

SYNTHETIC TRACKING CONTROLLER FOR ELASTIC JOINT ELECTRIC DRIVE SYSTEM USING PMSM MOTOR BASED ON SLIDING MODE CONTROL AND DISTURBANCE OBSERVER

Nguyen Van Hai¹, Tran Duc Chuyen^{2*}, Nguyen Thi Binh Yen³, Do Thi Ha³

¹Phu Tho College of Technology and Agroforestry

²University of Economics - Technology for Industries

³Lao Cai College

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	27/3/2025	This paper presents the problem of synthesizing the controller of the electric drive system for industrial machines with elastic joint structure using permanent magnet synchronous motors based on the sliding mode control method combined with the disturbance observer to estimate the disturbance and nonlinear components to provide information and create control laws. The paper has specified the steps of synthesizing the controller and demonstrated the stability of the synthesized controller based on the Lyapunov stability theory. The control goal is to ensure that the end point trajectory of the working mechanism closely follows the set trajectory after a certain period of time. The research results are verified on Matlab - Simulink software, showing that the set value and the response value at the output of the system always closely follow with small errors, which proves that the quality of the synthesized controller can be applied in current practice.
Revised:	08/4/2025	
Published:	12/4/2025	
KEYWORDS		
Sliding mode		
Elastic joint		
Disturbance observer		
PMSM motor		
Tracking controller		

TỔNG HỢP ĐIỀU KHIỂN HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN BẮM KHỚP ĐÀN HỒI SỬ DỤNG ĐỘNG CƠ PMSM TRÊN CƠ SỞ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VÀ BỘ QUAN SÁT NHIỄU

Nguyễn Văn Hải¹, Trần Đức Chuyền^{2*}, Nguyễn Thị Bình Yên³, Đỗ Thị Hà³

¹Trường Cao đẳng Công nghệ và Nông lâm Phú Thọ, ²Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

³Trường Cao đẳng Lào Cai

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	27/3/2025	Bài báo này trình bày vấn đề tổng hợp bộ điều khiển hệ thống truyền động điện bám cho các máy công nghiệp có cấu trúc khớp đàn hồi sử dụng động cơ đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu trên cơ sở phương pháp điều khiển trong chế độ trượt kết hợp bộ quan sát nhiễu để ước lượng các thành phần nhiễu loạn, phi tuyến nhằm cung cấp thông tin, tạo luật điều khiển. Bài báo đã cụ thể hóa các bước tổng hợp bộ điều khiển và chứng minh tính ổn định của bộ điều khiển tổng hợp được trên cơ sở lý thuyết ổn định Lyapunov. Mục tiêu điều khiển là đảm bảo quỹ đạo điểm cuối cơ cấu công tác bám sát theo quỹ đạo đặt sau một khoảng thời gian nhất định. Kết quả nghiên cứu được kiểm chứng trên phần mềm Matlab - Simulink cho thấy giá trị đặt và giá trị đáp ứng ở đầu ra của hệ thống luôn bám sát với sai số nhỏ, điều này đã chứng minh chất lượng bộ điều khiển đã tổng hợp có thể áp dụng vào thực tế hiện nay.
Ngày hoàn thiện:	08/4/2025	
Ngày đăng:	12/4/2025	
TỪ KHÓA		
Điều khiển trượt		
Khớp đàn hồi		
Quan sát nhiễu		
Động cơ PMSM		
Điều khiển bám		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12405>

* Corresponding author. Email: tdchuyen@uneti.edu.vn

1. Mở đầu

Trong các máy công nghiệp như máy tiện, phay, máy CNC, tay máy robot..., để nhận được chuyển động trên các cơ cấu công tác của các máy công nghiệp, một cơ cấu truyền chuyển động từ các động cơ chấp hành tới các cơ cấu chuyển động là cần phải lựa chọn. Tùy theo cấu trúc, ứng dụng, công suất, yêu cầu công nghệ, yêu cầu chất lượng điều chỉnh mà người ta lựa chọn các cấu trúc truyền động điện phù hợp. Tùy theo cấu trúc truyền động được lựa chọn mà trong hệ thống có thể xuất hiện các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng làm việc của hệ thống như yếu tố trượt, ma sát, khe hở, đàn hồi. Các vật liệu nói chung dù ít hay nhiều đều có tính đàn hồi vì vậy các bộ điều khiển truyền động điện, luôn luôn tùy theo cấu trúc và vật liệu chế tạo, dạng đặc tính của tải có thể xuất hiện hiện tượng đàn hồi, phi tuyến, v.v. [1] - [5].

