

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ CHO HỆ NHIỀU ĐỘNG CƠ BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN CUỐN CHIẾU

BUILDING A SPEED CONTROLLER FOR MULTI-MOTOR SYSTEMS BY BACKSTEPPING METHOD

Trần Xuân Tình^{1*}, Đặng Tiến Trung², Lê Văn Sâm¹, Nguyễn Ngọc Tuấn³

¹Học viện Phòng không - Không quân, ²Trường Đại học Điện lực, ³Học viện Kỹ thuật quân sự

Ngày nhận bài: 19/07/2020, Ngày chấp nhận đăng: 16/03/2021, Phản biện: PGS.TS. Nguyễn Quang Hoan

Tóm tắt:

Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển cuộn chiếu (backstepping) cho vòng tốc độ của hệ truyền động nhiều động cơ. Các kết quả được khảo sát đánh giá bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển này đảm bảo được các yêu cầu chất lượng ngay cả khi hệ thống chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến do cấu trúc phần cơ gây ra.

Từ khóa:

Nhiều động cơ, điều khiển cuộn chiếu, ma sát, đàn hồi.

Abstract:

The paper presents the results of summarizing the backstepping controller for the speed loops of the multi-motor drive. The results surveyed and evaluated by simulation on Matlab-Simulink software show that the controller ensures the quality requirements in the system under the influence of nonlinear factors as causing the mechanical structure

Keywords:

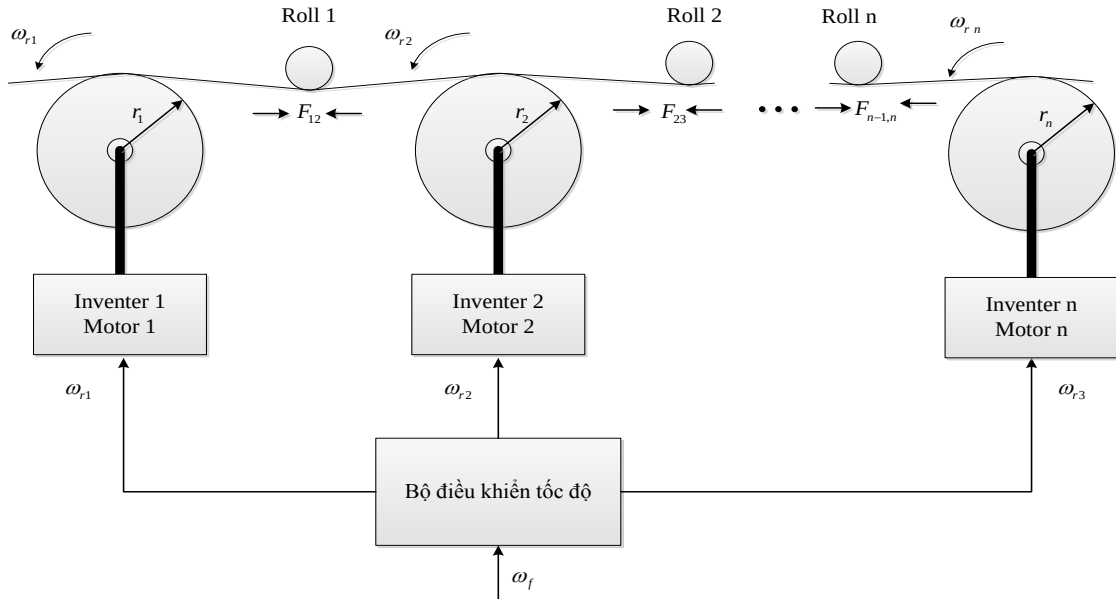
Multi-motor drive systems, backstepping controller, elastic, backlash.

1. MỞ ĐẦU

Hệ truyền động (HTĐ) nhiều động cơ ứng dụng trong công nghiệp và quốc phòng đều là hệ động lực học phi tuyến, chứa các liên hệ chéo; các mối liên hệ này làm cho mô hình của đối tượng điều khiển trở nên phi tuyến. Trong điều khiển HTĐ vật liệu đàn hồi nhiều động cơ, việc kiểm soát tốc độ các động cơ là một vấn đề khó. Các bộ điều khiển (BĐK) tốc độ cho HTĐ này

liên tục được nghiên cứu phát triển cả trong và ngoài nước, từ đơn giản như BĐK PID [3] đến phức tạp như logic mờ [4], mạng nơron [5], điều khiển tối ưu [6], và điều khiển bền vững [7]. Tuy nhiên vẫn cần thêm những nghiên cứu nhằm làm phong phú thêm các thuật toán điều khiển cho hệ. BĐK điều khiển cuộn chiếu mà tác giả đề xuất đã cho chất lượng tốt ngay cả khi tính đến yếu tố phi tuyến hệ số đàn hồi thay đổi.

