



УКРАЇНА

(19) UA (11) 12362 (13) U  
(51) МПК (2006)  
G05B 11/01  
G05B 5/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) КВАЗІНЕЙРОРЕГУЛЯТОР ДЛЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

1

2

(21) u200503304

(22) 11.04.2005

(24) 15.02.2006

(46) 15.02.2006, Бюл. № 2, 2006 р.

(72) Клепиков Володимир Борисович, Полянська Ірина Сергіївна, Колотіло Віталій Іванович, Руденко Андрій Валентинович

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) 1. Квazăнейрорегулятор для електромеханічної системи, виконаний по архітектурі найпростішої нейронної мережі, що містить кілька елементів затримки, кілька вхідних нейронів і один вихідний, який відрізняється тим, що число вхідних нейронів вибирається не довільно, а визначається на одиницю більшим за порядок характеристичного полінома системи, коефіцієнти ваги визначаються із співвідношень, отриманих шляхом синтезу мо-

дального регулятора для моделі, поданої у канонічній формі фазової змінної, з подальшим застосуванням кінцево-різницевого математичного апарату, активаційна функція має одиничний коефіцієнт підсилення в області початку координат, а функціональне перетворення здійснюється на вихідному нейроні.

2. Квazăнейрорегулятор за п. 1, який відрізняється тим, що при існуванні нелінійностей кількість вихідних нейронів обирається рівною кількості ділянок лінеаризації, кількість яких обирається за умовою необхідної точності апроксимації, причому кожний з вихідних нейронів з'єднаний із логічним блоком, який підключає необхідний вихідний нейрон до входу перетворювача залежно від розташування робочої точки на тій чи іншій ділянці лінеаризованої характеристики.

Корисна модель відноситься до галузі автоматичного керування електроприводами машин і механізмів і може бути використана для поліпшення їх динамічних показників регулювання, а також техніко-економічних показників у цілому.

Близьким до запропонованого є модальний регулятор, виконаний на основі принципів модального керування [1, 2], що забезпечує задані показники регулювання завдяки наявності зворотних зв'язків по основних координатах електромеханічної системи (ЕМС), виведених на загальний суматор, при чому значення коефіцієнтів передач ланцюгів зворотних зв'язків визначаються рішенням системи алгебраїчних рівнянь, отриманих шляхом порівнювання коефіцієнтів при однакових ступенях нормованого характеристичного полінома замкненої синтезованої системи й полінома з бажаним розподілом коренів. Модальний регулятор має ряд суттєвих недоліків, таких, як аналоговий характер зв'язків, що знижує надійність системи керування, та необхідність замикання зворотних зв'язків по всіх основних координатах ЕМС, хоча деякі з них

важко вимірювати. Ці недоліки частково усуваються в пристрої-найближчому аналозі.

За найближчий аналог прийнятий нейромережевий регулятор, виконаний у вигляді нейронної мережі (перцептрона), що містить два елементи затримки, три шари нейронів (вхідний, прихований і вихідний) з виконанням на нейронах прихованого шару перетворення вхідних сигналів за допомогою активаційної функції [3]. Нейромережевий регулятор містить 3 вхідних нейрони, 20 нейронів у прихованому шарі і один вихідний нейрон. Усі вони з'єднані між собою зв'язками, характерними для структури нейронних мереж.

Недоліком пристрою-найближчого аналогу є необхідність визначення великої кількості значень вагових коефіцієнтів зв'язку між нейронами (коефіцієнтів ваги), коефіцієнтів зсуву, евристичність вибору кількості нейронів у прихованому шарі, виду активаційної функції, величезна кількість комп'ютерних розрахунків моделі ЕМС із нейромережевим регулятором у процесі навчання нейронної мережі (тобто визначення значень коефіцієнтів

(13) U

(11) 12362

(19) UA

ваги і коефіцієнтів зсуву).

Задача запропонованого пристрою полягає в істотному скороченні часу навчання нейронної мережі, що знижує витрати на розробку нейромережевої системи керування, строго аналітичне визначення значень вагових коефіцієнтів обраної структури, однозначність завдання активаційної функції на вихідному нейроні при одночасному забезпеченні заданих показників регулювання, як це має місце при використанні модального регулятора, однак далеко не завжди досягається при використанні існуючих нейромережевих регуляторів, у тому числі устрою-найближчого аналогу.