Trong các máy công nghiệp, vấn đề biến dạng đàn hồi tồn tại trong các khớp bởi hai lý do chính [6] là sử dụng các bộ truyền chuyển động không trực tiếp; giảm khối lượng các cơ cấu liên kết truyền chuyển động, sử dụng vật liệu nhẹ và thiết kế nhỏ gọn. Tùy theo cấu trúc của các máy công nghiệp mà người ta sẽ lựa chọn phương án dẫn động trực tiếp hoặc không trực tiếp. Dù lựa chọn theo phương án truyền động nào thì các bộ phận truyền động như các bánh răng, các trục truyền động, các đai truyền, v.v. là không thể thiếu được khi thiết kế chế tạo các cấu trúc truyền động. Trong một số trường hợp như các máy công nghiệp làm việc với tốc độ chậm và lực tương tác nhỏ thì các yếu tố biến dạng đàn hồi trong các bộ phận truyền động có thể bỏ qua [6]-[8], trong trường hợp yêu cầu độ chính xác cao, tốc độ cao và lực tương tác lớn thì ngay cả khi đã lựa chọn kỹ cấu trúc truyền động trực tiếp, thì yếu đàn hồi vẫn có thể tồn tại dù rất nhỏ và có thể ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển của đối tượng [9] - [12]. Ngoài những yếu tố nêu trên, tính đàn hồi có thể được thiết kế để giải quyết các yếu tố khác của động học như độ mềm hóa của cơ cấu công tác, giảm sự tương tác giữa bề mặt gia công (va chạm tiếp xúc) và cơ cấu công tác, tăng khả năng mang tải của hệ thống, giảm tiêu thụ năng lượng và tiết kiệm năng lượng, v.v. Với những vấn đề như vậy, việc phân tích động học và điều khiển của máy công nghiệp có cấu trúc khớp đàn hồi đã được phát sinh như là một nhiệm vụ hấp dẫn cho nhiều nghiên cứu [2] - [5].

Như vậy trong việc thiết kế các bộ truyền động của máy công nghiệp, yếu tố đàn hồi có thể cần phải chủ động tạo ra để giải quyết những vấn đề của chuyển động hoặc yếu tố đàn hồi không mong muốn do cấu trúc bộ truyền động tạo ra, vì vậy trong điều khiển hệ thống máy công nghiệp với các khớp đàn hồi ta vừa cần phải xây dựng các thuật toán để chế áp sự rung động do yếu tố đàn hồi mang lại vừa có thể tận dụng các yếu tố này để giảm thiểu, dung hòa các yếu tố phi tuyến, nhiễu loạn như phản lực gia công, quán tính của hệ thống, sự tương tác với môi trường. Khi xét đến sự ảnh hưởng của yếu tố đàn hồi của bộ truyền động thì bậc của hệ thống điều khiển tăng lên, việc tổng hợp điều khiển cho hệ thống như vậy trở nên khó khăn hơn rất nhiều. Ngoài ra, trong các hệ thống truyền động điện hiện đại các động cơ điện một chiều có chất lượng điều khiển tốt, cấu trúc đơn giản nhưng yêu cầu phải bảo dưỡng thường xuyên, dễ phát sinh tia lửa, không phù hợp trong những môi trường dễ cháy nổ. Để khắc phục các hạn chế nêu trên, các động cơ điện không sử dụng chổi than được ưu tiên lựa chọn như động cơ Servo, động cơ bước, động cơ BLDC (Brushless DC motor: động cơ một chiều không chổi than), động cơ PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor: động cơ đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu). Động cơ PMSM sử dụng nam châm vĩnh cửu, có độ chính xác cao, đảm bảo được mô men và dòng điện trong điều khiển, hiệu suất làm việc, độ bền cao được sử dụng phổ biến [1], [2], [4], [8], [11].

Với những vấn đề như vậy, bài báo đề xuất thuật toán điều khiển trượt kết hợp bộ quan sát nhiễu áp dụng cho điều khiển hệ truyền động điện bám trong máy công nghiệp sử dụng khớp đàn hồi và động cơ PMSM nhằm giải quyết những vấn đề đã nêu ở trên.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Xây dựng mô hình động học hệ truyền động điện tám khớp đàn hồi sử dụng động cơ PMSM

