovoy O. V., Shapoval I. A. Energy-efficient electromechanical systems of wide technological purpose. Kyiv, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. 310 p.
6. Kato S., Yamaguchi K., Matsubayashi T. On the dynamic behavior of machine tool slideway. Characteristics of static friction in stick-slip motion. Bulletin of the JSME. 1970. Vol. 13. No. 35. pp. 170–179.
7. Rengevych A. A., Shakhtar P. S., Volodko K. P., Yushchenko A. I., Galushko M. K., Kuznetsov B. A., Kudelya G. Ya., Meheda M. K., Okhrimchuk O. H. Causes of axle breakdowns of mine electric locomotives. Issues of mine transport: coll. articles. M. Gosgortekhzidat, 1962. Issue 6. pp. 192-203.
8. Declaration patent of Ukraine 12362. Quasi-neuroregulator for an electromechanical system / V.B. Klepikov, V.I. Kolotilo, I.S. Polyanska, A.V. Rudenko (Ukraine). - 2006, Bull. #7.
9. A. A. Y. Mohammed and I. Rahim. Investigate Stick-Slip Intervals with One Equation of Motion and Analyze the Effect of the Friction Noise. International Journal of Scientific & Technology Research. 2013. pp. 96-117.
10. Derbal Massinissa, et al. Fractional-Order Controllers for Stick-Slip Vibration Mitigation in Oil Well Drill-Strings. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2021. vol. 40, no. 3. pp. 1571–1584.
11. Goloskokov E. G., Filippov A. P. Nonstationary oscillations of mechanical systems. Kyiv. Naukova dumka, 1986. 336 p.
12. Klepikov V. B. Peculiarities of the dynamics of electromechanical systems with negative viscous friction. Technical electrodynamics. - Tim. Vol. "Problems of modern electrical engineering". K. 2000. Part 1. pp. 40–45.
13. Klyuchev V. I. Theory of electric drive. M. Higher School, 2001. 704 p.
14. Zrazhevskii G. M. Numerical methods in mechanics problems. Part I. Theoretical and applied mechanics. Instructional manual. Kyiv 2020. pp. 28-31.
15. Tolochko O. I., Kotsegub P. H., Fedoryak R. V. Analysis and synthesis of modal systems closed through an observer of a state of complete order. Collection of scientific works of DonDTU. Series: Electrical engineering and energy, issue 4. Donetsk: DonDTU, 1999, pp. 46-51.
16. Klepikov V. B., Sergeev S. A., Voronovskyi G. K.. Genetic algorithms of global search for optimization of electric drives. 1st International (12th All-Russian) conference on automated electric drive: abstracts of reports. St. Petersburg, 1995. pp. 43-44.
17. Klepikov V. B., Sergeyev S. A., Makhotylo K. V., Obruch I. V. The application of neural network methods and genetic algorithms in solving the problems of controlling electric drives. Elektrotehnika. 1999. No. 5. pp. 2-6.
18. Klepikov V. B., Polyanska I. S. Quasi-neuroregulation of a two-mass electromechanical system with negative viscous friction. Electrotechnics. 2003. No. 3. pp. 29–33.

Стаття надійшла до редакції 28.01.2023 р.