

# XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG BĂNG VẬT LIỆU NHIỀU ĐỘNG CƠ

BUILD OPTIMAL CONTROL ALGORITHM FOR MULTI-MOTOR WINDING SYSTEMS

Sái Văn Thuận<sup>1</sup>, Trần Xuân Tinh<sup>1,\*</sup>,  
Khuất Quang Tiến<sup>1</sup>, Trần Hồng Phú<sup>1</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.123>

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển tối ưu cho hệ truyền động vận chuyển băng vật liệu. 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 nhiễu ngẫu nhiên đầu vào và thông số mô hình biến đổi.

**Từ khóa:** Hệ truyền động băng vật liệu, điều khiển tối ưu, lực căng, đồng bộ tốc độ.

## ABSTRACT

This article presents the results of synthesizing an optimal controller for the material conveyor belt transmission system. The results evaluated by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures quality requirements even when the system is affected by random input noise and model parameters. change.

**Keywords:** Winding system, optimal control, tension, speed synchronization.

<sup>1</sup>Học viện Phòng không - Không quân

\*Email: tinhpk79@gmail.com

Ngày nhận bài: 01/3/2024

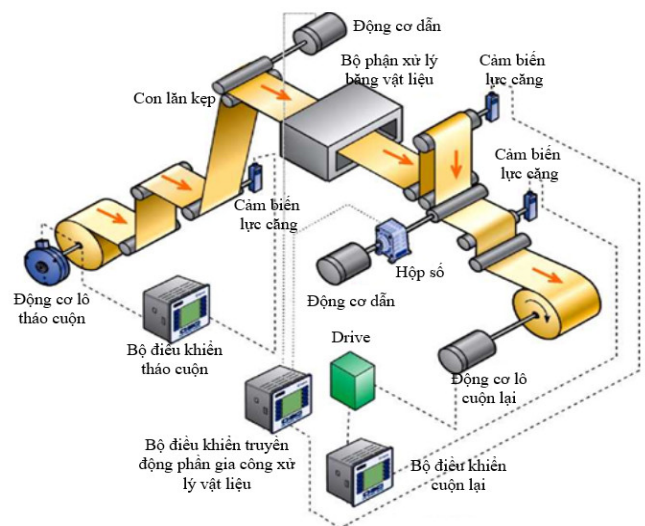
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/4/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2024

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ truyền động (HTĐ) nhiều động cơ điện, vận chuyển băng vật liệu có vai trò đặc biệt quan trọng trong rất nhiều tổ hợp thiết bị kĩ thuật thuộc các lĩnh vực công nghiệp và quốc phòng. Đây 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 này việc kiểm soát lực căng trên băng vật liệu là một vấn đề khó. Đặc biệt với hệ truyền động có sự thay đổi về tham số mô hình như: Mômen quán tính, bán kính lô quấn. Các bộ điều khiển (BĐK) HTĐ này liên tục được nghiên cứu phát triển như: BĐK mờ [1, 2]; điều khiển bền vững [3]; điều khiển thích nghi [4]; điều khiển trượt [5]. Tuy nhiên để tăng năng suất, cải thiện về chất lượng sản phẩm vẫn cần áp dụng lý thuyết điều khiển hiện đại vào điều khiển. Nhóm tác giả xây dựng BĐK tối ưu cho từng trục cuộn, dạng điều khiển phân tán, nhằm đơn giản

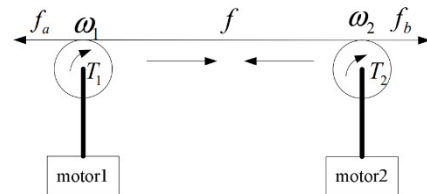
hóa bài toán. Thuật toán đã góp phần nâng cao được chất lượng của hệ, hạn chế được các tác động của nhiễu và sự biến đổi của tham số mô hình.



Hình 1. Cấu trúc tổng quát của một hệ truyền động băng vật liệu

## 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH CƠ HỌC

Xét mối liên hệ của hai động cơ dẫn động liền kề như hình 1. Mục tiêu của hệ là duy trì tốc độ dài của băng không đổi và kiểm soát lực căng trên băng.



