

ĐIỀU KHIỂN PHÂN TÁN CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG NHIỀU ĐỘNG CƠ TRÊN CƠ SỞ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT FTSM VÀ BỘ QUAN SÁT HGO

DISTRIBUTED CONTROL FOR MULTI-MOTOR DRIVES
BASED ON FTSM SLIDING MODE CONTROL AND HGO OBSERVER

Trần Xuân Tình^{1,*}, Phạm Tuấn Thành²,
Trần Văn Tuyên², Nguyễn Tuấn Anh¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.160>

TÓM TẮT

Hệ truyền động băng vật liệu nhiều động cơ là hệ phi tuyến, nhiều đầu vào, đầu ra. Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ quan sát HGO và bộ điều khiển trượt cho hệ lô dẫn động của hệ truyền động quấn băng vật liệu đàn hồi. 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 của hệ trong việc giữ được lực căng và duy trì tốc độ dài của băng vật liệu.

Từ khóa: Hệ truyền động nhiều động cơ, điều khiển trượt đầu cuối nhanh, bộ quan sát.

ABSTRACT

The multi-motor material belt drive system is a nonlinear system with multiple inputs and outputs. This article presents the results of synthesizing the HGO observer and sliding controller for the drive system of an elastic material tape-wrapped drive system. The results evaluated by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures the quality requirements of the system in maintaining tension and maintaining the length of the material belt.

Keywords: Multi-motor drive system, fast terminal sliding controller, observer.

¹Học viện Phòng không - Không quân

²Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: tinhpk79@gmail.com

Ngày nhận bài: 01/8/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 21/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2023

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ truyền động (HTĐ) nhiều động cơ vận chuyển băng vật liệu đàn hồi là hệ phi tuyến, phức tạp có nhiều đầu vào và đầu ra. Bộ điều khiển (BĐK) cho HTĐ này đã được nhiều nhà khoa học quan tâm phát triển như: BĐK mờ [1, 2]; điều khiển bền vững [3]; điều khiển thích nghi [4]; điều khiển trượt [5], và điều khiển bù thích nghi dùng mạng nơ ron [6]. HTĐ này có yêu cầu công nghệ là đồng tốc độ dài từ đầu đến

cuối dây chuyền, đồng thời sức căng của băng vật liệu cần được giữ không đổi giữa các lô của dây chuyền. Để đảm bảo đồng tốc độ và giữ sức căng không đổi, dây chuyền sẽ có một lượng đặt tốc độ chung, khi mất đồng bộ tốc độ dài giữa các lô, sức căng trên băng vật liệu giữa các lô thay đổi, lúc này có mạch vòng điều chỉnh sức căng giữa các lô có tác dụng hiệu chỉnh lượng đặt tốc độ các lô để đưa hệ về đồng bộ tốc độ. Để cải thiện năng suất, chất lượng và phương pháp điều khiển, bài báo đề xuất phương pháp điều khiển phân tán, sử dụng bộ điều khiển trượt đầu cuối nhanh FTSM trên cơ sở bộ quan sát lực căng HGO. Điều khiển phân tán cho từng lô giúp bộ điều khiển đơn giản hơn; điều khiển trượt FTSM bền vững với nhiễu, có thời gian hội tụ nhanh giúp nâng cao hiệu quả điều khiển.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH CƠ HỆ

Xét mô hình hệ có N động cơ truyền động cho N lô, trong đó lô đầu là lô tháo cuộn, lô cuối là lô cuộn lại, lô thứ 2 là lô Master đặt tốc độ dài cho toàn hệ, từ lô thứ 3 đến lô N-1 là lô dẫn như trong hình 1. Xét phương trình động học của lô dẫn thứ k.

Xây dựng phương trình lực căng giữa lô dẫn thứ k và k-1 có:

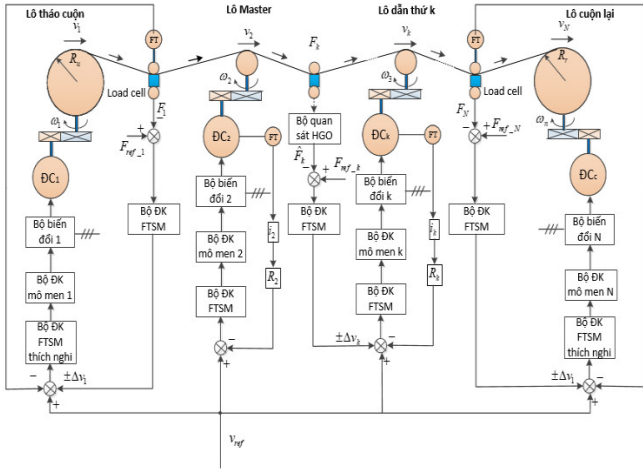
Do băng vật liệu có đặc tính biến dạng tuyến tính trong vùng biến dạng đàn hồi nên có thể áp dụng được định luật Hooke cho biến dạng vật liệu, định luật Coulomb để xác định sự tương tác lẫn nhau giữa lô và băng vật liệu tạo nên ma sát trong quá trình dịch chuyển, định luật bảo toàn khối lượng để xét sự thay đổi về lực căng và biến dạng của bản thân vật liệu trong quá trình di chuyển.

