

# Thiết kế điều khiển Backstepping - Trượt kết hợp bộ quan sát mở rộng ESO cho hệ hai khâu quán tính

## Design of Backstepping- Sliding mode control combination with extended state observation (ESO) for two-mass systems

Võ Thanh Hà

Đại học Giao thông vận tải

Tác giả liên hệ chính E-mail: [VoThanhHa.ktd@utc.edu.vn](mailto:VoThanhHa.ktd@utc.edu.vn)

### Abstract

The paper presents the results of backstepping - sliding mode control based on control design for speed actual value of load motor match speed reference for two-mass systems. This controller is combined with an extended state observer (ESO) for estimating the torque load sides of two-mass systems. The effectiveness of the control systems (reduce vibration and eliminate mechanical resonance) is compared with classical PI controllers commonly used in industry. The results of analysis and evaluation between the speed control methods for the two-mass system were performed by Matlab simulation software.

**Keywords:** Two-Mass system; Speed control; Backstepping; Sliding mode control; PID controller; Extended state observation.

### Ký hiệu

| Ký hiệu                              | Đơn vị  | Ý nghĩa  |
|--------------------------------------|---------|--|
| $K_{sh}$                             | Nm/rad  | Hệ số cứng quy về trục                                 |
| $b_s$                                | Nms/rad | Hệ số giảm chấn  |
| $T_m$                                | Nm      | Mômen động cơ  |
| $T_L$                                | Nm      | Mômen tải  |
| $T_s$                                | Nm      | Mômen xoắn trục thực                                   |
| $T_{sd}$                             | Nm      | Mômen xoắn trục đặt                                    |
| $J_M$                                | Nm      | Mômen quán tính động cơ                                |
| $J_L$                                | Nm      | Mômen quán tính tải                                    |
| $\omega_M$                           | rad/s   | Tốc độ động cơ thực                                    |
| $\omega_L$                           | rad/s   | Tốc độ tải thực  |
| $\omega_{Ld}$                        | rad/s   | Tốc độ tải đặt   |
| $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ |         | Các thành phần của ma trận L                           |
| $c_1, c_2, c_3, c_4$                 |         | Các hằng số dương của bộ điều khiển backstepping-trượt |

### Chữ viết tắt

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| PI          | Bộ điều khiển PI. |
| Feedforward | Truyền thẳng      |
| Chattering  | Hiện tượng rung   |

ĐK  
ESO

Điều khiển  
extended state observation-  
quan sát trạng thái mở rộng

### Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế backstepping - trượt điều khiển tốc độ tải bám sát tốc độ động cơ, tải theo yêu cầu cho hệ hai khâu. Bộ điều khiển này được kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng ước lượng mô-men tải của hệ thống này. Hiệu quả của giải pháp điều khiển đề xuất (giảm dao động và loại trừ hiện tượng cộng hưởng cơ học) được so sánh với bộ điều khiển kinh điển PI hay sử dụng trong công nghiệp. Các kết quả phân tích đánh giá được thực hiện bằng mô phỏng Matlab/Simulink.

### 1. Phần mở đầu

Trong sản xuất trong công nghiệp, động cơ điện là thành phần không thể thiếu cho hệ thống sản xuất. Thông qua quá trình biến đổi điện năng thành cơ năng, để truyền mô men từ động cơ đến cơ cấu sản xuất phải sử dụng các khớp nối. Các khớp nối này thường được sử dụng là các hộp số, dây đai và các trục nối. Tuy nhiên sự không cứng vững của các thành phần khớp nối này có thể gây ra dao động trong quá trình vận hành. Khi hệ thống làm việc đúng tần số cộng hưởng có thể xảy ra hiện tượng cộng hưởng cơ học gây ra các rung động lớn, tiếng ồn và có thể phá hỏng các kết cấu cơ khí [1],[2]. Theo nghiên cứu [2] nhận thấy hệ số cứng trục

$K_{sh}=0.28\text{Nm/rad}$  và hệ số giảm chấn  $b_s=0.0015\text{ Nm/rad}$  thì biên độ cộng hưởng lớn, và tỷ lệ mô-men quán tính động cơ và động cơ tải nhỏ thì biên độ dao động tốc độ động cơ giảm đi, độ quá điều chỉnh cũng giảm, đồng thời tốc độ đáp ứng nhanh. Vì vậy vấn đề cần thiết giải quyết sao cho tốc độ thực của tải và tốc độ động cơ bám sát giá trị đặt với độ chính xác cao, giảm dao động và loại trừ hiện tượng cộng hưởng cơ học cho hệ hai vật.