Досягнення поставленої задачі проілюстровано на прикладі побудови квазінейрорегулятора для електроприводів машин і механізмів із проковзуванням, що представляють собою двомасову ЕМС із від'ємним в'язким тертям (ВВТ), що є початкове нестійкою та схильною до переходу в режим фрикційних автоколивань.

На Фіг.1 представлена функціональна схема квазінейрорегулятора, на Фіг.2 - структурна алгоритмічна схема двомасової ЕМС із ВВТ із квазінейрорегулятором.

Принцип дії квазінейрорегулятора полягає в наступному. Сигнал про значення вихідної координати об'єкта регулювання (швидкості обертання валу робочого органу) знімається з цифрового оптичного датчика швидкості та подається на блок сигналів керування (БСК), що містить декілька блоків затримки (БЗ), кількість яких на одиницю менша за порядок характеристичного полінома ЕМС. БСК здійснює розподіл існуючого й попередніх (затриманих) значень координат об'єкта регулювання і подає їх, а також сигнал завдання  $U_1$  на відповідні вхідні нейрони (1...m). Сигнали вхідних нейронів надходять на блоки множення, де помножуються на значення коефіцієнтів ваги. На відміну від устрою-найближчий аналогу, коефіцієнти ваги визначаються за допомогою нижчеподаних аналітичних співвідношень, а не в наслідок багато чисельних (від десяти до ста сотень тисяч) розрахунків динамічних процесів системи. Отримані після перемноження значення сигналів передаються безпосередньо на вихідні нейрони (1...n), а не на нейрони прихованого шару, як в устрої-найближчому аналізі. Сигнали з вихідних нейронів перетворюються відповідно до активаційної функції, реалізованої блоком функціонального перетворення, формуючи в такий спосіб сигнал керування  $U_k$ .

Для лінійної системи достатньо одного вхідного нейрону, але в разі нелінійної системи її нелінійність лінеаризується, при чому кількість лінійних ділянок обирається за умовою необхідної точності апроксимації, а кількість нейронів у вихідному шарі

квазінейрорегулятора дорівнює кількості лінійних ділянок. Кожний з вихідних нейронів з'єднаний із логічним блоком (ЛБ), який оцінює розташування робочої точки на тій чи іншій ділянці лінеаризованої характеристики (наприклад, на підставі даних, отриманих комп'ютерною діагностикою), та підключає вхід перетворювача до того з вихідних нейронів, який відповідає аналітичне синтезованим для даної лінійної ділянки значенням коефіцієнтів ваги (Фіг.1).

Структурна алгоритмічна схема об'єкта регулювання (двомасової ЕМС із від'ємним в'язким тертям) (Фіг.2) містить у собі перетворювач (1), електричну й механічну частини електродвигуна (2 і 3), пружний елемент (4), другу масу (робочий орган) (5) і навантаження (6), механічна характеристика якої містить падаючу ділянку.

Структурна алгоритмічна схема квазінейрорегулятора, що відповідає знаходженню ЕМС із ВВТ на якій-небудь одній ділянці механічної характеристики тертя, у рамках якого систему можна розглядати як лінійну (Фіг.2), містить 3 блоки затримки, 5 вхідних нейронів і один вихідний нейрон з активаційною функцією. У запропонованій структурі необхідно аналітично розрахувати лише 5 значень вагових коефіцієнтів, при цьому коефіцієнти зсуву приймаються рівними нулю.

Аналітичні співвідношення для розрахунку вагових коефіцієнтів квазінейрорегулятора, що, використовуючи інформацію всього лише про одну координату нестійкої двомасової ЕМС, забезпечує в ній необхідний динамічний режим по вільній складовій, отримують у такий спосіб. Математичну модель ЕМС із фізичними координатами (швидкість обертання валу робочого органу, двигуна, пружний момент та момент двигуна) перетворюють на модель у канонічній формі фазової змінної (КФФЗ) (у канонічній формі керованості) [4] із однією фізичною координатою, вихідною - швидкістю обертання валу робочого органу. Решта координат є абстрактними - це кілька перших похідних вихідної координати, при чому їх кількість на одиницю менша за порядок об'єкта. Для моделі в КФФЗ синтезують модальний регулятор.