2. MÔ HÌNH CƠ HỆ



Hình 1. Mô hình hệ truyền động nhiều động cơ

Theo [1-2] mô hình toán hệ truyền động một động cơ không đồng bộ trong dây chuyền sản xuất có dạng:

$$\begin{cases} \omega_f = k_f \cdot u_s \\ \dot{\omega}_T = \frac{1}{K_T} \cdot k_c (\varphi_r - \varphi_T) \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{J_d} (M_d - M_s) \\ M_d = \frac{3}{2} n_p \frac{L_m^2}{L_r} \psi_{rd} i_{sq} \\ i_{sq} = \frac{T_r}{L_m} \psi_{rd} (\omega_f - \omega_r) \\ y = \omega_T \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: $\omega_f = k_f u_s$: tốc độ đặt do vòng ngoài đưa vào. M_s : mômen đàn hồi; M_T : mômen tải; M_d : mômen động cơ; n_p : số đôi cực của động cơ; L_m : hồ cảm giữa rôto và stato; L_r : diện cảm rôto; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$:

hằng số thời gian rôto; ψ_{rd} : từ thông rôto;

i_{sq} : dòng stato. $K_T = \frac{J_L \omega_{rm}}{k_i^2 M_{dm}}$: hằng số thời

gian của tải; $k_c = \frac{c \omega_{rm}}{k_i^2 M_{dm}}$: hệ số đàn hồi; c :

hệ số đàn hồi; ω_{rm} : tốc độ định mức của động cơ; M_{dm} : mômen định mức; k_i : hệ số truyền của hộp số.

$$M_d = \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2 (\omega_f - \omega_r) \quad (2)$$

Với

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_r &= \frac{1}{J_d} (M_d - M_s) \\ &= \frac{1}{J_d} \cdot \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2 (\omega_f - \omega_r) - \frac{1}{J_d} k_c (\varphi_r - \varphi_T) \\ &= -\frac{1}{J_d} \cdot \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2 \omega_r + \\ &\quad + \frac{1}{J_d} \cdot \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2 k_f u_s - \frac{1}{J_d} k_c (\varphi_r - \varphi_T) \end{aligned}$$

Đặt $x_1 = \omega_T$; $x_2 = \varphi_r - \varphi_T$; $x_3 = \omega_r - \omega_T$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{k_c}{K_T} x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -\left(\frac{k_c}{J_d} + \frac{k_c}{K_T}\right) x_2 - \frac{1}{J_d} \cdot \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2 (x_1 + x_3) \\ \quad + \frac{1}{J_d} \cdot \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2 k_f u_s \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

Đặt

$$\gamma_1 = \frac{k_c}{J_d}; \gamma_2 = \frac{k_c}{K_T}; \chi_1 = \frac{1}{J_d} \cdot \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2; \quad (4)$$

$$\chi_2 = \frac{1}{J_d} \cdot \frac{3}{2} n_p \frac{L_m T_r}{L_r} \psi_{rd}^2 k_f$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \gamma_2 x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -(\gamma_1 + \gamma_2) x_2 - \chi_1 (x_1 + x_3) + \chi_2 u_s \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

Tổng hợp bộ điều khiển cuộn chiếu cho vòng điều khiển tốc độ:

Bước 1:

Do tốc độ của tải ở đầu ra không đo được trực tiếp khi tính đến biến dạng đàn hồi nên gọi giá trị tiệm cận với tín hiệu đầu ra là y_r , sai số z_1 được tính như sau:

$$z_1 = y - y_r = x_1 - y_r$$

Vì $\dot{y}_r = 0$ nên ta có: $\dot{z}_1 = \gamma_2 x_2$. Do γ_2 là tham số không đo được nên gọi giá trị đánh giá là $\hat{\gamma}_2$ và sai số đánh giá là $\xi_2 = \gamma_2 - \hat{\gamma}_2$ hay $\gamma_2 = \xi_2 + \hat{\gamma}_2$. Chọn hàm Lyapunov cho z_1 là:

$$V_1 = \frac{1}{2\gamma_2} z_1^2 + \frac{1}{2B} \xi_2^2 \quad (6)$$

Đạo hàm V_1 ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{1}{\gamma_2} z_1 \dot{z}_1 + \frac{1}{B} \xi_2 \dot{\xi}_2 \\ &= \frac{1}{\gamma_2} z_1 (\gamma_2 x_2) + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \\ &= z_1 x_2 + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \end{aligned} \quad (7)$$

Do $z_2 = x_2 - \alpha_1$ hay $x_2 = z_2 + \alpha_1$ với α_1 là biến điều khiển ảo. Thay vào trên ta có:

$$\dot{V}_1 = z_1 x_2 + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) = z_1 (z_2 + \alpha_1) + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \quad (8)$$

Chọn $\alpha_1 = -d_1 z_1$ với $d_1 > 0$ rồi thế vào trên ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 (z_2 + \alpha_1) + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \\ &= z_1 (z_2 - d_1 z_1) + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \\ &= -d_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \end{aligned} \quad (9)$$

Bước 2:

Chọn $V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2$. Tính đạo hàm của V_2 ta có:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -d_1 z_1^2 + (z_1 + \dot{z}_2) z_2 + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \quad (10)$$

Ta có: $\dot{\alpha}_1 = -d_1 \gamma_2 x_2$; $\dot{z}_2 = x_3 + d_1 \gamma_2 x_2$ thế vào phương trình trên có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -d_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 (x_3 + d_1 \gamma_2 x_2) + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \\ \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -d_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \\ &\quad + z_2 [x_3 + d_1 (\xi_2 + \gamma_2) x_2] + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -d_1 z_1^2 + z_1 z_2 \\ &\quad + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) + d_1 z_2 \xi_2 x_2 + z_2 (x_3 + d_1 \hat{\gamma}_2 x_2)\end{aligned}$$

Đặt $z_3 = x_3 - \alpha_2$ hay $x_3 = z_3 + \alpha_2$ thế vào phương trình trên ta có:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= -d_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \\ &\quad + d_1 z_2 \xi_2 x_2 + z_2 (z_3 + \alpha_2 + d_1 \hat{\gamma}_2 x_2)\end{aligned}\quad (11)$$

Lựa chọn: $\alpha_2 = -c_2 z_2 - z_1 - c_1 \hat{\gamma}_2 x_2$ với $c_2 > 0$ thay vào phương trình trên ta có:

$$\dot{V}_2 = -d_1 z_1^2 - d_2 z_2^2 + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) + d_1 z_2 \xi_2 x_2 \quad (12)$$

Bước 3:

Tham số không xác định γ_1 được đánh giá bằng $\hat{\gamma}_1$ với sai số đánh giá ξ_1 do đó:

$$\gamma_1 = \hat{\gamma}_1 + \xi_1$$

Xác định hàm Lyapunov V_3 là:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2G} \xi_1^2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 + \frac{1}{G} \xi_1 \dot{\xi}_1 = \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 + \frac{1}{G} \xi_1 (-\dot{\gamma}_1) \\ \dot{V}_3 &= -d_1 z_1^2 - d_2 z_2^2 + z_3 (z_2 + \dot{z}_3) \\ &\quad + d_1 z_2 \xi_2 x_2 + \frac{1}{G} \xi_1 (-\dot{\gamma}_1) + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2)\end{aligned}\quad (14)$$

Tính $z_2 + \dot{z}_3$:

$$\begin{aligned}z_2 + \dot{z}_3 &= z_2 + \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 (x_1, y_r, \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, x_2) \\ &= z_2 - (\gamma_1 + \gamma_2) x_2 - \chi_1 (x_1 + x_3) \\ &\quad + \chi_2 u_s - \dot{\alpha}_2 (x_1, y_r, \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, x_2)\end{aligned}\quad (15)$$

Với α_2 được tính:

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= -d_2 z_2 - z_1 - d_1 \hat{\gamma}_2 x_2 \\ &= -d_2 (x_2 - \alpha_1) - (x_1 - y_r) - d_1 \hat{\gamma}_2 x_2 \\ &= -d_2 x_2 - d_1 d_2 x_1 + d_1 d_2 y_r - x_1 + y_r - d_1 \hat{\gamma}_2 x_2\end{aligned}\quad (16)$$

Tiến hành tính đạo hàm riêng của α_2 lần lượt theo $x_1, x_2, y_r, \hat{\gamma}_2$ có:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} &= -d_1 d_2 - 1; \quad \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} = -d_2 - d_1 \hat{\gamma}_2; \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial y_r} &= 0; \quad \frac{\partial \alpha_2}{\partial \hat{\gamma}_2} = -d_1 x_2\end{aligned}$$

Thế vào phương trình $z_2 + \dot{z}_3$ ta có:

$$\begin{aligned}z_2 + \dot{z}_3 &= z_2 - \xi_1 x_2 - \hat{\gamma}_1 x_2 - \xi_2 x_2 - \hat{\gamma}_2 x_2 - \chi_1 (x_3 + x_1) \\ &\quad + \chi_2 u_s + d_1 d_2 + 1 + d_2 + d_1 \hat{\gamma}_2 + d_1 x_2\end{aligned}\quad (17)$$

Chọn thành phần:

$$\begin{aligned}u_s &= \frac{1}{\chi_2} \left\{ -d_3 z_3 - \left[z_2 - \hat{\gamma}_1 x_2 - \hat{\gamma}_2 x_2 - \chi_1 (x_3 + x_1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + d_1 d_2 + 1 + d_2 + d_1 \hat{\gamma}_2 + d_1 x_2 \right] \right\}\end{aligned}\quad (18)$$

Từ đó có:

$$z_2 + \dot{z}_3 = -c_3 z_3 - \xi_1 x_2 - \xi_2 x_2 \text{ thay vào } \dot{V}_3 \text{ ta có:}$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_3 &= -d_1 z_1^2 - d_2 z_2^2 + z_3 (-c_3 z_3 - \xi_1 x_2 - \xi_2 x_2) \\ &\quad + d_1 z_2 \xi_2 x_2 + \frac{1}{G} \xi_1 (-\dot{\gamma}_1) + \frac{1}{B} \xi_2 (-\dot{\gamma}_2) \\ &= -d_1 z_1^2 - d_2 z_2^2 - d_3 z_3^2 - \xi_1 \left(z_3 x_2 + \frac{1}{G} \dot{\gamma}_1 \right) \\ &\quad - \xi_2 \left(z_3 x_2 - d_1 z_2 x_2 + \frac{1}{B} \dot{\gamma}_2 \right)\end{aligned}\quad (19)$$

Chọn $\dot{\gamma}_1 = -G z_3 x_2$; $\dot{\gamma}_2 = -B z_3 x_2 + d_1 z_2 x_2$ khi đó ta có:

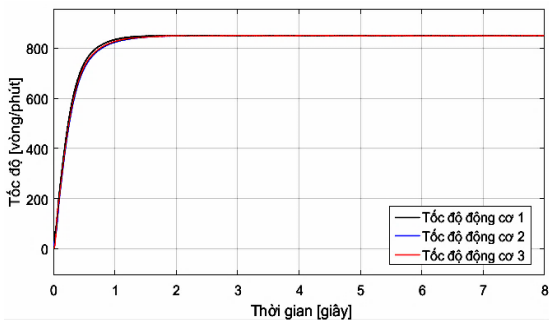
$$\dot{V}_3 = -d_1 z_1^2 - d_2 z_2^2 - d_3 z_3^2$$

Như vậy sẽ bảo đảm cho $\dot{V}_3 < 0$ nếu như $d_1, d_2, d_3 > 0$. Chọn B, G là hệ số khuếch đại của luật cập nhật, d_1, d_2, d_3 là hệ số khuếch đại của bộ điều khiển, ta có u_s là tín hiệu điều khiển tốc độ cho động cơ ở vòng trong.