Từ trước đến nay các giải pháp điều khiển tuyến tính, phi tuyến đã và đang ứng dụng để giảm và dập tắt dao động cộng hưởng tại trục nối, và cải thiện hiệu suất của hệ hai khâu quán tính [4]. Theo nghiên cứu tài liệu [5],[6] bộ điều khiển PI thường được sử dụng để điều khiển tốc độ cho hệ 2 hai vật. Bộ điều khiển này được thiết kế theo phương pháp tối ưu đối xứng với phản hồi tốc độ đưa về bộ điều khiển, vì vậy chưa giải quyết được dập dao động cộng hưởng khi hệ thống có nhiễu. Giải pháp để cải thiện bộ điều khiển tốc độ PI cho hệ hai vật, tại mạch vòng phản hồi người thiết kế đưa thêm các biến trạng thái như là hệ số cứng trục, giảm chấn, mô-men tải... về bộ điều khiển. Các tín hiệu phản hồi này cho phép thiết lập giá trị đặt mong muốn, tuy nhiên không thể đặt được giá trị tự do của tần số cộng hưởng [7]. Vì vậy, giải pháp bổ sung tín hiệu phản hồi mô-men trục nối thông qua bộ ước lượng mô-men trục được đưa về bộ điều khiển tốc độ, đã góp phần giảm được dao động cộng hưởng [8]. Bên cạnh đó, một nghiên cứu khác [9], bài báo trình bày bộ điều khiển tốc độ cho hệ hai vật sử dụng là bộ điều khiển PID, PID-P. Bộ điều khiển PID có ưu điểm thiết kế đơn giản, nhanh chóng đưa ra bộ tham số điều chỉnh  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_D$  (khuếch đại, tích phân và vi phân) phù hợp. Bộ điều khiển tốc độ PID-P, cho kết quả khả quan hơn bộ điều khiển PID với đáp ứng động học quá điều chỉnh tốc độ, thời gian xác lập ở chế độ tĩnh nhỏ hơn bộ điều khiển PID. Tuy nhiên bộ cả hai điều khiển này chưa dập được hoàn toàn dao động cộng hưởng. Qua đó nhận nhận thấy rằng, các phương pháp điều khiển tuyến tính chưa giải quyết được vấn đề giảm hiện tượng cộng hưởng. Với ưu điểm của các phương pháp điều khiển phi tuyến như backstepping, tựa phẳng, trượt... đã góp phần giảm dao động cộng hưởng, quá điều chỉnh và thời gian xác lập tốc độ thực của động cơ tải với động cơ khả quan hơn so với các bộ điều khiển tuyến tính. Phương pháp điều khiển tựa phẳng [10], với chuyển đổi mô hình trạng thái thành bộ ĐK dưới dạng đạo hàm dựa bộ điều khiển truyền thẳng (feedforward). Các mô hình trạng thái được dùng để thiết lập quỹ đạo đặt. Các điều kiện giới hạn được đưa vào trong việc thiết kế quỹ đạo đặt. Kết quả của phương pháp ĐK này cho kết quả giảm dao động cộng hưởng, quá điều chỉnh và thời gian xác lập tốt hơn bộ điều khiển PI. Bên cạnh đó, phương pháp điều khiển backstepping [11], cho thấy thiết kế bộ điều khiển không phức tạp, cho phép tính dần qua một số bước, bộ điều khiển phản hồi làm hệ kín ổn định theo Lyapunov. Ở mỗi bước tiến hành lựa chọn biến điều khiển ảo và thiết kế các luật điều khiển trung gian, nhằm ổn định hệ con của hệ ban đầu. Kết quả cho thấy kiểm soát tốt dao động cộng hưởng và tốc độ tải thực bám sát với tốc độ thực động cơ. Tuy nhiên khi hệ thống bị ảnh hưởng nhiễu (thông số động cơ, mô men quán tính... thay đổi) thì phương pháp điều khiển backstepping cho kết quả dập tắt dao động cộng hưởng không tốt bằng phương pháp điều khiển tựa phẳng [12]. Mặt khác, bộ điều khiển trượt [13] với đặc điểm dẫn hệ thống ổn định theo một mặt trượt, khi sai lệch giữa tốc độ

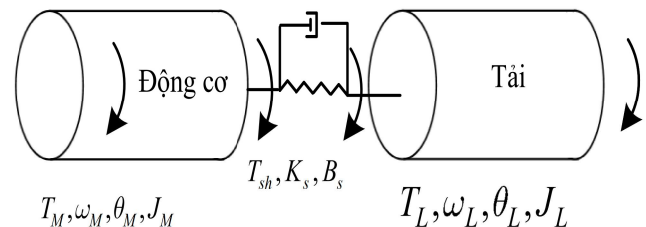
đặt và thực nhỏ nhất. Đây là một phương pháp điều khiển phi tuyến đơn giản, tuy nhiên trong bộ ĐK này có dạng hàm dẫu và có hiện tượng rung (chattering) trong hệ thống. Đây là một hiệu ứng nguy hiểm và là nguyên nhân làm giảm tuổi thọ nhiều thiết bị trong hệ thống. Tuy nhiên những năm gần đây đã có nghiên cứu giải pháp chống rung, cũng đã thu được kết quả ứng dụng mang tính thực tế.