Theo phương pháp Lagrange, mô hình hệ truyền động điện tám khớp đàn hồi sử dụng động cơ PMSM [1], [12] được xây dựng như sau:

$$\begin{aligned} J_t \ddot{q}_t + k(q_m - q_t) + b(\dot{q}_m - \dot{q}_t) + d_{11} &= -M_t \\ J_m \ddot{q}_m + k(q_m - q_t) + b(\dot{q}_m - \dot{q}_t) + d_{12} &= M_m \\ \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p_n \dot{q}_m i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p_n \omega_m i_d - \frac{\psi p_n \omega_m}{L_q} \\ M_m &= \frac{3}{2} p_n [\psi i_q + (L_d - L_q) i_q i_q] \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó q_m, q_t tương ứng là vị trí của trục động và tải; J_m, J_t tương ứng là mô men quán tính của động cơ điện và của tải; k là hệ số đàn hồi và b là hệ số tắt dần; v_d, v_q, i_d, i_q tương ứng là điện áp và dòng điện stato ở trục d và q ; L_d, L_q là cảm ứng từ cuộn stator ở trục d, q ; R là điện trở cuộn dây; p_n là số đôi cực từ; ψ là từ thông rô to.

Đối với động cơ PMSM, khi mô tả trong không gian dq áp dụng phương pháp điều khiển vector. Khi đó giá trị đặt của dòng điện i_d^* được đặt bằng không [3], [6] để tối ưu hiệu suất hoạt động, tối đa hóa mô men điện từ theo dòng điện. Nếu các thông số bộ điều khiển được chọn lựa tốt, ta sẽ nhận được $i_d = i_d^* = 0$, khi đó mô men điện từ chỉ phụ thuộc vào dòng điện i_q [3], [6].

Trong trường hợp này, hệ thống (1) được đơn giản như hệ (2).

$$\begin{aligned} J_t \ddot{q}_t + k(q_m - q_t) + b(\dot{q}_m - \dot{q}_t) + d_1 &= -M_t \\ J_m \ddot{q}_m + k(q_m - q_t) + b(\dot{q}_m - \dot{q}_t) + d_2 &= K_t i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{\psi p_n \dot{q}_m}{L_q} \end{aligned} \quad (2)$$

Đặt $x_1 = q_t; x_2 = \dot{q}_t; x_3 = q_m; x_4 = \dot{q}_m; x_5 = i_q$, qua một số phép biến đổi và đặt

$$\begin{aligned} f_1 &= -x_3 + \frac{1}{J_t} [k(x_1 - x_3) + c(x_2 - x_4) - M_t - d_{11}] \\ f_2 &= -x_5 + \frac{1}{J_m} [k(x_1 - x_3) + c(x_2 - x_4) - K_t x_5 - d_{12}] \\ f_3 &= \frac{1}{L_q} [-R x_5 - \psi p_n c x_4]; b = \frac{1}{L_q} \end{aligned} \quad (3)$$

Ta nhận được phương trình mô tả hệ (2) trong không gian trạng thái

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + f_1 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= x_5 + f_2 \\ \dot{x}_5 &= b u + f_3 \end{aligned} \quad (4)$$

2.2. Tổng hợp thuật toán điều khiển trượt hệ truyền động điện tám khớp đàn hồi sử dụng động cơ PMSM có cấu trúc khớp đàn hồi với ước lượng nhiễu loạn, bất định

Tổng hợp thuật toán điều khiển trượt hệ truyền động điện tám khớp đàn hồi sử dụng động cơ PMSM có cấu trúc khớp đàn hồi với ước lượng nhiễu loạn, bất định, ta định nghĩa các mặt trượt như sau:

$$s_i = x_i - x_{id}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (5)$$

Với x_{id} là giá trị mong muốn của các biến trạng thái x_i . Áp dụng đối với hệ (4), bộ điều khiển được tổng hợp qua các bước sau:

Bước 1. Định nghĩa mặt trượt s_1 .

$$s_1 = x_1 - x_{1d} \quad (6)$$

Với $x_{1d} = y_d$ là giá trị trạng thái đầu ra, vì phân phương trình (6) ta được:

$$\dot{s}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = x_2 - \dot{y}_d \quad (7)$$

Định nghĩa mặt trượt s_2

$$s_2 = x_2 - x_{2d} \quad (8)$$

Khi đó $\dot{s}_1 = s_2 + x_{2d} - \dot{y}_d$ (9)

Coi x_{2d} là điều khiển ảo của phương trình (9) và ta chọn

$$x_{2d} = \dot{y}_d - k_1 \frac{s_1}{\vartheta_1} \quad (10)$$

Với $k_1 > 0, \vartheta_1 > 0$ là độ dày lớp biên của mặt trượt $s_1 = 0$. Thay (10) vào (9) ta được

$$\dot{s}_1 = s_2 + \dot{y}_d - k_1 \frac{s_1}{\vartheta_1} - \dot{y}_d = s_2 - k_1 \frac{s_1}{\vartheta_1} \quad (11)$$