- Theo định luật Hooke lực căng của dải băng vật liệu tỉ lệ với độ biến dạng của vật liệu

$$F = E S \epsilon = E S \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1)$$

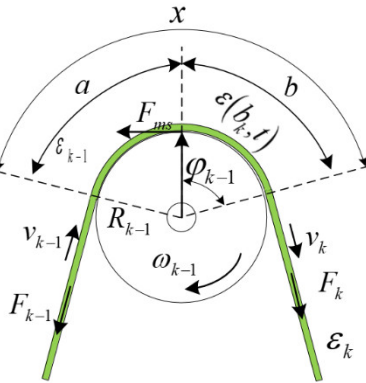
Trong đó: F(N) là lực căng xuất hiện trên đoạn vật liệu, E (N/m²) là hệ số đàn hồi, S (N/m²) là diện tích mặt cắt ngang,

ϵ là độ biến dạng dài tương đối, L (m) là chiều dài sau biến dạng, L_0 (m) chiều dài đoạn vật liệu trước biến dạng.



Hình 1. Mô hình truyền động bằng vật liệu đàn hồi N động cơ

- Theo định luật Coulomb, ứng suất kéo căng giữa hai lô phụ thuộc vào ma sát giữa băng vật liệu và cung tiếp xúc với lô. Xét sự biến đổi lực căng tại cung tiếp xúc giữa băng vật liệu và lô thứ $k-1$ như trên hình 2.



Hình 2. Mô hình tính lực căng theo định luật Coulomb

Trên toàn bộ chiều dài cung tiếp xúc x chia thành 2 cung a_{k-1} và cung b_{k-1} , lực căng của dải băng là không đổi trên vùng dính (chiều dài cung a_{k-1}) và thay đổi trên vùng trượt (chiều dài cung b_{k-1}), v_{k-1} , v_k lần lượt là tốc độ dài của lô cuộn thứ $k-1$ và thứ k . Đối với các lô dẫn, vì bán kính của lô không đổi, lực căng ban đầu của băng vật liệu đã được điều chỉnh gần bằng giá trị đặt, tốc độ vận chuyển không lớn vì vậy có thể coi chiều dài cung ôm của băng vật liệu với lô không thay đổi trong quá trình làm việc. Chiều dài cung b_{k-1} được tính:

$$b_{k-1} = \frac{\pi R_{k-1} \varphi_{k-1}}{180} \quad (2)$$

Độ biến dạng của vật liệu từ điểm tiếp xúc đầu tiên đến điểm tiếp xúc cuối cùng của băng vật liệu với lô được cho bởi:

$$\epsilon(x, t) = \begin{cases} \epsilon_{k-1}(t) & \text{khi } x \leq a_{k-1} \\ \epsilon_{k-1}(t) e^{\mu(x-a_{k-1})} & \text{khi } a_{k-1} \leq x \leq a_{k-1} + b_{k-1} \\ \epsilon_k(t) & \text{khi } a_{k-1} + b_{k-1} \leq x \leq L_t \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, μ là hệ số ma sát; $L_t = a_{k-1} + b_{k-1} + L_k$, L_k là khoảng cách giữa hai lô thứ $k-1$ và lô thứ k . Theo [4] có:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{b_{k-1}}{1 + \epsilon(b_{k-1}, t)} \right) = \frac{v_{k-1}}{1 + \epsilon_{k-1}} - \frac{v_k}{1 + \epsilon_k} \quad (4)$$

Vì $\epsilon_{k-1} \ll 1$ và $\epsilon_k \ll 1$; $\epsilon(b_{k-1}, t) \approx \epsilon_k$

$$\text{nên có: } \frac{1}{1 + \epsilon_{k-1}} \approx 1 - \epsilon_{k-1}; \quad \frac{1}{1 + \epsilon_k} \approx 1 - \epsilon_k;$$

$$\frac{b_{k-1}}{1 + \epsilon(b_{k-1}, t)} \approx b_{k-1} (1 - \epsilon_k)$$

Do đó từ (4) có phương trình lực căng:

$$\Leftrightarrow \dot{F}_k = \frac{ES}{b_{k-1}} (v_k - v_{k-1}) + \frac{1}{b_{k-1}} v_{k-1} F_{k-1} - \frac{1}{b_{k-1}} v_k F_k \quad (5)$$

Theo [1] có phương trình tốc độ dài lô dẫn thứ k :

$$\dot{v}_k = -\frac{B_k}{J_k} v_k + \frac{R_k}{J_k} M_k + \frac{R_k^2}{J_k} (F_{k+1} - F_k) \quad (6)$$