Hình 2. Mô hình truyền động vận chuyển băng tải giữa hai trục liền kề

Mô hình động lực học của hai động cơ liền kề trong hệ truyền động có dạng:

$$T_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} - r_1(f - f_a) \quad (1)$$

$$T_2 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + r_2(f - f_b) \quad (2)$$

Trong đó,  $T_1, T_2$  là mômen (N.m) do động cơ 1, 2 sinh ra;  $\omega^1, \omega^2$  là tốc độ góc của hai ổ đỡ;  $J_1, J_2$  là mô men quán tính quy đổi về hai trục;  $f$  là lực căng bằng tải giữa hai ổ đỡ;  $f_a, f_b$  là lực căng của bằng tải giữa hai trục liên kế phía trước và phía sau;  $r_1, r_2$  là bán kính ổ đỡ.

Lực căng  $f$  xác định như sau:

$$f = \frac{K}{s+C}(r_1\omega_1 - r_2\omega_2) \tag{3}$$

Với  $K, C$  là hằng số;  $s$  là toán tử Laplace. Hệ có các tham số  $r_1, r_2, J_1, J_2$  có thể thay đổi (không phải là hằng số). Vấn đề đặt ra ở đây là cần thiết lập thuật toán điều khiển tốc độ quay  $\omega_2$  sao cho tốc độ dài tại ổ đỡ 2 ổn định xung quanh giá trị mong muốn. Thay (3) vào (2) có:

$$\begin{aligned} T_2 &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + r_2 \left[ \frac{K}{S+C}(r_1\omega_1 - r_2\omega_2) - f_b \right] \\ &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + \frac{Kr_1r_2\omega_1}{S+C} - \frac{Kr_2^2\omega_2}{S+C} - r_2f_b \end{aligned} \tag{4}$$

Tốc độ dài của bằng truyền trên ổ đỡ 2 có giá trị:

$$v = r_2 \cdot \omega_2 \tag{5}$$

Từ (5) có:

$$T_2 = \frac{J_2}{r_2} \frac{dv}{dt} + \frac{Kr_1r_2\omega_1}{S+C} - \frac{Kr_2v}{S+C} - r_2f_b \tag{6}$$

Cần ổn định tốc độ dài  $v$  của bằng tải xung quanh giá trị  $v_0$  (do yêu cầu công nghệ). Đặt:

$$y = v - v_0 \tag{7}$$

Từ (6) và (8) có:

$$T_2 = \frac{J_2}{r_2} \frac{dy}{dt} - \frac{Kr_2y}{S+E} + \frac{Kr_1r_2\omega_1}{S+E} - \frac{Kr_2v_0}{S+E} - r_2f_b \tag{8}$$

Suy ra:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Kr_2^2y}{J_2(S+E)} + \frac{r_2}{J_2} T - \frac{r_2}{J_2} \left( \frac{Kr_1r_2\omega_1}{S+E} - \frac{Kr_2v_0}{S+E} - r_2f_b \right) \tag{9}$$

Khi này bài toán ổn định giá trị  $v$  xung quanh giá trị  $v_0$  tương đương bài toán ổn định  $y$  quanh giá trị 0. Mômen  $T_2$  phụ thuộc điện áp cấp vào động cơ 2, nên có thể coi quan hệ giữa điện áp điều khiển  $u$  với mômen là một khâu quán tính:

$$\frac{dT_2}{dt} + K_1T_2 = K_u \cdot u \tag{10}$$

Các hệ số  $K_i, K_u$  là hằng số hệ truyền động.

$$\text{Đặt: } x_1 = y; x_2 = T_2; z = \frac{Kr_1r_2\omega_1}{S+E} - \frac{Kr_2v_0}{S+E} - r_2f_b$$

Từ các phương trình (9) và (10) có hệ:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{Kr_2^2}{J_2(S+E)}x_1 + \frac{r_2}{J_2}x_2 - z \\ \dot{x}_2 = -K_1x_2 + K_u \cdot u \end{cases} \tag{11}$$

Đưa (11) về dạng ma trận:

$$\dot{X} = AX + BU + Cz \tag{12}$$

Trong đó:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Kr_2^2}{J_2(S+E)} & \frac{r_2}{J_2} \\ 0 & -K_1 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_u \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Hệ (12) là hệ tuyến tính không dừng vì hai phần tử  $a_{11}$  và  $a_{12}$  phụ thuộc vào  $r_1, r_2, J_2$ , đây là các tham số biến đổi theo thời gian.