Bước 2. Vì phân theo thời gian phương trình (8), định nghĩa mặt trượt s_3

$$s_3 = x_3 - x_{3d} \quad (12)$$

Đặt $d_1 = f_1$, chọn điều khiển ảo

$$x_{3d} = \dot{x}_{2d} - \hat{d}_1 - k_2 \frac{s_2}{\vartheta_2} \quad (13)$$

Với $\hat{d}_1$ là giá trị ước lượng của $d_1, k_2 > 0, \vartheta_2 > 0$, qua một số phép biến đổi ta được:

$$\dot{s}_2 = s_3 + (d_1 - \hat{d}_1) - k_2 \frac{s_2}{\vartheta_2} \quad (14)$$

Bước 3. Vì phân theo thời gian phương trình (12), qua một số phép biến đổi và đặt $\dot{x}_{3d1} = \ddot{y}_d + (\frac{k_1}{\vartheta_1} - 1)\dot{y}_d + \frac{k_1}{\vartheta_1}\dot{y}_d - (\frac{k_1}{\vartheta_1} + \frac{k_2}{\vartheta_2})x_3 + \frac{k_1}{\vartheta_1}x_2$ là thành phần chứa các tham số xác định, $\dot{x}_{3d2} = -(\frac{k_1}{\vartheta_1} + \frac{k_2}{\vartheta_2})d_1 - \hat{d}_1$ là thành phần chứa các tham số bất định, đặt $d_2 = -\dot{x}_{3d2}$

Định nghĩa mặt trượt s_4 là:

$$s_4 = x_4 - x_{4d} \quad (15)$$

Và chọn điều khiển ảo x_{4d} là:

$$x_{4d} = \dot{x}_{3d1} - \hat{d}_2 - k_3 \frac{s_3}{\vartheta_3} \quad (16)$$

Với $\hat{d}_2$ là giá trị ước lượng của $d_2, k_3 > 0, \vartheta_3 > 0$, ta nhận được

$$\dot{s}_3 = s_4 + (d_2 - \hat{d}_2) - k_3 \frac{s_3}{\vartheta_3} \quad (17)$$

Bước 4. Vì phân theo thời gian phương trình (15), qua một số biến đổi và đặt $\dot{x}_{4d1} = \ddot{x}_{3d1} - \frac{k_3}{\vartheta_3}(x_4 - \dot{x}_{3d1})$ là thành phần chứa các tham số xác định; $\dot{x}_{4d2} = -\hat{d}_2 - \frac{k_3}{\vartheta_3}d_2$ là thành phần chứa các tham số bất định, đặt $d_3 = f_2 - \dot{x}_{4d2}$. Định nghĩa mặt trượt s_5 như sau:

$$s_5 = x_5 - x_{5d} \quad (18)$$

Chọn điều khiển ảo x_{5d}

$$x_{5d} = \dot{x}_{4d1} - \hat{d}_3 - k_4 \frac{s_4}{\vartheta_4} \quad (19)$$

Với $\hat{d}_3$ là giá trị ước lượng của $d_3, k_4 > 0, \vartheta_4 > 0$, qua một số biến đổi ta nhận được

$$\dot{s}_4 = s_5 + (d_3 - \hat{d}_3) - k_4 \frac{s_4}{\vartheta_4} \quad (20)$$

Bước 5. Vì phân phương trình (18), thực hiện các phép biến đổi tương tự ta nhận được

$$\dot{s}_5 = bu + d_4 - \dot{x}_{5d1} \quad (21)$$

Với $\dot{x}_{5d1} = \ddot{x}_{4d1} - \frac{k_4}{\vartheta_4}(x_5 - \dot{x}_{4d1})$ là thành phần chứa các tham số xác định; $d_4 = f_3 - \dot{x}_{5d2}$; $\dot{x}_{5d2} = -\hat{d}_3 - \frac{k_4}{\vartheta_4}d_3$ là thành phần chứa các tham số bất định. Chọn tín hiệu điều khiển:

$$u = -\frac{1}{b} \left[\hat{d}_4 - \dot{x}_{5d1} + k_5 \frac{s_5}{\vartheta_5} + c_s \text{sat}(s_5) \right] \quad (22)$$

Trong đó, $\hat{d}_4$ là giá trị ước lượng của d_4 và c_5 là hằng số dương. Hàm sat được định nghĩa:

$$\text{sat}(s_5) = \begin{cases} \text{sgn}(s_5), & \text{nếu } |s_5| > \varepsilon \\ \frac{s_5}{\varepsilon}, & \text{nếu } |s_5| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (23)$$

$$\Rightarrow \dot{s}_5 = \tilde{d}_4 - \frac{k_5}{\vartheta_5} s_5 - c_s \text{sat}(s_5) \quad (24)$$

2.3. Xây dựng bộ quan sát nhiễu

Để có thông tin ước lượng thành phần bất định, nhiễu loạn nêu trên, bộ quan sát nhiễu được đề xuất để ước lượng các thành phần bất định, nhiễu loạn.