Ở đây, M_{k-1} , M_k là mô men động cơ của lô dẫn thứ $k-1$ và thứ k ; ω_{k-1} , ω_k là tốc độ góc trục lô dẫn; F_k là lực căng của dải vật liệu; v_k là tốc độ dài của dải vật liệu chạy qua. Với lô dẫn thứ k có hai lực căng F_k , F_{k+1} tác động nên hệ phương trình trạng thái của hệ lô dẫn thứ k như sau:

$$\begin{cases} \dot{F}_k = \frac{ES}{b_{k-1}} v_k - \frac{ES}{b_{k-1}} v_{k-1} + \frac{1}{b_{k-1}} F_{k-1} v_{k-1} - \frac{1}{b_{k-1}} F_k v_k \\ \dot{v}_k = -\frac{B_k}{J_k} v_k + \frac{R_k}{J_k} M_k + \frac{R_k^2}{J_k} (F_{k+1} - F_k) \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó: B_k là hệ số ma sát nhớt; M_k , ω_k lần lượt là mô men, tốc độ góc của rulo thứ k ; $J_k = i_k^2 \cdot J_{0mk} + J_{0k}$; J_{0k} là mô men quán tính lô dẫn thứ k ; i_k là tỷ số truyền giữa trục động cơ và trục lô; J_{0mk} là mô men quán tính của tất cả các bộ phận quay phía động cơ.

3. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO LÔ DẪN

* Bộ điều khiển lực căng

Từ phương trình (5) có:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{b_{k-1}} x_2 v_k + \frac{ES}{b_{k-1}} u_{F_k} + d_k(t) \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó: $\dot{x}_1 = x_2 = F_k$; $u_{F_k} = v_k - v_{k-1}$ là lượng sai lệch tốc độ dài giữa hai lô thứ k và $k-1$; $d_k(t)$ được coi là phần nhiễu hệ thống, các thành phần bất định này do sự thay đổi của hệ số ma sát nhớt ở bề mặt vật liệu, hệ số đàn hồi, sai số và nhiễu của các thiết bị đo.

Đưa mô hình của hệ về dạng:

$$\dot{x} = Ax + Bu_{F_k} + d_k(t) \quad (9)$$

Trong đó:

$$x = [x_1 \quad x_2]^T; \quad A = \begin{bmatrix} A_1(x) \\ A_2(x) \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ ES \\ b_{k-1} \end{bmatrix};$$

$$\underline{d}_k(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta A(t) + \Delta B(t)u_{fk} \end{bmatrix}$$

Với $A_1(\underline{x}) = x_2$; $A_2(\underline{x}) = -\frac{1}{b_{k-1}}F_k v_k + \frac{1}{b_{k-1}}F_{k-1}v_{k-1}$

Sai lệch đầu vào:

$$\underline{e} = \underline{x}_{ref} - \underline{x} \tag{10}$$

Chọn mặt trượt cho sai lệch như sau:

$$s(\underline{e}) = e_2 + \lambda_k e_1^{q_k/p_k} \tag{11}$$

Với $q_k, p_k \in \mathbb{N}^+$; q_k, p_k là số lẻ; $q_k \leq p_k$; $\lambda_k \in \mathbb{R}^+$; $e_2 = F_{refk} - F_k$

Sau khi hệ nằm trên mặt trượt sẽ hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn t_s .

Chứng minh:

Chọn hàm ứng viên Lyapunov:

$$V_1(\underline{e}) = \frac{1}{2}e_2^2 \tag{12}$$

Lấy đạo hàm (12) có:

$$\dot{V}_1(\underline{e}) = e_2 \dot{e}_2 \tag{13}$$

Theo (11) khi $s = 0$ có:

$$e_2 = -\lambda_k e_1^{q_k/p_k} \tag{14}$$

Đạo hàm hai vế (14) có:

$$\dot{e}_2 = -\lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot \dot{e}_1 = -\lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2 \tag{15}$$

Thay (15) vào (13) có:

$$\dot{V}_1(\underline{e}) = e_2 \left(-\lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2 \right) = -\lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2^2 \tag{16}$$

Vì $q_k, p_k \in \mathbb{N}^+$; q_k, p_k là số lẻ; nên $q_k - p_k$ là số chẵn, suy ra $e_1^{q_k/p_k} \geq 0$ với $\forall e_1$, do đó $\dot{V}_1(\underline{e}) \leq 0$ với $\forall \underline{e}$. Vậy hệ (8) sẽ ổn định và hội tụ về 0.

Tiến hành tổng hợp luật điều khiển như sau:

$$u_{fk}(t) = -\frac{1}{B'} \left[A_2(e_2) + \lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2 + \bar{d}_k \operatorname{sgn}(s) \right] \tag{17}$$

Trong đó: $\bar{d}_k \geq (d_k(t))_{\max}$ là giá trị chặn trên của hàm $d_k(t)$; $B' = \frac{ES}{b_{k-1}}$

Chứng minh: Với luật điều khiển đã chỉ ra hệ thống sẽ tiến về mặt trượt (11) và nằm trên đó trong thời gian hữu hạn.