Hiện nay, các phương pháp điều khiển để giảm dao động cộng hưởng cho hệ hai vật đa dạng, tuy nhiên mỗi phương pháp có đặc điểm riêng, vẫn chưa giải quyết triệt để dao động cộng hưởng tại trục và điều chỉnh tốc độ theo yêu cầu (nhanh, chính xác). Trong bài báo này sẽ trình bày thiết kế backstepping - trượt điều khiển tốc độ kết hợp bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO cho mô-men tải của hệ hai vật. Bởi vì mô men tải là đại lượng khó xác định chính xác, vì vậy trong nghiên cứu này mô - men tải được coi là nhiễu ít nhiều làm suy giảm chất lượng hệ hai vật. Giải pháp điều khiển này sẽ được so sánh với bộ điều khiển thông dụng trong công nghiệp PI [7], nhằm đánh giá tính đúng đắn của giải pháp điều khiển đề xuất.

Bài báo được chia ra các phần như sau, trong đó mục 2 nói về mô hình hệ hai vật, mục 3 trình bày thiết kế bộ điều khiển tốc độ backstepping- trượt, mục 4 đưa ra phần thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO cho mô-men tải, cuối cùng là đánh giá, phân tích kết quả mô phỏng off-line Matlab/Simulink. Đây là một kết quả nghiên cứu điều khiển tốc độ hệ hai vật, sao cho giảm được dao động cộng hưởng và cải thiện độ bền vững của hệ thống.

## 2. Mô hình hệ hai vật

Mô hình hệ hai vật được xây dựng có dạng cấu trúc như [5],[12]:



**Hình 1:** Cấu trúc của hệ hai vật.

Mô hình toán học hệ hai vật như sau:

$$\begin{cases} T_{sh} = \frac{K_s}{s} (\omega_M(s) - \omega_L(s)) \\ \omega_M(s) = \frac{1}{J_M s} (T_M - T_{sh}) \\ \omega_L(s) = \frac{1}{J_L s} (-T_L + T_{sh}) \end{cases} \quad (1)$$

Mô hình toán học (1) có các biến trạng thái là  $\omega_M, \omega_L$ , biến đầu vào là mô men động cơ  $T_M$ , biến đầu vào có thể đo được là tốc độ động cơ  $\omega_M$ .

Từ mô hình toán (1), cấu trúc mô hình toán hệ hai vật được thể hiện tại hình 2.

Mô hình toán học hệ hai vật (1) sẽ đưa về dạng mô hình trạng thái như công thức (2):

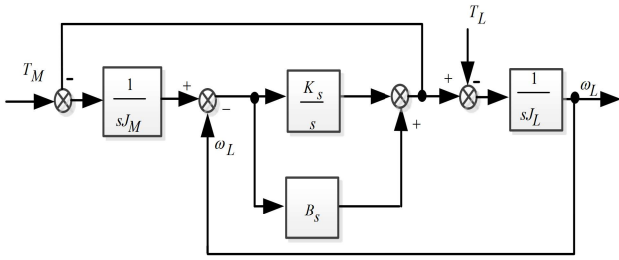
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 T_L + B_2 T_M \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó các tham số được xác định bởi các ma trận như sau:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J_M} & 0 \\ K_s & 0 & -K_s \\ 0 & \frac{1}{J_L} & 0 \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{J_L} \end{bmatrix}^T; B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$x = [\omega_M \quad T_{sh} \quad \omega_L]^T$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 1]$$



Hình 2: Cấu trúc mô hình toán hệ hai vật.

### 3. Thiết kế Backstepping- trượt điều khiển tốc độ

Phương pháp thiết kế backstepping thường xem xét tính ổn định của toàn hệ thống theo Lyapunov. Phương pháp điều khiển này yêu cầu mô hình toán học hệ hai vật chính xác và đáp ứng động học hệ thống phụ thuộc vào tác động của nhiễu. Vì vậy bộ điều khiển backstepping - trượt kết hợp bộ quán trạng thái mở rộng ESO được đề xuất để khắc phục hạn chế của bộ điều khiển backstepping. Thiết kế bộ điều khiển tốc độ của hệ hai vật được thực hiện theo các trình tự như sau:

*Bước 1: Xác định mô-men xoắn trực đặt*

Xuất phát từ phương trình (1) và vận dụng lý thuyết Backstepping, sai lệch góc tốc độ góc thực với giá trị đặt được xác định theo công thức (3):

$$e_L = \omega_L - \omega_{Ld} \quad (3)$$

Theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov, cần tồn tại hàm  $V_1$  xác định dương để (3) ổn định tại gốc tọa độ. Vậy hàm  $V_1$  được lựa chọn như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_L^2 \quad (4)$$

Đạo hàm hàm  $V_1$  như công thức (5):

$$\dot{V}_1 = e_L \dot{e}_L = e_L (\dot{\omega}_L - \dot{\omega}_{Ld}) = e_L \left( \frac{1}{J_L} (T_s - T_L) - \dot{\omega}_{Ld} \right) \quad (5)$$

Trong công thức (5),  $T_{sd}$  là biến điều khiển ảo, vậy mô men xoắn trực đặt được tính toán theo (6):

$$T_{sd} = \hat{T}_L - J_L (-\dot{\omega}_{Ld} + c_1 e_L) \quad (6)$$

Trong đó:  $\hat{T}_L$  mô-men tải ước lượng qua bộ quan sát mở rộng ESO, sẽ được trình bày chi tiết tại mục 4.