Bộ quan sát nhiễu được thiết kế như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}_i &= \vartheta_i + \rho_i s_i \\ \dot{\vartheta}_i &= -\rho_i (s_{i+1} + x_{(i+1)d} + \hat{d}_i - x_{1d}^{(i)}) \end{aligned} \quad (25)$$

Vi phân biểu thức $\hat{d}_i$, qua một số biến đổi ta có

$$\dot{\hat{d}}_i = \rho_i \tilde{d}_i \quad (26)$$

Trừ cả hai vế phương trình (26) cho $\dot{\hat{d}}_i$ ta được

$$\dot{\hat{d}}_i - \dot{\hat{d}}_{ti} = \rho_i \tilde{d}_i - \dot{\hat{d}}_i \Rightarrow \dot{\tilde{d}}_i = -\rho_i \tilde{d}_i + \dot{\hat{d}}_i \quad (27)$$

Ta có bộ quan sát nhiễu cho kênh thứ nhất:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}_1 &= \vartheta_1 + \rho_1 s_2 \\ \dot{\vartheta}_1 &= -\rho_1 (s_3 + x_{3d} + \hat{d}_1 - \dot{x}_{2d}) \end{aligned} \quad (28)$$

Phương trình động học sai số bộ quan sát nhiễu kênh thứ nhất

$$\dot{\tilde{d}}_1 = -\rho_1 \tilde{d}_1 + \dot{\hat{d}}_1 \quad (29)$$

Tương tự ta có bộ quan sát nhiễu cho kênh thứ hai:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}_2 &= \vartheta_2 + \rho_2 s_3 \\ \dot{\vartheta}_2 &= -\rho_2 (s_4 + x_{4d} + \hat{d}_2 - \dot{x}_{3d1}) \end{aligned} \quad (30)$$

Phương trình động học sai số bộ quan sát nhiễu kênh thứ hai

$$\Rightarrow \dot{\tilde{d}}_2 = -\rho_2 \tilde{d}_2 + \dot{\hat{d}}_2 \quad (31)$$

Bộ quan sát nhiễu cho kênh thứ ba:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}_3 &= \vartheta_3 + \rho_3 s_4 \\ \dot{\vartheta}_3 &= -\rho_3 (s_5 + x_{5d} + \hat{d}_3 - \dot{x}_{4d1}) \end{aligned} \quad (32)$$

Phương trình động học sai số bộ quan sát nhiễu kênh thứ ba

$$\dot{\tilde{d}}_3 = -\rho_3 \tilde{d}_3 + \dot{\hat{d}}_3 \quad (33)$$

Bộ quan sát nhiễu kênh thứ 4:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}_4 &= \vartheta_4 + \rho_4 s_5 \\ \dot{\vartheta}_4 &= -\rho_4 (b u + \hat{d}_4 - \dot{x}_{5d1}) \end{aligned} \quad (34)$$

Phương trình động học sai số bộ quan sát nhiễu kênh thứ tư

$$\dot{\tilde{d}}_4 = -\rho_4 \tilde{d}_4 + \dot{\hat{d}}_4 \quad (35)$$

Định nghĩa véc tơ sai số ước lượng như sau:

$$\tilde{d} = [\tilde{d}_1 \ \tilde{d}_2 \ \dots \ \tilde{d}_4]; \ \tilde{d}_i = d_i - \hat{d}_i; \text{ với } i = 1, 2, \dots, 4 \quad (36)$$

Khi đó phương trình động học sai số quan sát được thể hiện như sau:

$$\dot{\tilde{d}} = \rho \tilde{d} + \dot{d} \quad (37)$$

Với $\rho = \text{diag}[-\rho_1, -\rho_2, \dots, -\rho_4]$ và $\dot{d} = [\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dots, \dot{d}_4]^T$, vector $\dot{d}$ thỏa mãn $\|\dot{d}\| \leq \gamma$, với γ là hằng số dương.

2.4. Phân tích ổn định

Trong phần này, tính ổn định của hệ thống trên sẽ được chứng minh. Chúng ta có thể chọn hệ số bộ quan sát nhiều sao cho các giá trị riêng của ma trận P được chọn tùy ý.