Chọn hàm Lyapunov, xét hàm xác định dương sau:

$$V_2(s(\underline{e})) = \frac{1}{2}s^2(\underline{e}) \tag{18}$$

Lấy đạo hàm của $V_2(s(\underline{e}))$:

$$\dot{V}_2(s(\underline{e})) = s(\underline{e})\dot{s}(\underline{e}) \tag{19}$$

Theo (11) có:

$$\dot{s}(\underline{e}) = \dot{e}_2 + \lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot \dot{e}_1 \tag{20}$$

Từ (8) có:

$$\dot{e}_2 = A_2(e_2) + B'u_2 + d_2(t) \tag{21}$$

Thay (17) và (21) vào (20) có:

$$\begin{aligned} \dot{s}(\underline{e}) &= A_2(e_2) + B'u_2 + d_2(t) + \lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot \dot{e}_1 \\ &= A_2(e_2) + B' \cdot \left\{ -\frac{1}{B'} \left[A_2(e_2) + \lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2 + \bar{d} \operatorname{sgn}(s) \right] \right\} \\ &\quad + d_2(t) + \lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2 \\ &= -\lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2 - \bar{d} \operatorname{sgn}(s) + d_k(t) + \lambda_k \frac{p_k}{q_k} e_1^{q_k/p_k - 1} \cdot e_2 \\ &= -[\bar{d} \operatorname{sgn}(s) - d_k(t)] \end{aligned} \tag{22}$$

Thay kết quả ở (22) vào (19) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(s(\underline{e})) &= -s(\underline{e})[\bar{d} \operatorname{sgn}(s) - d_2(t)] \\ &= -[\bar{d}|s(\underline{e})| - s(\underline{e})d_k(t)] \end{aligned} \tag{23}$$

Vì $\bar{d}_k \geq (d_k(t))_{\max}$ nên $\bar{d}|s(\underline{e})| - s(\underline{e})d_k(t) \geq 0$ suy ra $\dot{V}_2(s(\underline{e})) \leq 0$. Như vậy hệ ổn định theo hàm Lyapunov và hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn.

*** Bộ điều khiển tốc độ dài:**

Theo (6) có hệ phương trình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -\frac{B_k}{J_k}x_4 + \frac{R_k}{J_k}u_{vk} + d_{vk}(t) \end{cases} \tag{24}$$

Trong đó: $\dot{x}_3 = x_4 = v_k$; u_{vk} là mô men M_k đặt cho động cơ lô dẫn thứ k; $d_{vk}(t) = \frac{R_k^2}{J_k}(F_{k+1} - F_k)$ được coi là phần nhiễu

hệ thống.

Đưa mô hình của hệ về dạng:

$$\dot{x} = Ax + Bu_{vk} + d_{vk}(t) \tag{25}$$

Trong đó: $x = [x_3 \quad x_4]^T$; $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_k}{J_k} \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{R_k}{J_k} \end{bmatrix}$;

$$d_{vk}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{R_k^2}{J_k}(F_{k+1} - F_k) \end{bmatrix}$$

Chọn mặt trượt cho sai lệch như sau:

$$s(\underline{e}) = \dot{e}_4 + (\gamma'_k + g'_k)e_4 + \lambda'_k e_4^{\frac{q'_k}{p'_k}} \quad (26)$$

Với $q'_k, p'_k \in \mathbb{N}^*$; q'_k, p'_k là số lẻ; $q'_k \leq p'_k$; $\lambda'_k \in \mathbb{R}^*$;

$$g'_k = \lg\left(e_4^2 + \frac{1}{\epsilon_k}\right); \quad 0 < \epsilon_k \leq 1; \quad e_4 = v_{refk} - v_k + u_{Fk}$$

Sau khi hệ nằm trên mặt trượt sẽ hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn t_s và tốc độ hội tụ nhanh hơn mặt trượt (11).

Chứng minh:

Chọn hàm ứng viên Lyapunov như sau:

$$V_1(\underline{e}) = \frac{1}{2}e_4^2 \quad (27)$$

Lấy đạo hàm (27) có:

$$\dot{V}_1(\underline{e}) = e_4 \dot{e}_4 \quad (28)$$

Theo (26) khi $s = 0$ có:

$$\dot{e}_4 = -(\gamma'_k + g'_k)e_4 - \lambda'_k e_4^{\frac{q'_k}{p'_k}} \quad (29)$$

Thay (29) vào (28) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(e_4) &= -(\gamma'_k + g'_k)e_4^2 - \lambda'_k e_4^{\frac{q'_k+p'_k}{p'_k}} \\ &= -(\gamma'_k + g'_k)e_4^2 - \lambda'_k e_4^{\frac{q'_k+p'_k}{p'_k}} \end{aligned} \quad (30)$$

Vì $q'_k, p'_k \in \mathbb{N}^*$; q'_k, p'_k là số lẻ; nên $q'_k + p'_k$ là số chẵn, suy ra $e_4^{\frac{q'_k+p'_k}{p'_k}} \geq 0$ với $\forall e_4$ do đó $\dot{V}(\underline{e}) \leq 0$ với $\forall e_4$. Vậy hệ (24) sẽ ổn định và hội tụ về 0.