### 3. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU

Cần xác định luật điều khiển tối ưu cho hệ tuyến tính (12) sao cho cực tiểu hóa phiến hàm:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (X^T Q X - U^T R U) dt \tag{13}$$

Trong đó:  $Q = \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; R = (r)$  với  $p, r$  là các số tùy chọn

Áp dụng điều kiện tối ưu của nguyên lý cực đại Pontryagin, xây dựng hàm Haminton:

$$H = \Psi^T A X + \Psi^T B U + \Psi^T C z + \frac{1}{2} (X^T Q X + U^T R U) \tag{14}$$

Trong đó,  $\Psi$  là vec tơ liên hợp, thỏa mãn phương trình sau:

$$\dot{\Psi} = -\frac{\partial H}{\partial X} = -A^T \Psi - QX \tag{15}$$

Với điều kiện:  $\Psi(t_f) = 0$

Trong trường hợp không có hạn chế đối với biến điều khiển  $u$  thì điều khiển tối ưu được xác định từ điều kiện:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \Psi^T B + Ru = 0 \tag{16}$$

Từ đây có:

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T \Psi(t) \tag{17}$$

Đối với hệ tuyến tính có thể tìm  $\Psi(t)$  dưới dạng sau:

$$\Psi(t) = K_x X + K_1(t) \tag{18}$$

Vậy:

$$\dot{\Psi}(t) = \dot{K}_x X + K_x \dot{X} + \dot{K}_1 \tag{19}$$

Từ (15), (18) và (19) có:

$$\dot{K}_x X + K_x \dot{X} + \dot{K}_1 = -A^T (K_x X + K_1(t)) - QX \tag{20}$$

Qua biến đổi có:

$$\begin{aligned} \dot{K}_x X + K_x [AX - BR^{-1}B^T (K_x X + K_1(t)) + Cz] + \dot{K}_1 \\ = -A^T K_x X - A^T K_1(t) - QX \end{aligned} \tag{21}$$

Hoặc

$$\begin{aligned} & (\dot{K}_x + K_x A + A^T K_x - BR^{-1}B^T K_x + Q)X \\ & + (\dot{K}_1 - K_x BR^{-1}B^T K_1(t) + A^T K_1(t) + Cz) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Để phương trình (22) thỏa mãn với mọi trạng thái của X thì ma trận  $K_x$  và vec tơ  $K_1$  phải thỏa mãn hai phương trình sau:

$$\dot{K}_x + K_x A + A^T K_x - BR^{-1}B^T K_x + Q = 0 \quad (23)$$

$$\dot{K}_1 - K_x BR^{-1}B^T K_1(t) + A^T K_1(t) + Cz = 0 \quad (24)$$

Từ đó rút ra:

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T \Psi(t) = -R^{-1}B^T K_x X - R^{-1}B^T K_1(t) \quad (25)$$

Qua biểu thức (25) xác định luật điều khiển tối ưu bảo đảm cho tốc độ bằng tải ổn định ở giá trị đặt trước.

- Xác định ma trận  $K_x$  thông qua phương trình Riccati:

$$K_x A + A^T K_x - BR^{-1}B^T K_x + Q = 0 \quad (26)$$

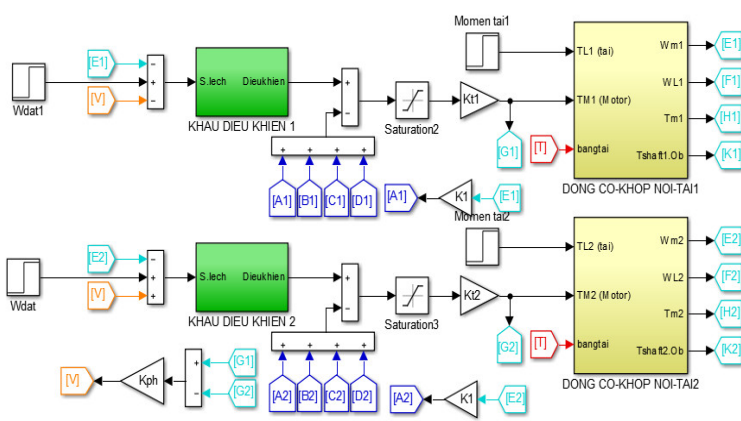
Do ma trận A phụ thuộc vào các tham số biến đổi  $J_2, r_1, r_2$  nên tiến hành chia khoảng thời gian điều khiển ( $t_f - t_0$ ) thành N khoảng nhỏ đều nhau,  $\Delta T = \frac{t_f - t_0}{N}$ . Trong khoảng thời

gian  $[i\Delta T, (i+1)\Delta T]$  coi các tham số của ma trận A là hằng số. Áp dụng các thuật toán đã có xác định các ma trận  $K_x(i)$ , xác định  $K_1(i\Delta T)$ , từ đó xác định luật điều khiển theo biểu thức (25).