Mặt khác, chúng ta có thể chọn ma trận xác định dương P sao cho

$$\rho^T P + P \rho = -Q \quad (38)$$

Với mọi ma trận xác định dương Q, λ_m là giá trị riêng nhỏ nhất của Q. Xét hàm Lyapunov

$$V_1(\tilde{d}) = \tilde{d}^T P \tilde{d} \quad (39)$$

Khi đó

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(\tilde{d}) &= 2\tilde{d}^T P(\rho\tilde{d} + \dot{\tilde{d}}) = 2\tilde{d}^T P \rho \tilde{d} + 2\tilde{d}^T P \dot{\tilde{d}} \\ &= \tilde{d}^T (\rho^T P + P \rho) \tilde{d} + 2\tilde{d}^T P \dot{\tilde{d}} \leq -\|\tilde{d}\|(\lambda_m \|\tilde{d}\| - 2\|P\|.\beta) \end{aligned} \quad (40)$$

Để $\dot{V}_1(\tilde{d}) \leq 0$, ta cần có $\lambda_m \|\tilde{d}\| - 2\|P\|.\beta \geq 0$, tức cần có điều kiện

$$\|\tilde{d}\| \geq \frac{2\|P\|\beta}{\lambda_m} \quad (41)$$

Điều này có nghĩa là khi hệ thống tiến đến trạng thái ổn định, độ lớn của sai số $\|\tilde{d}\|$ không thể giảm mãi về 0 mà bị chặn bởi

$$\lambda_l = \frac{2\|P\|\beta}{\lambda_m} \quad (42)$$

Tức là

$$\|\tilde{d}\| \leq \lambda_l \quad (43)$$

Nếu λ_m lớn nghĩa là Q được chọn phù hợp thì sai số quan sát sẽ nhỏ, mà ta có

$$\dot{s}_5 = -\frac{k_5}{\vartheta_5} s_5 - c_s \text{sat}(s_5) + \tilde{d}_4 \quad (44)$$

Giới hạn của s_5 có thể được tính như sau:

$$s_5 \dot{s}_5 = -\frac{k_5}{\vartheta_5} s_5^2 - c_s s_5 \text{sat}(s_5) + s_5 \tilde{d}_4 \quad (45)$$

Từ (23) ta có, Nếu $|s_5| > \varepsilon$

$$s_5 \dot{s}_5 = -|s_5| \left(\frac{k_5}{\vartheta_5} |s_5| + c_s - \lambda_l \right) \quad (46)$$

Vì vậy

$$|s_5| \leq \frac{\vartheta_5(\lambda_l - c_s)}{k_5} \quad (47)$$

Nếu $|s_5| \leq \varepsilon$ thì

$$s_5 \dot{s}_5 \leq -|s_5| \left(\left(\frac{k_5}{\vartheta_5} + \frac{c_s}{\varepsilon} \right) |s_5| - \lambda_l \right) \quad (48)$$

Vì vậy $|s_5|$

$$|s_5| \leq \frac{\lambda_l \varepsilon \vartheta_5}{\varepsilon k_5 + \vartheta_5 c_s} \quad (49)$$

Như vậy, sau một khoảng thời gian, mặt trượt s_5 sẽ giới hạn bởi

$$s_5 \leq \delta_5 \quad (50)$$

Với

$$\delta_5 = \max \left(\frac{\vartheta_5(\lambda_l - c_s)}{k_5}, \frac{\lambda_l \varepsilon \vartheta_5}{\varepsilon k_5 + \vartheta_5 c_s} \right)$$

Tương tự, ta sẽ có $s_i \leq \delta_i$, với $i = 1, 2, 3, 4$ trong đó:

$$\delta_4 = \frac{\vartheta_4(\delta_5 - \lambda_l)}{k_4}; \delta_3 = \frac{\vartheta_3(\delta_4 - \lambda_l)}{k_3}; \delta_2 = \frac{\vartheta_2(\delta_3 - \lambda_l)}{k_2}; \delta_1 = \frac{\vartheta_1 \delta_2}{k_1} \quad (51)$$

Như vậy, sai số ước lượng $\tilde{\theta}$ và các mặt trượt s là giới hạn. Các giới hạn này có thể giảm được nếu ta chọn các hệ số k_i , ϑ_i và c_s phù hợp.