Thành phần tham số $g = \lg\left(e_4^2 + \frac{1}{\epsilon}\right)$ sẽ giúp hệ hội tụ về 0 nhanh hơn.

Theo (15) có:

$$\dot{e}_2 = -\lambda_k \frac{q_k}{p_k} e_1^{\frac{q_k-1}{p_k}} \cdot e_2 \quad (31)$$

Theo (29) có:

$$\begin{aligned} \dot{e}_4 &= -(\gamma'_k + g'_k)e_4 - \lambda'_k e_4^{\frac{q'_k}{p'_k}} \\ &= -\left[\gamma'_k + \lg\left(e_4^2 + \frac{1}{\epsilon}\right)\right]e_4 - \lambda'_k e_4^{\frac{q'_k}{p'_k}} \end{aligned} \quad (32)$$

Xét hàm Jacobian của hai hàm sai số trong (31) và (32) có:

$$\chi_1 = \frac{\partial \dot{e}_2}{\partial e_2} = -\lambda_k \frac{q_k}{p_k} e_1^{\frac{q_k-1}{p_k}} = -\lambda_k \frac{q_k}{p_k} \frac{1}{e_1^{\frac{p_k-q_k}{p_k}}} \quad (33)$$

$$\chi_2 = \frac{\partial \dot{e}_4}{\partial e_4} = \gamma'_k - \lambda'_k \frac{q'_k}{p'_k} \frac{1}{e_4^{\frac{p'_k-q'_k}{p'_k}}} - \frac{2e_4^2}{\left(e_4^2 + \frac{1}{\epsilon}\right) \ln 10} - \lg\left(e_4^2 + \frac{1}{\epsilon}\right) \quad (34)$$

So sánh giữa hai hàm χ_1 và χ_2 cho thấy χ_1, χ_2 sẽ cùng tiến ra $-\infty$ khi $e \rightarrow 0$. Tuy nhiên hàm χ_2 sẽ tiến ra $-\infty$ nhanh hơn, phụ

thuộc vào việc chọn giá trị ϵ . Như vậy, vòng điều khiển tốc độ dài sẽ hội tụ nhanh hơn vòng điều khiển lực căng.

Tiến hành tổng hợp luật điều khiển như sau:

$$u_{v_k}(t) = B^{-1}\left[\dot{\underline{e}} - A\underline{e} - \dot{s}(\underline{e}) - \sigma s(\underline{e}) - \bar{d} \operatorname{sgn}(s(\underline{e}))\right] \quad (35)$$

Với σ là các hằng số dương; $\bar{d} \geq (d_{v_k}(t))_{\max}$ là giá trị chặn trên của hàm $d_{v_k}(t)$.

Chứng minh: Với luật điều khiển đã chỉ ra hệ thống sẽ tiến về mặt trượt (26) và nằm trên đó trong thời gian hữu hạn.

Chọn hàm Lyapunov, xét hàm xác định dương sau:

$$V_2(s(\underline{e})) = \frac{1}{2}s^2(\underline{e}) \quad (36)$$

Lấy đạo hàm của $V_2(s(\underline{e}))$:

$$\dot{V}_2(s(\underline{e})) = s(\underline{e})\dot{s}(\underline{e}) \quad (37)$$

Thay (35) vào (25) có:

$$\dot{\underline{e}} = A\underline{e} + B\left\{\begin{aligned} &B^{-1}\left[\dot{\underline{e}} - A\underline{e} - \dot{s}(\underline{e})\right] \\ &- B^{-1}\left[\sigma s(\underline{e}) + \bar{d} \operatorname{sgn}(s(\underline{e}))\right] \end{aligned}\right\} + d_{v_k}(t) \quad (38)$$

Từ (38) rút ra được:

$$\dot{s}(e_F) = -\sigma s(\underline{e}) - \bar{d} \operatorname{sgn}(s(\underline{e})) + d_{v_k}(t) \quad (39)$$

Thay (39) vào (37) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(S(\underline{e})) &= s(\underline{e})\left[-\sigma s(\underline{e}) - \bar{d} \operatorname{sgn}(s(\underline{e})) + d_{v_k}(t)\right] \\ &= -\sigma s^2(\underline{e}) - s(\underline{e})\left[\bar{d} \operatorname{sgn}(s(\underline{e})) - d_{v_k}(t)\right] \\ &= -\sigma s^2(\underline{e}) - \left[\bar{d}|s(\underline{e})| - s(\underline{e}) \cdot d_{v_k}(t)\right] \end{aligned} \quad (40)$$

Vì $\bar{d} \geq (d_{v_k}(t))_{\max}$ là giá trị chặn trên của hàm $d_{v_k}(t)$ nên ta có: $\bar{d}|s(\underline{e})| - s(\underline{e}) \cdot d_{v_k}(t) \geq 0$

Suy ra:

$$\dot{V}_2(S(\underline{e})) = -\sigma s^2(\underline{e}) - \left[\bar{d}|s(\underline{e})| - s(\underline{e}) \cdot d_{v_k}(t)\right] \leq 0 \quad (41)$$

Như vậy theo (41) cho thấy hệ luôn ổn định theo hàm Lyapunov và sai lệch điều khiển sẽ tiến đến 0 trong thời gian hữu hạn.