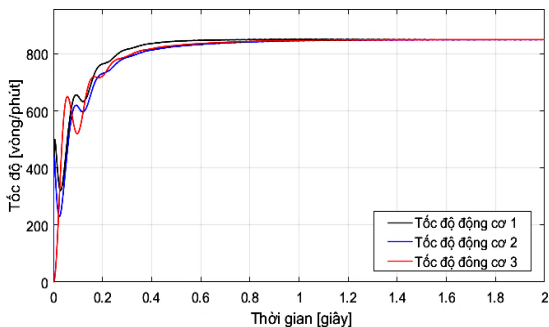
3. MÔ PHỎNG

Trong cấu trúc trên, bài báo đã xây dựng bộ điều khiển tốc độ cho các động cơ ở vòng trong, lực căng vòng ngoài dùng bộ điều khiển PID, vòng dòng điện đã được xử lý bởi biến tần. Trước hết tính toán các tham số của hệ truyền động dùng động cơ không đồng bộ ba pha. Xét ba động cơ ba pha roto lồng sóc của hãng Siemens có các tham số giống nhau: Công suất $P_{dm} = 4 \text{ kW}$; $L_m = 0,1958 \text{ (H)}$; $L_s = 0,202 \text{ (H)}$; $L_r = 0,2065$; $R_r = 1,275 \text{ (}\Omega\text{)}$; $R_s = 1,663 \text{ (}\Omega\text{)}$; $p = 2$; $n_{dm} = 1400 \text{ v/p}$; $J_M = 7,47 \cdot 10^{-5} \text{ Kg m}^2$; $J_L = 8,258 \cdot 10^{-5} \text{ Kg m}^2$.

Trường hợp 1: Khi tải không đổi hệ số đàn hồi thay đổi.

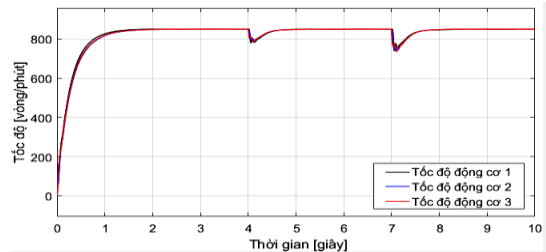


Hình 2. Đáp ứng tốc độ
với hệ số đàn hồi $c=320 \text{ Nm/rad}$

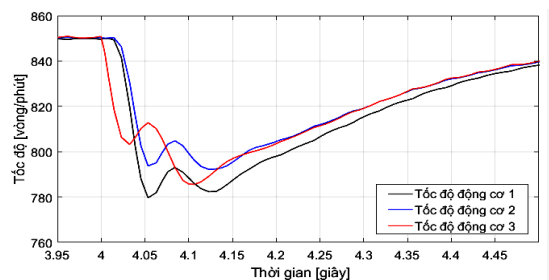


Hình 3. Đáp ứng tốc độ
với hệ số đàn hồi $c=120 \text{ Nm/rad}$

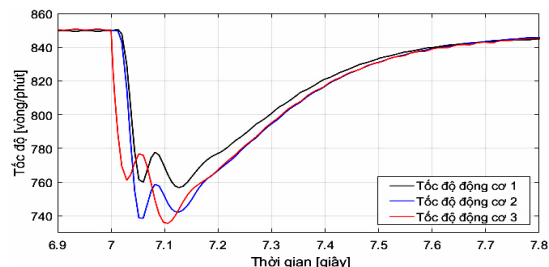
Trường hợp 2: Khi tải thay đổi nhảy bậc tại thời điểm 4s và 7s, hệ số đàn hồi thay đổi.



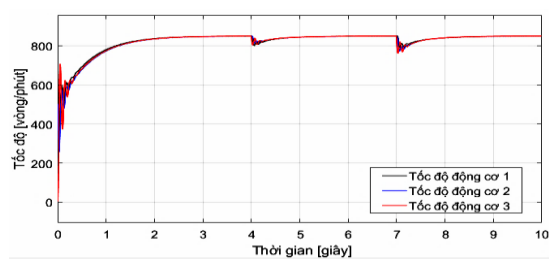
Hình 4. Đáp ứng tốc độ
với hệ số đàn hồi $c=320 \text{ Nm/rad}$



Hình 5. Đáp ứng tốc độ
với hệ số đàn hồi $c=320 \text{ Nm/rad}$ tại thời điểm 4s



Hình 6. Đáp ứng tốc độ
với hệ số đàn hồi $c=320 \text{ Nm/rad}$ tại thời điểm 7s



Hình 7. Đáp ứng tốc độ
với hệ số đàn hồi $c=120 \text{ Nm/rad}$

Nhân xét:

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng bộ điều khiển tốc độ cuộn chiều cho chất lượng điều khiển tốt. Trong điều kiện chịu ảnh hưởng của yếu tố phi tuyến hệ số đàn hồi thay đổi, mômen tải thay đổi, hệ thống vẫn đảm bảo được độ chính xác trong cả chế độ động và chế độ tĩnh, sai số trong chế độ tĩnh luôn về 0 trong các trường hợp khác nhau.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp BĐK tốc độ bằng phương pháp điều khiển cuộn chiều cho hệ cơ điện nhiều động cơ

có liên hệ ma sát, đàn hồi. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình cơ hệ, tìm luật điều khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua kiểm tra cho thấy BDK tốc độ đã nâng cao được chất lượng của hệ thống truyền động nhiều động cơ thông qua các tiêu chí đánh giá, đó là: tính bền vững với nhiễu, đảm bảo khả năng đồng tốc của các động cơ, đảm bảo tính chính xác bám. Kết quả nghiên cứu này là tiền đề để nhóm tác giả phát triển bộ điều khiển lực căng cho các dây chuyền sản xuất công nghiệp có chứa băng tải đàn hồi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Dao Phuong Nam, Pham Tuan Thanh, Tran Xuan Tinh, Tran Thanh Dat, Pham Van Tu, "High-Gain Observer based Output feedback Controller for a Two-Motor Drive System: A Separation Principle Approach", Lecture Note in Electrical Engineering 465, Scopus Q3, Dec-2017.
- [2] Pham Tam Thanh, Dao Phuong Nam, Tran Xuan Tinh and Luong Cong Nho, "High-Gain Observer-Based Sliding Mode Control of Multimotor Drive Systems", Book Adaptive Robust Control Systems, Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia 2018.
- [3] B. Allaoua , A. Laoufi and B. Gasbaoui, "Multi-Drive Paper System Control Based on Multi-Input Multi-Output PID Controller", Leonardo Journal of Sciences, 2010.
- [4] Fawzan Salem, E.H.E. Bayoumi, "Robust fuzzy-PID control of three-motor drive system using simulated annealing optimization", Journal of Electrical Engineering, 2011.
- [5] Li Jinmei, Liu Xingqiao, "Application of an Adaptive Controller with a Single Neuron in Control of Multi-motor Synchronous System", IEEE, 2008.
- [6] A. Angermann, M. Aicher, and D. Schroder, "Time-optimal tension control for processing plants with continuous moving webs", Proc. 35th Annual Meeting- IEEE Industry Applications Society, Rome, Oct. 1999.
- [7] H. Koc, D. Knittel, M. D. Mathelin, "Robust gain-scheduled control of winding systems", IEEE Conf. Decision and Control, Sidney, Australia, Dec. 2000.

Giới thiệu tác giả:

Tác giả Trần Xuân Tình tốt nghiệp đại học chuyên ngành điện tử, nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành tự động hóa, bảo vệ luận án Tiến sĩ năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật quân sự. Tác giả hiện là giảng viên Bộ môn Kỹ thuật điện – Học viện Phòng không – Không quân.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ truyền động điện.



Tác giả Đặng Tiến Trung nhận bằng tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư điện - tự động hóa tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, bảo vệ luận án Tiến sĩ năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật quân sự. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.



Tác giả Lê Văn Sâm tốt nghiệp đại học chuyên ngành điện tử, nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành tự động hóa, bằng Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điều khiển và tự động hóa 2019 tại Viện Kỹ thuật và Công nghệ quân sự. Tác giả hiện là giảng viên Bộ môn Kỹ thuật điện - Học viện Phòng không - Không quân.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong điều khiển thiết bị bay.



Tác giả Nguyễn Ngọc Tuấn tốt nghiệp đại học chuyên ngành tự động hóa tại Học viện Kỹ thuật quân sự năm 2006, bảo vệ luận án Tiến sĩ tại Trường Đại học Tổng hợp vô tuyến điện tử Ryazan, Liên bang Nga năm 2014. Tác giả hiện là giảng viên Bộ môn Kỹ thuật điện, Khoa Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự.

Lĩnh vực nghiên cứu: thiết kế các bộ điều khiển trong hệ truyền động điện, nghiên cứu phát triển các phương pháp điều khiển hiện đại.