*Bước 2: Xác định góc quay tốc độ đặt của tải*

Sai số mô-men xoắn trực nói như:

$$e_{Ts} = T_s - T_{sd} \quad (7)$$

Thay thế phương trình (6) vào (5), phương trình (8) như sau:

$$\dot{V}_1 = e_L \left( \frac{1}{J_L} (e_{Ts} + T_{sd} - T_L) - \dot{\omega}_{Ld} \right) \quad (8)$$

$$= -c_1 e_L^2 + \frac{1}{J_L} e_L e_{Ts} + \frac{1}{J_L} e_L (\hat{T}_L - T_L)$$

Theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov,  $V_2$  được xác định như:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_{Ts}^2 \quad (9)$$

Đạo hàm  $V_2$ :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_{Ts} \dot{e}_{Ts} \\ &= -c_1 e_L^2 + \frac{1}{J_L} e_L e_{Ts} + e_{Ts} \dot{e}_{Ts} \\ &= -c_1 e_L^2 + e_{Ts} \left( \frac{1}{J_L} e_L + \dot{T}_s - \dot{T}_{sd} \right) \\ &= -c_1 e_L^2 + e_{Ts} \left( \frac{1}{J_L} e_L + K_s (\omega_M - \omega_L) - \dot{T}_{sd} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Vậy tốc góc quay tốc độ đặt được thể hiện qua (11):

$$\omega_{Md} = \frac{\dot{T}_{sd} - c_2 e_2}{K_s} - \frac{1}{J_L K_s} e_1 + \omega_L \quad (11)$$

*Bước 3: Xác định mô men thực của động cơ*

Tại bước thiết kế này tiến hành lựa chọn mặt trượt có dạng như sau:

$$e_M = \alpha (\omega_M - \omega_{Md}) \quad (12)$$

Theo Lyapunov với mặt trượt thì hàm  $V$  được lựa chọn như:

$$V = V_2 + \frac{1}{2} s^2 \quad (13)$$

Tiến hành đạo hàm hàm  $V$  như (14):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 + e_M \dot{e}_M \\ &= -c_1 e_L^2 - c_2 e_{Ts}^2 + e_M \alpha (\dot{\omega}_M - \dot{\omega}_{Md}) \\ &= -c_1 e_L^2 - c_2 e_{Ts}^2 + e_M \alpha \left( \frac{1}{J_M} (T_M - T_s) - \dot{\omega}_{Md} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Vậy mô-men thực động cơ được tính toán như (15):

$$T_M = J_M \dot{\omega}_{Md} + T_s - \frac{J_M}{\alpha} (c_3 \operatorname{sgn}(e_3) + c_4 e_3) \quad (15)$$

### 4. Thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO

Theo tài liệu [14] thì bộ quan sát trạng thái với mô hình (16) và cấu trúc bộ quan sát hình 3:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó:

A, B là ma trận của biến trạng thái và điều khiển.

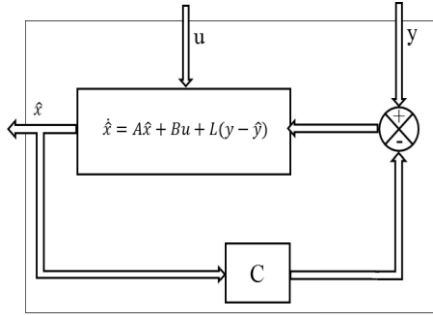
L là ma trận độ lợi quan sát cần được lựa chọn phù hợp.

C là ma trận đầu ra.

$\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  là ước lượng biến trạng thái  $x$  và đầu ra  $y$ .

$(y - \hat{y})$  là sai số quan sát thể hiện sự khác nhau giữa ngõ ra đo được thực tế  $y(t)$  và ngõ ra  $\hat{y} = C\hat{x}$ .

Thành phần thêm vào  $L(y - \hat{y})$  cung cấp một sự điều chỉnh chủ động ngay khi sai số của sự quan sát là khác 0. Vì vậy bộ quan sát trạng thái được thiết kế sao cho sai số ước lượng  $e(t) \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ , bằng cách tính toán ma trận  $L$  sao cho sai số ước lượng  $e(t)$  ổn định tiệm cận khi tất cả các nghiệm của phương trình đạo hàm sai số  $\dot{e}$  nằm bên trái mặt phẳng phức. Sai số ước lượng  $e(t)$  đóng vai trò là đáp ứng của bộ quan sát.