*** Bộ quan sát lực căng**

Từ (7) đặt: $\underline{x} = [x_1 \quad x_2]^T = [F_k \quad v_k]^T$; $u_k = M_k$ và đưa hệ về dạng ma trận có:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} \\ \underline{y} \end{cases} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{b_{k-1}}x_1x_2 + \frac{ES}{b_{k-1}}x_2 - \frac{ES}{b_{k-1}}v_{k-1} + \frac{1}{b_{k-1}}F_{k-1}v_{k-1} \\ -\frac{R_k^2}{J_k}x_1 - \frac{B_k}{J_k}x_2 + \frac{R_k}{J_k}u_k + \frac{R_k^2}{J_k}F_{k+1} \end{bmatrix} + \underline{\epsilon} \quad (42)$$

Theo [5] có:

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{b_{k-1}}\hat{x}_1\hat{x}_2 + \frac{ES}{b_{k-1}}\hat{x}_2 - \frac{ES}{b_{k-1}}v_{k-1} + \frac{1}{b_{k-1}}F_{k-1}v_{k-1} \\ -\frac{R_k^2}{J_k}\hat{x}_1 - \frac{B_k}{J_k}\hat{x}_2 + \frac{R_k}{J_k}u_k + \frac{R_k^2}{J_k}F_{k+1} \\ C_2^1\theta_{pk}D\tilde{x} \\ -C_2^2\theta^2\frac{\partial}{\partial\hat{x}_2}\left(-\frac{R_k^2}{J_k}\hat{x}_1 - \frac{B_k}{J_k}\hat{x}_2 + \frac{R_k}{J_k}u_k + \frac{R_k^2}{J_k}F_{k+1}\right)D\tilde{x} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Trong đó: $D = [1 \ 0]$; $\tilde{x} = \hat{x} - x$; $C_2^1 = 2$; $C_2^2 = 1$

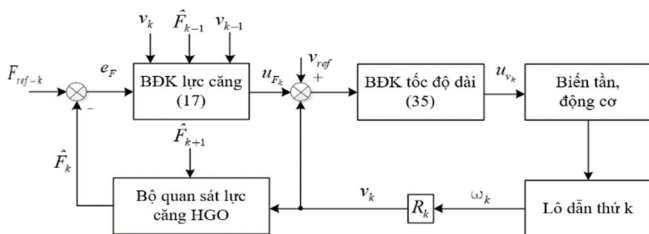
Từ (43) có:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\frac{1}{b_{k-1}}\hat{x}_1\hat{x}_2 + \frac{ES}{b_{k-1}}\hat{x}_2 - \frac{ES}{b_{k-1}}v_{k-1} + \frac{1}{b_{k-1}}F_{k-1}v_{k-1} - 2\theta\tilde{x}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\frac{R_k^2}{J_k}\hat{x}_1 - \frac{B_k}{J_k}\hat{x}_2 + \frac{R_k}{J_k}u_k + \frac{R_k^2}{J_k}F_{k+1} - \theta^2\frac{B_k}{J_k}\tilde{x}_1 \end{cases} \quad (44)$$

Từ (44) có bộ quan sát lực căng:

$$\begin{aligned} \hat{F}_k &= \frac{J_k}{R_k^2} \left(-\dot{\hat{v}}_k - \frac{B_k}{J_k}\hat{v}_k + \frac{R_k}{J_k}u_k + \frac{R_k^2}{J_k}\hat{F}_{k+1} - \theta^2\frac{B_k}{J_k}\tilde{F}_k \right) \\ &= -\frac{J_k}{R_k^2}\dot{\hat{v}}_k - \frac{B_k}{R_k^2}\hat{v}_k + \frac{1}{R_k}u_k + \hat{F}_{k+1} - \theta^2\frac{B_k}{R_k^2}\tilde{F}_k \end{aligned} \quad (45)$$

Trên cơ sở BDK trượt đã tính toán, thay biến trạng thái x bởi các giá trị ước lượng \hat{x} của bộ HGO, sẽ thu được BDK phản hồi đầu ra như hình 3. Trong đó v_{k-1} là tốc độ dài của lô dẫn động phía trước, được đo bằng cảm biến, F_{k+1} , F_{k-1} được ước lượng bằng bộ quan sát HGO.