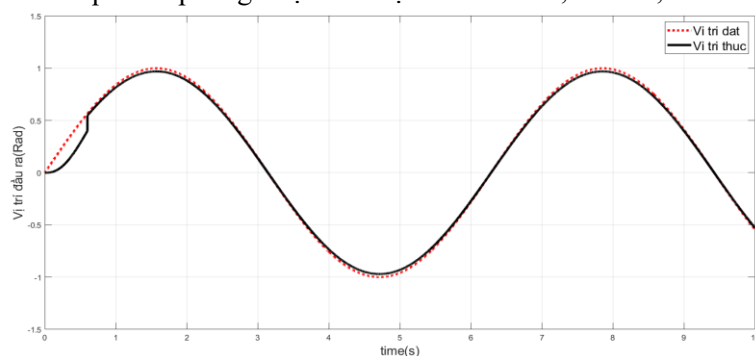
3. Kết quả mô phỏng

Để đánh giá chất lượng của các bộ điều khiển đã tổng hợp được, cần phải làm mô phỏng chứng minh khả năng làm việc của các bộ điều khiển trên. Cơ sở lập trình mô phỏng được lựa chọn là phần mềm Matlab – Simulink.

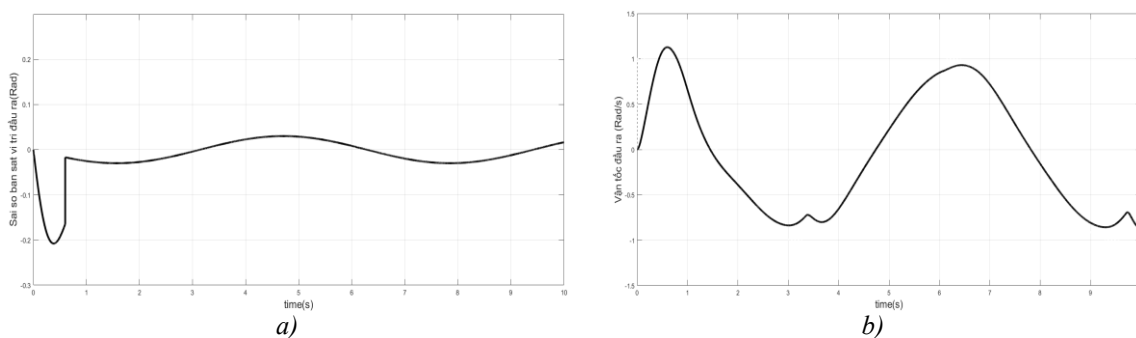
Để có đủ cơ sở so sánh chất lượng của các bộ điều khiển đã tổng hợp được, tác giả lựa chọn đối tượng chung là hệ truyền động điện cho máy công nghiệp với khớp đàn hồi. Các tham số sử dụng cho mô phỏng [10], [11] được chọn như sau: $J_t = 0,0093 \text{ kg.m}^2$; $J_m = 0,2304 \text{ kg.m}^2$, $k = 100 \text{ (Nm/rad)}$; $b = 0$. Các tham số của động cơ chấp hành được cho như sau: $R_s = 0,901 \Omega$, $L_q = L_d = 0,0065 \text{ H}$, $p_n = 4$, $\psi = 0,031 \text{ Wb}$. Hệ số bộ quan sát nhiễu $\rho = [20 \ 20 \ 40 \ 40]$.

Cho quỹ đạo mong muốn $q_{td}(t) = \sin(\omega t)$, bài toán điều khiển đặt ra là tìm luật điều khiển đầu vào để quỹ đạo của máy công nghiệp $q_t(t)$ bám theo quỹ đạo đặt trong thời gian T.

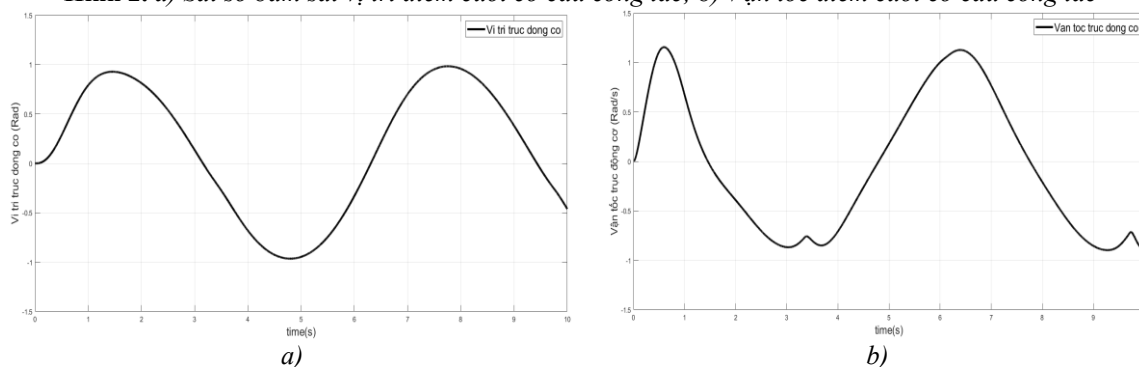
Từ đó, ta có các kết quả mô phỏng được thể hiện như Hình 1, Hình 2, Hình 3.