Hình 3: Bộ quan sát trạng thái.

Trong hình 3, thấy bộ quan sát có hai tín hiệu vào là  $u, y$  và một tín hiệu ra là  $\hat{x}$ . Bộ quan sát là tạo ra ước lượng  $\hat{x}$  sao cho  $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$  khi  $t \rightarrow \infty$ . Sai số ước lượng của bộ quan sát được định nghĩa:

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (17)$$

Bộ quan sát được thiết kế sao cho  $\tilde{x}(t) \rightarrow 0$ . Nếu hệ quan sát được thì ma trận  $L$  được xác định, sao cho sai số ước lượng  $\tilde{x}(t)$  ổn định tiệm cận. Sai số ước lượng  $\tilde{x}(t)$  đóng vai trò là đáp ứng của bộ quan sát.

Đạo hàm sai số ước lượng (16) có kết quả như (18)

$$\dot{\tilde{x}} = A(x - \hat{x}) - LC(x - \hat{x}) = (A - LC)\tilde{x} \quad (18)$$

Mục tiêu thiết kế bộ quan sát là tìm ma trận khuếch đại quan sát  $L$  sao cho tất cả các nghiệm của phương trình  $|sI - (A - LC)| = 0$  nằm bên trái mặt phẳng phức. Vì vậy ma trận  $L$  được xác định như (19):

$$|sI - (A - LC)| = s^4 + s^3\beta_1 + s^2\beta_2 + s\beta_3 + \beta_4 = (s + w_0)^4 \quad (19)$$

Trong đó  $\beta_1 = 4w_0, \beta_2 = 6w_0^2, \beta_3 = 4w_0^3, \beta_4 = w_0^4$

là các thành phần số hạng của ma trận  $L$  của bộ quan sát. Các thành phần này được lựa chọn bằng phương pháp gán điểm cực với tất cả các điểm cực của hệ chung tại  $-w_0$  nằm bên trái trục ảo.

Bên cạnh đó đối với hệ hai vật để ước lượng nhiều tải thông qua ma trận chuyển đổi  $T$  như công thức (20):

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -J_M & 0 \\ 1 & 0 & J_M / K_s \end{bmatrix} \quad (20)$$

Đặt  $x^* = T^{-1}x$ . Vậy phương trình không gian trạng thái được viết lại như công thức (21).

$$\begin{cases} \dot{x}_1^* = x_2^* + T_M / J_M \\ \dot{x}_2^* = x_3^* \\ \dot{x}_3^* = x_4^* - K_s T_M / J_M^2 \\ \dot{x}_4^* = h \\ y = x_1^* \end{cases} \quad (21)$$

Trong đó:  $x_1^*, x_2^*, x_3^*$  các biến trạng thái

$$\text{Thành phần nhiễu } x_4^* = \left(-\frac{K_s / J_M}{J_M} - \frac{K_s}{J_L}\right)x_2^* - \frac{K_s T_L}{J_M J_L}$$

$h$  là trạng thái chưa biết, có thể được ước lượng bằng bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO.

Khi đó, các giá trị của các trạng thái hệ thống sẽ được tính toán lại là  $x = T_x^*$  và giá trị mô men tải sẽ được tính theo (22).

$$\hat{T}_L = [-x_4^* + \left(-\frac{K_s}{J_M} - \frac{K_s}{J_L}\right)x_2^*] \frac{J_M J_L}{K_s} \quad (22)$$

Vì vậy mô hình quan sát được đưa về dạng công thức (23):

$$\begin{cases} \dot{x}^* = A^* x^* + B^* u + E h \\ y = C^* x^* \end{cases} \quad (23)$$

Trong đó:

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B^* = \begin{bmatrix} 1 / J_M \\ 0 \\ -K_s / J_M^2 \\ 0 \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C^* = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

## 5. Kết quả mô phỏng

Cấu trúc backstepping- trượt điều khiển tốc độ kết hợp bộ quan sát ESO cho hệ hai vật như hình 4.

Kết quả mô phỏng được thực hiện theo thông số như Bảng 1.