Hình 3. Mô hình điều khiển lô dẫn động

4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

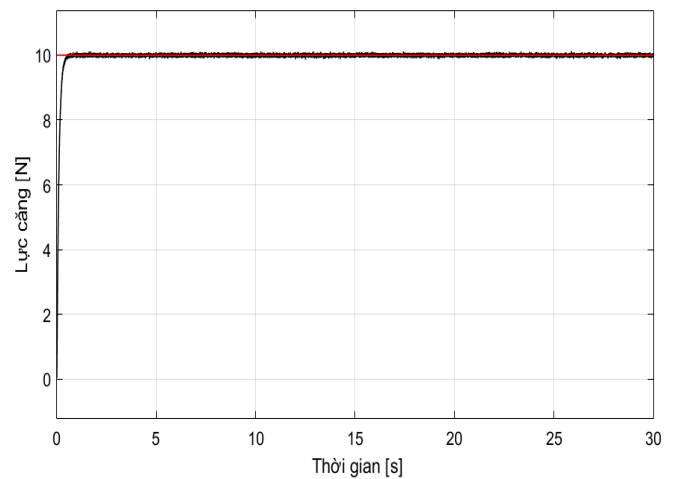
4.1. Tham số mô phỏng

Bảng 1. Tham số mô phỏng

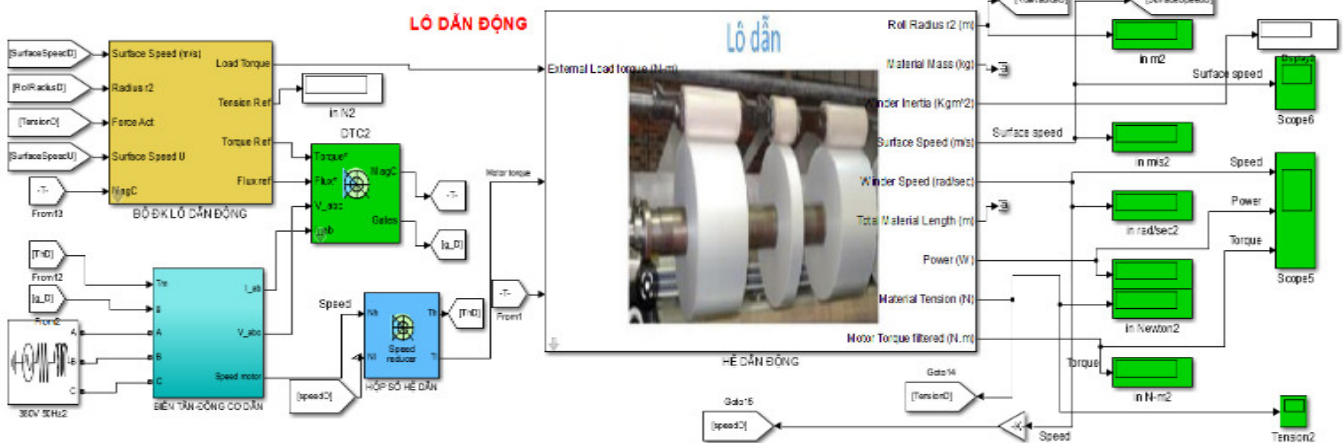
Ký hiệu	Thông số	Giá trị [đơn vị]
W	Độ rộng băng vật liệu	2m
h	Độ dày băng vật liệu	0,0005m
E	Hệ số đàn hồi băng vật liệu	$2,5 \cdot 10^9 \text{N/m}^2$
k	Hệ số cuộn chặt lô cuộn lại	1
ρ	Khối lượng riêng băng vật liệu	300kg/m^3
F_{\max}	Lực căng lớn nhất	40N
v_{\max}	Tốc độ dài lớn nhất	7m/s
R_k	Bán kính ban đầu	0,05m
J_k	Mô men quán tính ban đầu	$3,125 \text{Kg} \cdot \text{m}^2$
B_k	Hệ số ma sát nhớt	$0,0002 \text{Nms}$
φ_k	Góc ôm giữa băng vật liệu và lô	$\pi/2 \text{rad}$
i_k	Tỉ số truyền	1:10

4.2. Kết quả mô phỏng

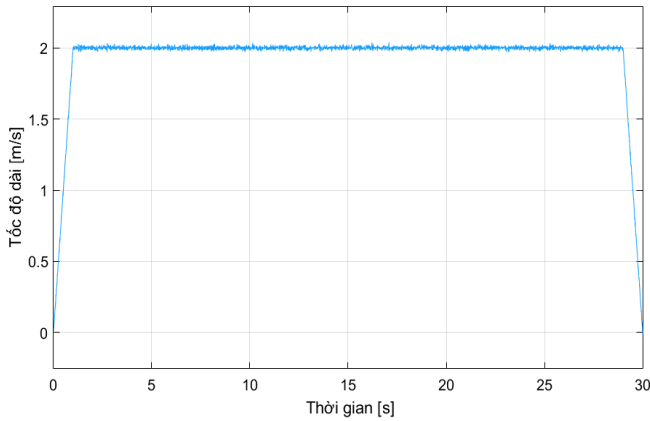
Lực căng trên băng vật liệu là 10N, tốc độ dài 2m/s, kết quả mô phỏng thể hiện trên hình 5 - 8.