Коефіцієнти модального зворотного зв'язку  $K_0, K_1, K_2, K_3$  дорівнюють коефіцієнтам передавальної функції зворотного зв'язку  $W_{33}$  по вихідній координаті ЕМС

$$W_{33}(p) = K_3 p^3 + K_2 p^2 + K_1 p + K_0, \quad (1)$$

де  $p$  - оператор диференціювання.

Далі здійснюється перехід від операції диференціювання до кінцевих різниць згідно зі співвідношеннями, які виконуються при малому інтервалі дискретизації  $\Delta t$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t_1} &\approx \frac{\nabla_1}{\Delta t} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta t}; \\ \left. \frac{dy^2}{dt^2} \right|_{t_1} &\approx \frac{\nabla_1^2}{(\Delta t)^2} = \frac{\nabla_1 - \nabla_2}{(\Delta t)^2} = \frac{(y_1 - y_2) - (y_2 - y_3)}{(\Delta t)^2} = \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{(\Delta t)^2}; \\ \left. \frac{dy^3}{dt^3} \right|_{t_1} &\approx \frac{\nabla_1^3}{(\Delta t)^3} = \frac{\nabla_1^2 - \nabla_2^2}{(\Delta t)^3} = \frac{(y_1 - 2y_2 + y_3) - (y_2 - 2y_3 + y_4)}{(\Delta t)^3} = \frac{y_1 - 3y_2 + 3y_3 - y_4}{(\Delta t)^3}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\nabla_1, \nabla_1^2, \nabla_1^3$  - кінцеві різниці 1-го, 2-го й 3-го порядку в момент часу  $t_1$ ;

$u_1, u_2, u_3, u_4$  - значення будь-якої координати ЕМС  $y(t)$  у дискретні моменти часу  $t_1, t_2, t_3, t_4$ , які відрізняються на величину  $\Delta t$ .

Вважаючи  $y(t)$  вихідною координатою ЕМС  $y(t) = \omega_2(t)$ , отримаємо вираз для сигналу керування

$$\begin{aligned} U_K(t) &= K_3 \frac{d^3 \omega_2(t)}{dt^3} + K_2 \frac{d^2 \omega_2(t)}{dt^2} + K_1 \frac{d \omega_2(t)}{dt} + K_0 \omega_2(t) \approx \\ &\approx K_3 \frac{U_2 - 3U_3 + 3U_4 - U_5}{(\Delta t)^3} + K_2 \frac{U_2 - 2U_3 + U_4}{(\Delta t)^2} + K_1 \frac{U_2 - U_3}{\Delta t} + K_0 U_2 = \\ &= \left( K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3} + K_2 \frac{1}{(\Delta t)^2} K_3 \frac{1}{\Delta t} + K_0 \right) U_2 + \left( -3K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3} - 2K_2 \frac{1}{(\Delta t)^2} - K_1 \frac{1}{\Delta t} \right) U_3 + \\ &+ \left( 3K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3} + K_2 \frac{1}{(\Delta t)^2} \right) U_4 + \left( -K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3} \right) U_5 = -W_2 U_2 - W_3 U_3 - W_4 U_4 - W_5 U_5. \end{aligned}$$

Таким чином, коефіцієнти ваги дорівнюють

$$W_2 = - \left( K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3} + K_2 \frac{1}{(\Delta t)^2} + K_1 \frac{1}{\Delta t} + K_0 \right),$$

$$W_3 = 3K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3} + 2K_2 \frac{1}{(\Delta t)^2} + K_1 \frac{1}{\Delta t},$$

$$W_4 = - \left( 3K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3} + K_2 \frac{1}{(\Delta t)^2} \right),$$

$$W_5 = K_3 \frac{1}{(\Delta t)^3}.$$

Активаційна функція вихідного нейрону, відповідно до якої здійснюється функціональне перетворення сигналу керування, вибирається лінійною з обмеженням, що накладається вимогами до динаміки ЕМС (наприклад, обмеження по максимальному прискоренню електропривода). Можливо також застосування нелінійних активаційних функцій, таких, як трансгіпериабольна й тангенціальна функції або гіперболічний тангенс. Достоїнством вищевказаних нелінійних функцій у порівнянні з лінійною з обмеженням є їхня гладкість, тобто безперервність першої похідної, що приводить до відсутності стрибків у перехідному процесі першої похідної вихідної координати. Необхідною вимогою, пропонованою до виду активаційної функції, є