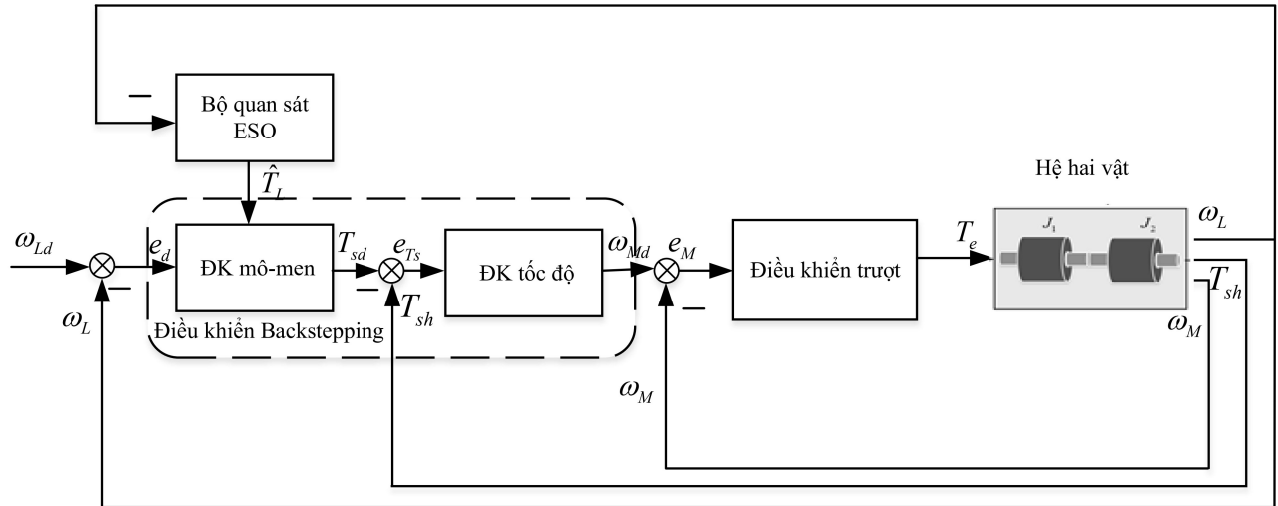
Bảng 1. Bảng thông số dùng trong các mô phỏng

| Thông số             | Ký hiệu | Giá trị                                 |
|----------------------|---------|---|
| Mô-men quán tính IM  | $J_M$   | 1552 Kgm <sup>2</sup>                   |
| Mô-men quán tính tải | $J_L$   | 1542 Kgm <sup>2</sup>                   |
| Hệ số cứng trục      | $K_s$   | $5.931 \cdot 10^6$ Nmmrad <sup>-1</sup> |
| Hệ số giảm chấn      | $B_s$   | 0                                       |

Kết quả mô phỏng theo kịch bản mô phỏng và nội dung phân tích đánh giá như sau:

+ Tại  $t = 0, 1s$  tăng tốc đến giá trị định mức 10 rad/s với giả thiết quá trình từ hóa đã hoàn thành.

+ Tại  $t = 1s$  đóng tải định mức.



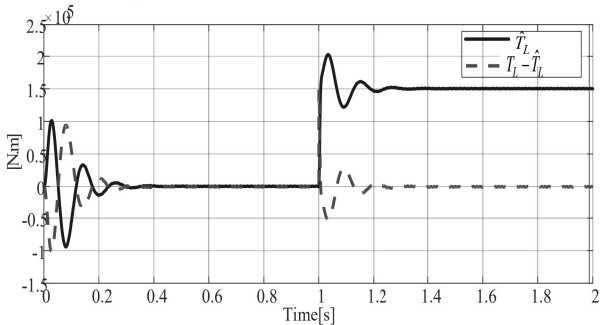
**Hình 4:** Cấu trúc Backstepping- trượt điều khiển tốc độ kết hợp bộ quan sát ESO cho hệ hai vật.

**5.2 Đánh giá kết quả bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO**

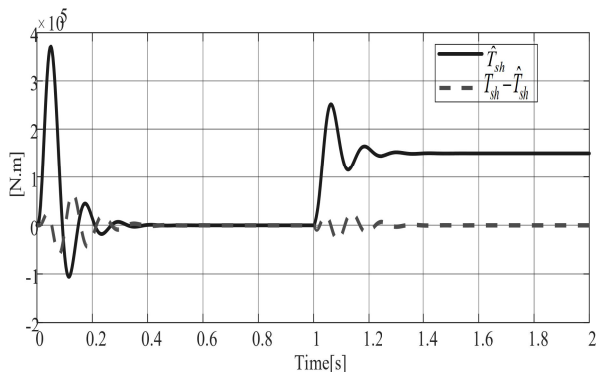
Thông số mô phỏng và kích bản mô phỏng, bộ điều khiển tốc độ Backstepping-trượt như bảng B1. Các tham số của bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO thu được như sau:

$$\begin{aligned}
 w_0 &= 1000 \\
 \beta_1 &= 4w_0 = 4 * 10^3 \\
 \beta_2 &= 6w_0^2 = 6 * 10^6 \\
 \beta_3 &= 4w_0^3 = 4 * 10^9 \\
 \beta_4 &= w_0^4 = 10^{12}
 \end{aligned}$$

Bài báo đưa ra kết quả mô phỏng đáp ứng sai số mô-men tải, mô-men trục nối thực với giá trị ước lượng được thể hiện qua hình 5 và hình 6.