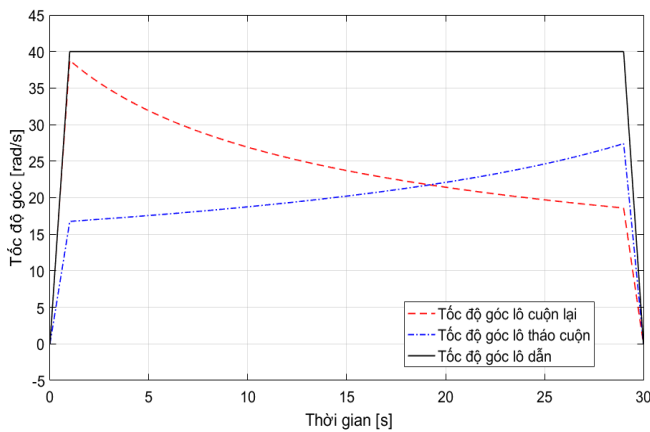
Hình 5. Đáp ứng lực căng trên băng vật liệu



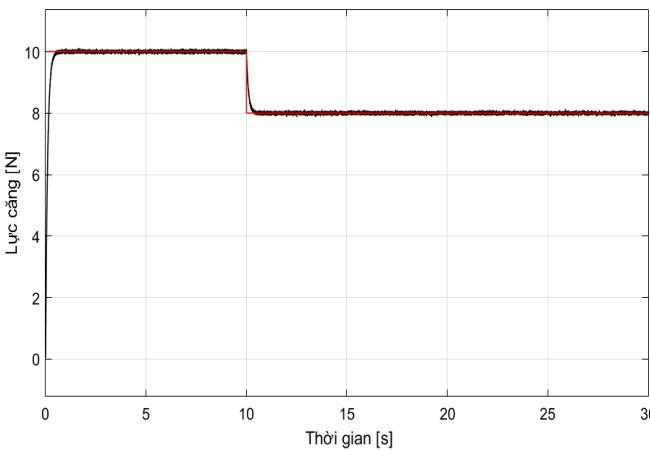
Hình 4. Mô hình mô phỏng hệ lô dẫn động



Hình 6. Đáp ứng tốc độ dài



Hình 7. Đáp ứng tốc độ góc lô dẫn, lô tháo cuộn và lô cuộn lại



Hình 8. Đáp ứng lực căng khi thay đổi lực căng đặt

Nhận xét:

BĐK đề xuất đã đáp ứng tốt yêu cầu công nghệ của dây chuyền vận chuyển băng vật liệu. Tốc độ dài và lực căng của băng vật liệu đáp ứng nhanh, ổn định trong quá trình làm việc, sai số nhỏ 0,3%, không có độ quá chỉnh.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển FTSM và bộ quan sát lực căng HGO cho hệ cơ điện nhiều động cơ chuyển động băng vật liệu đàn hồi. Phần trình bày đề xuất phương pháp điều khiển phân tán, xây dựng mô

hình cơ hệ, xây dựng bộ quán sát lực căng HGO, luật điều khiển trượt, chứng minh tính ổn định của hệ, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua kết quả mô phỏng cho thấy BĐK đã đáp ứng được yêu cầu công nghệ của hệ thống, nâng cao được chất lượng điều khiển, có thể nghiên cứu ứng dụng vào thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Chen Chong, Liu Xingqiao, 2010. *Application of Fuzzy Control in Multi-motor Tension Control System*. International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application.

[2]. Fawzan Salem, E.H.E. Bayoumi, 2011. *Robust fuzzy-PID control of three-motor drive system using simulated annealing optimization*. Journal of Electrical Engineering.

[3]. H. Koc, D. Knittel, M. D. Mathelin, 2000. *Robust gain-scheduled control of winding systems*. IEEE Conf. Decision and Control, Sidney, Australia.

[4]. Zhiqiang Wang, Haibao Nan, Tingna Shi, 2018. *No-Tension Sensor Closed-Loop Control Method with Adaptive PI Parameters for Two-Motor Winding System*. Mathematical Problems in Engineering.

[5]. Pham Tuan Thanh, Tran Xuan Tinh, Dao Phuong Nam, Dao Sy Luat, Nguyen Hong Quang, 2021. *On finite-time output feedback sliding mode control of an elastic multi-motor system*. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 12, No. 1.

[6]. Tran Xuan Tinh, Pham Tuan Thanh, Nguyen Tuan Hoan, Tran Van Tuyen, 2023. *Design adaptive neural network fast terminal sliding mode controller of winding systems for elastic webs*. Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry, 59(1).

AUTHORS INFORMATION

Tran Xuan Tinh¹, Pham Tuan Thanh², Tran Van Tuyen², Nguyen Tuan Anh¹

¹Air Defence - Air Force Academy, Vietnam

²Military Technology Academy, Vietnam