$U_K$

$$U_K(p) = W_{33}(p) \cdot \omega_2(p) = (K_3 p^3 + K_2 p^2 + K_1 p + K_0) \cdot \omega_2(p), \quad (3)$$

Враховуючи, що  $u_1, u_2, u_3, u_4$  в (2) - це сигнали  $U_2, U_3, U_4, U_5$  (див. Фіг.2), (3) з рахунком (2) прийме вигляд

одиничний коефіцієнт підсилення в околиці початку координат, тому що тільки в цьому випадку квазінейрорегулятор забезпечує необхідні показники якості регулювання.

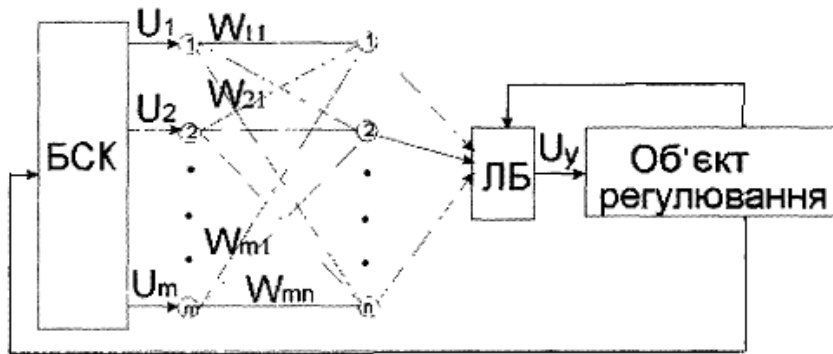
Джерела інформації:

1. Акимов Л.В., Клепиков А.В., Клепиков В.Б. Синтез системы модального управления упругим электромеханическим объектом с нагрузкой типа пара трения // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. - Харьков: Основа - 1996. - С.51-58.

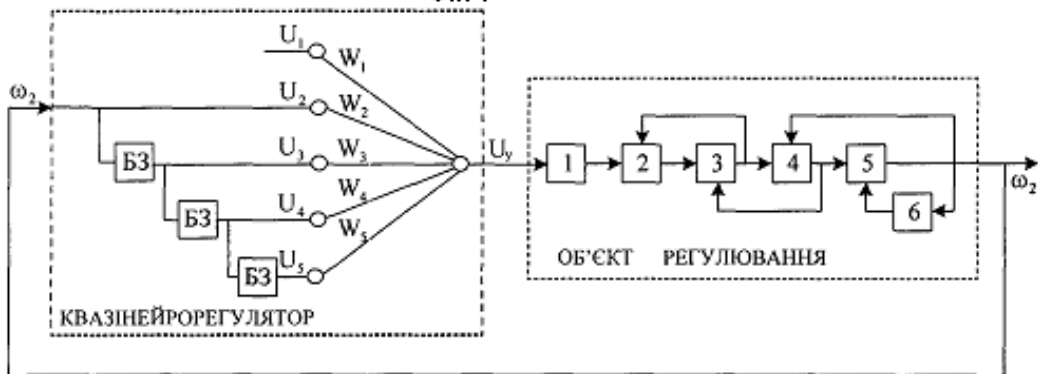
2. Автоматизированные системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния / Л.В. Акимов и др. / Под ред. В.Б. Клепикова, Л.В. Акимова. - Харьков: ХГПУ, 1997. - 90с.

3. Клепиков В.Б., Махотило К.В., Обруч И.В. Синтез нейросетевой системы управления одно-массовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при ограничении координат электропривода // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции...] / Под общей ред. В.Б. Клепикова, Л.В. Акимова. - Харьков: Основа - 1997. - С.19-21.

4. Системы управления электроприводами: Учеб. пособие / А.П. Голубь, Б.И. Кузнецов. И.А. Опришко, В.П. Соляник. - К.: УМК ВО, 1992. - 376с.



Фиг. 1



Фиг. 2