**Hình 5.** Đáp ứng tốc mô-men tải  $\hat{T}_L$  và sai số mô-men  $T_L - \hat{T}_L$



**Hình 6.** Đáp ứng tốc mô-men trục nối  $\hat{T}_{sh}$  và sai số mô-men trục nối  $T_{sh} - \hat{T}_{sh}$

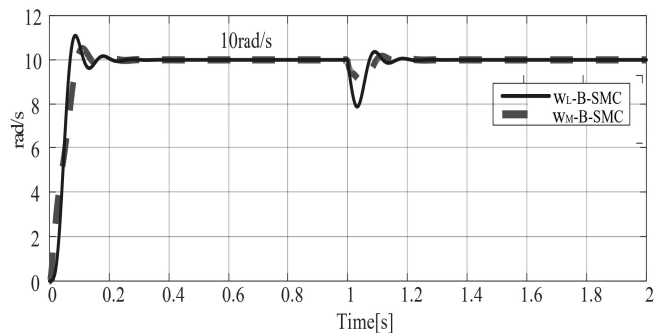
Từ kết quả mô phỏng hình 5 và hình 6 nhận thấy rằng tại thời điểm ban đầu (tại \$t=0s\$) đáp ứng ước lượng mô-men tải và mô-men trục nối xuất hiện dao động tương đối lớn (35%), tuy nhiên các đáp ứng ước lượng mô-men này sau 0.3s nhanh chóng bám sát với giá trị thực, bên cạnh đó đáp ứng sai lệch ước lượng mô-men cũng cho thấy giá trị sai lệch nhanh chóng giảm về 0 sau 0.2s. Với trường hợp đóng tải định mức tại \$t=1s\$, kết quả giá trị mô-men ước lượng tương tự như đáp ứng ước lượng mô-men tải và mô-men xoắn, tuy nhiên vẫn tồn tại sự dao động nhưng là giá trị nhỏ và nhanh chóng bám sát giá trị thực. Qua đó nhận thấy rằng bộ quan sát biên trạng thái ESO cho kết quả đáng tin cậy, thực hiện thiết kế nhanh, đơn giản.

**5.3 Đánh giá kết quả bộ điều khiển Backstepping-trượt kết hợp ESO với PI**

Bộ điều khiển backstepping-trượt với các hệ số  $c_1=15, c_2=60, c_3=30, c_4=25$

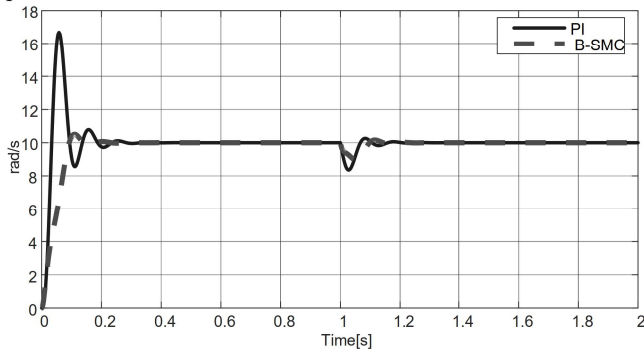
Bộ điều khiển PI với  $K_p=20; K_i=0.9$ .

Với kích bản mô phỏng, kết quả mô phỏng đáp ứng tốc độ động cơ và tốc độ tải của bộ điều khiển được thể hiện qua hình 7. Từ kết quả mô phỏng hình 7 nhận thấy đáp ứng tốc độ động cơ và tải của bộ điều khiển backstepping-trượt đã dập tắt dao động cộng hưởng, tuy nhiên vẫn còn dao động nhỏ với độ quá điều chỉnh 10%, tại thời điểm khởi động và 15% tại thời điểm đóng tải tại định mức và thời gian xác lập là 0.22s trong cả hai trường hợp khởi động và đóng tải định mức vào hệ hai vật.

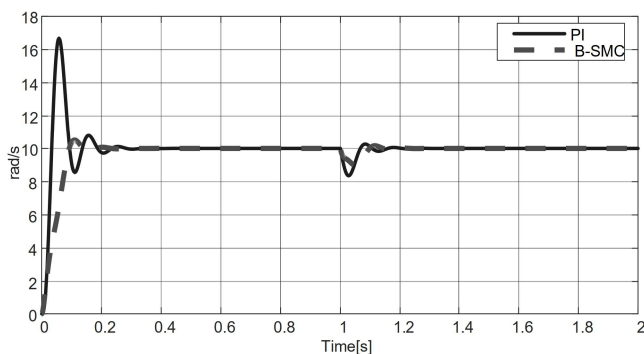


**Hình 7.** Đáp ứng tốc độ động cơ và phụ tải bộ ĐK Backstepping-trượt.

Để kiểm chứng tính đúng đắn của lý thuyết, phương pháp điều khiển đề xuất sẽ được so sánh với bộ điều khiển PI [6]. Kết quả mô phỏng của hai phương pháp điều khiển được thể hiện qua hình 8 và 9.



Hình 8: Đáp ứng tốc độ động cơ theo điều khiển Backstepping-trượt và PI.



Hình 9: Đáp ứng tốc độ tải theo điều khiển Backstepping-trượt và PI.