## 4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

### 4.1. Tham số mô phỏng

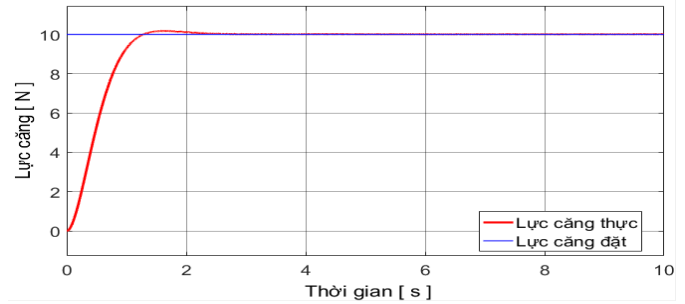
Xét hai động cơ có các tham số giống nhau: Công suất  $P_{dm} = 4kW$ ;  $L_m = 0,1958(H)$ ;  $L_s = 0,202(H)$ ;  $L_r = 0,2065$ ;  $R_r = 1,275(\Omega)$ ;  $R_s = 1,663(\Omega)$ ;  $p = 2$ ;  $n_{dm} = 1400v/p$ ;  $J_M = 7,47.10^{-5}Kgm^2$ ;  $J_L = 8,258.10^{-5}$ ; bán kính trục quán  $r_1 = r_2 = 0,1m$ ; chiều dài dải băng vật liệu  $l = 1m$ ; diện tích ngang của băng vật liệu  $S = 2.10^{-5}m^2$ .



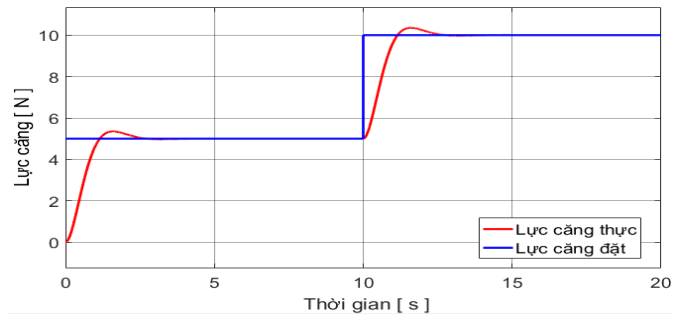
Hình 3. Mô hình mô phỏng hệ truyền động 2 động cơ liên kết

### 4.2. Kết quả mô phỏng

**Trường hợp 1:** Lực căng đặt là 10N, không nhiều



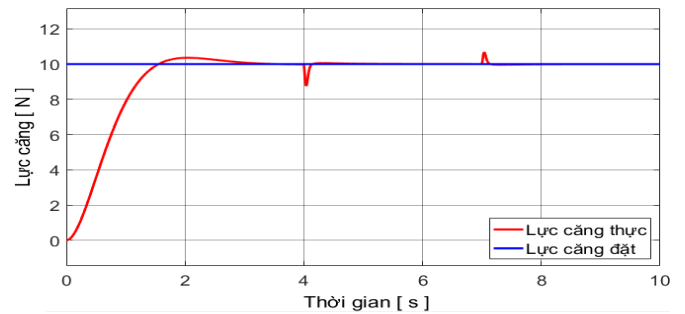
a)



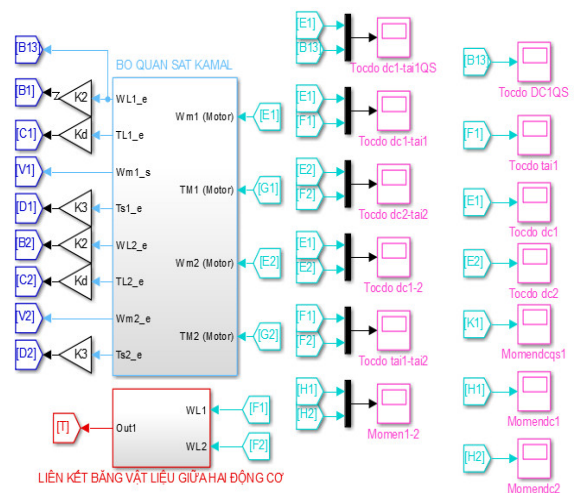
b)

Hình 4. Đáp ứng lực căng của hệ

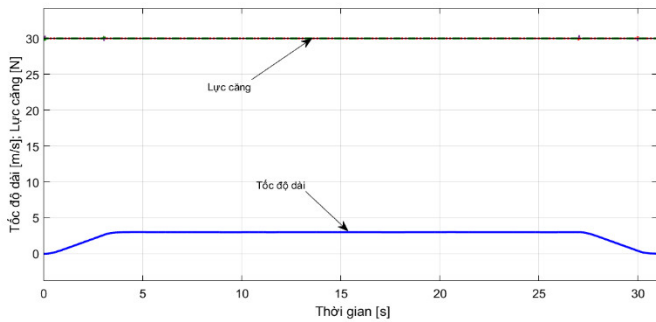
**Trường hợp 2:** Đáp ứng lực căng khi thay đổi tải tại thời điểm 4 giây và 7 giây.