Qua hình 8 và 9 nhận thấy đáp ứng tốc độ động cơ-tải của bộ điều khiển backstepping-trượt có kết quả khả quan hơn bộ điều khiển PI như quá điều chỉnh tốc độ nhỏ 10%, thời gian xác lập 0.18s tại thời điểm khởi động và đóng tải định mức vào hệ thống, trong khi đó bộ điều khiển PI có độ quá điều chỉnh tại thời điểm khởi động lớn (62,5%) và 13% khi tải định mức, thời gian xác lập 2,5s. Tuy nhiên bộ điều khiển backstepping-trượt kết hợp bộ quan sát ESO tại thời điểm quá độ đáp ứng tốc độ vẫn tồn tại độ quá điều chỉnh tại quá trình và thời gian ổn định còn chậm. Bên cạnh đó, thiết kế bộ điều khiển tốc độ theo backstepping-trượt phức tạp, nhiều điều kiện ràng buộc hơn bộ điều kiện PI và chưa giải quyết bài toán chống rung cho bộ điều khiển trượt.

## 6. Kết luận

Bộ điều khiển backstepping-trượt kết hợp bộ quan sát ESO là một giải pháp điều khiển hệ hai vật đã giải quyết vấn đề tốc độ động cơ tải bám sát tốc độ động cơ, khắc phục hiện tượng dao động của khớp mềm và tăng độ bền vững, giảm sự công kênh của hệ thống và chi phí thiết bị đo lường mà vẫn đảm bảo thông số quan sát chính xác. Tuy nhiên đáp ứng tốc độ vẫn tồn tại độ quá điều chỉnh tại quá trình quá độ và thời gian ổn định chậm. Đây sẽ là hướng giải quyết của bài báo tiếp tục cải thiện bộ điều khiển backstepping-trượt kết hợp bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO bằng bổ sung thêm bộ điều khiển trượt chống rung, hay điều khiển thích nghi mặt trượt trong tương lai. Bài báo này là một công trình nghiên cứu khoa học khác đã góp phần thêm vào việc hoàn thiện các nghiên cứu điều khiển tốc độ hệ hai vật trong lý thuyết.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp trường Đại học Giao thông vận tải, mã số : T2021-DT-010.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Arellano-Padilla, G. M. Asher, and M. Sumner. (2006) Control of a dynamometer for dynamic emulation of mechanical loads with stiff and flexible shafts, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp.1250–1260.
- [2] Đồ Kiên Quốc Sức bền vật liệu, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh, 2009, pp. 212-223.
- [3] Luận án tiến sỹ Võ Thanh Hà, Nghiên cứu tổng hợp cấu trúc điều khiển véc tơ truyền động động cơ không đồng bộ với tải có khớp nối mềm, năm 2019
- [4] Mohd Yakub, Abdul Qadir, B.A. Aminudin, Comparative Study on Control Method for Two-Mass Systems, *International Journal on advanced Science Engineering Information Technology*, Vol. 2 (2012) No. 3
- [5] G. Zhang and J. Furusho. (2000) Speed control of two-inertia system by PI/PID control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 3, pp. 603–609.
- [6] Ghazanfer Shahgholian, Jawad Faiz, Pegah Shafaghli Analysis and Simulation of Speed Control for Two-Mass Resonant System, 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering.
- [7] K. Szabat and T. Orłowska-Kowalska. (2007) Vibration suppression in two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks- Comparative study, *IEEE Trans.Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 1193–1206.
- [8] M. A. Valenzuela, J. M. Bentley, and R. D. Lorenz, Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 493–501.
- [9] G. Zhang and J. Furusho. (2000) Speed control of two-inertia system by PI/PID control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 3, pp. 603–609.
- [10] S. Thomsen, F. W. Fuchs (2011). Flatness Based Speed Control of Drive Systems with Resonant Loads, *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Aug. 30 2011-Sept. 2011.
- [11] Mirhamed Mola, Alireza Khayatian, Maryam Dehghani. Backstepping Position Control of Two-Mass Systems with Unknown Backlash, 2013 9th Asian Control Conference (ASCC).
- [12] Vo Thanh Ha, Nguyen Tung Lam, Vo Thu Ha, Hardware-in-the-loop based comparative analysis of speed controllers using nonlinear control for two-mass system using induction motor drive fed by voltage source inverter with ideal control performance of stator current, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, Vol.10 N02, ISSN 2302-9285, page 569-579, 4/2021
- [13] Jacek KABZINSKI, Przemysław MOSIOLEK, Adaptive Control of Two-Mass Drive System with Nonlinear Stiffness, 2013 9th Asian Control Conference (ASCC).
- [14] R. Peter, I. Schoeling, and B. Orlik, (2003). Robust output-feedback H1 control with a nonlinear observer for a two-mass system.
- [15] Weiwen Wang and Zhiqiang Gao, A Comparison Study of Advanced State Observer Design Techniques, *American Control Conference*, 6/2003.