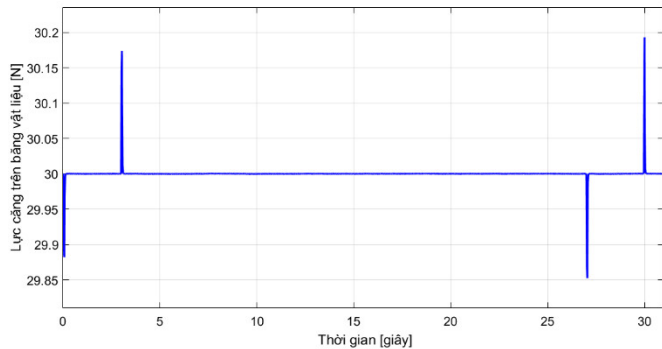
Hình 5. Đáp ứng lực căng của hệ khi tải thay đổi



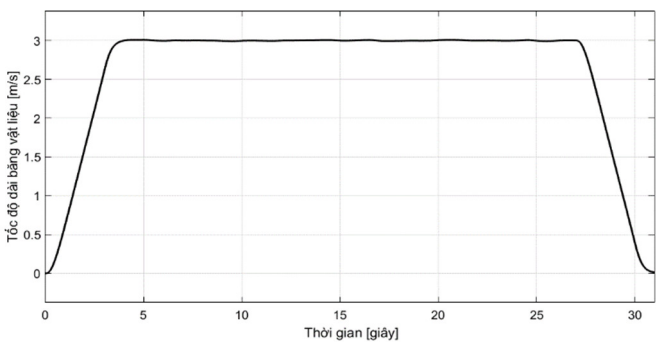
**Trường hợp 3:** Đặt lực căng là 30N; tốc độ dài đặt bằng 3m/s, thay đổi tại các thời điểm 0 giây, 3 giây, 27 giây và 30 giây; không có nhiễu tác động.



Hình 6. Đáp ứng lực căng và tốc độ dài của hệ



Hình 7. Đáp ứng lực căng trên băng vật liệu



Hình 8. Đáp ứng tốc dài

**Nhận xét:** Tốc độ dài và lực căng của băng vật liệu đạt giá trị đặt sau thời gian ngắn, với sai số và độ quá chỉnh nhỏ, đảm bảo được ổn định, giúp nâng cao chất lượng hoạt động của hệ thống.

### 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển tối ưu cho hệ cơ điện vận chuyển băng vật liệu nhiều động cơ. Nội dung nghiên cứu được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình cơ hệ, luật điều khiển tối ưu, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua kiểm tra cho thấy, BĐK đã nâng cao được chất lượng của hệ thống so với kết quả các công trình [1-3], cũng như thông qua các tiêu chí đánh giá, đó là: tính tác động nhanh, độ quá điều chỉnh, sai số tĩnh, đảm bảo chính xác tốc độ dài, lực căng của băng vật liệu.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Chen Chong, Liu Xingqiao, "Application of Fuzzy Control in Multi-motor Tension Control System," *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, 2010
- [2]. Fawzan Salem, E.H.E. Bayoumi, "Robust fuzzy-PID control of three-motor drive system using simulated annealing optimization," *Journal of Electrical Engineering*, 2011.
- [3]. H. Koc, D. Knittel, M. D. Mathelin, "Robust gain-scheduled control of winding systems," *IEEE Conf. Decision and Control*, Sidney, Australia, 2000.
- [4]. Zhiqiang Wang, Haibao Nan, Tingna Shi, "No-Tension Sensor Closed-Loop Control Method with Adaptive PI Parameters for Two-Motor Winding System," *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.
- [5]. N.R. Abjadi, J. Soltani, "Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor," *IET Control Theory Appl*, 3, 4, 419-427, 2009.

### AUTHORS INFORMATION

Sai Van Thuan, Tran Xuan Tinh, Khuat Quang Tien, Tran Hong Phu  
Air Defense - Air Force Academy, Vietnam