Hình 1. Vị trí điểm cuối cơ cấu công tác



Hình 2. a) Sai số bám sát vị trí điểm cuối cơ cấu công tác; b) Vận tốc điểm cuối cơ cấu công tác



Hình 3. a) Vị trí trục động cơ PMSM; b) Vận tốc trục động cơ PMSM

Từ kết quả mô phỏng ta nhận thấy hệ ổn định, vị trí điểm cuối của cơ cấu công tác đã bám theo quỹ đạo đặt sau một khoảng thời gian khoảng 0,6s, sai số xác lập lớn nhất là 0,02 (Rad).

Do đặc tính đàn hồi của khớp, tại thời điểm quá độ xuất hiện hiện tượng trễ điều khiển, tuy nhiên vị trí điểm cuối của cơ cấu công tác đã bám theo quỹ đạo đặt với độ chính xác cao, thời gian quá độ nhỏ. Ngoài ra tại các thời điểm thay đổi chiều chuyển động của quỹ đạo cũng xuất hiện hiện tượng sai số điều chỉnh, tuy nhiên sai số điều chỉnh là rất nhỏ (khoảng 0,02 (Rad)).

4. Kết luận

Kết quả của bài báo đã chỉ ra các bước tổng hợp điều khiển bám cho hệ truyền động điện máy công nghiệp có xét đến yếu tố đàn hồi của khớp sử dụng động cơ PMSM trên cơ sở kết hợp phương pháp điều khiển trượt và bộ quan sát nhiễu. Việc sử dụng bộ quan sát nhiễu giúp nâng cao chất lượng của bộ điều khiển trượt truyền thống. Kết quả mô phỏng cho thấy với thuật toán đã tổng hợp, vị trí và vận tốc điểm cuối cơ cấu công tác đã bám theo giá trị đặt sau một khoảng thời gian nhất định, chất lượng điều khiển tốt. Đây là một hướng nghiên cứu cho phép nâng cao chất lượng làm việc của các hệ điện cơ có yếu tố phi tuyến bậc cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] V. C. Pham, V. H. Hoang, D. T. Nguyen, and H. H. Nguyen, "Synthesis of permanent magnet synchronous motor speed controller for fan load by adaptive sliding method," *Journal of Science and Technology; Hanoi Industrial University*, vol. 58, no. 3, pp. 39-44, June 2022.
- [2] W. Zhou, C. Lin, and Y. Yi, "Anti-Disturbance Tracking Control for a Class of PMSM Driven-Based Flexible Manipulator Systems With Input Saturation and Angular Velocity Constraint," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 82351 – 82361, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301147.
- [3] Y. Liu, B. Song, X. Zhou, and Y. Gao, "An Adaptive Torque Observer Based on Fuzzy Inference for Flexible Joint Application," *Machines*, vol. 11, 2023, Art. no. 794; doi: 10.3390/machines11080794.
- [4] D. Youshuang and X. Xi, "Research on Control Strategies of Flexible Load Driven by PMSM," *National Natural Science Foundation of China under Project 51177084*, 2014, doi: 10.1109/CCDC55256.2022.10034285.
- [5] T. Orłowska-Kowalska, K. Szabat, and M. Dybkowski, "Neuro-Fuzzy Adaptive Control of the IM Drive with Elastic Coupling," *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008, doi: 10.1109/EPEPMC.2008.4635593.
- [6] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [7] A. -C. Huang and Y. -C. Chen, "Adaptive multiple-surface sliding control for non-autonomous systems with mismatched uncertainties," Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, 2004, doi: 10.1016/j.automatica.2004.06.007.
- [8] D. C. Tran, V. H. Roan, D. C. Hoang, T. H. Tran, T. T. H. Pham, and T. L. Nguyen, "Improving control quality of PMSM drive systems based on adaptive fuzzy sliding control method," *IJPEDS*, vol. 13, no. 2, pp. 835-845, June 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp835-845.
- [9] P. Ren, J. W. Zhu, Y. Zhao, Y. P. Liu, Z. Jing, and S. K. Zhang, "Speed Control Strategy for Switched Reluctance Motor Based on Dual Sliding Mode Controller," *Proc. CSEE*, vol. 44, pp. 4501–4513, 2024, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231331.
- [10] D. Ginoya, P. D. Shendge, and S. B. Phadke, "Disturbance observer based sliding mode control of nonlinear mismatched uncertain systems," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 26, no. 1–3, pp. 98-107, September 2015, doi: 10.1016/j.cnsns.2015.02.008.
- [11] Y. Wang, H. Yu, J. Yu, H. Wu, and X. Liu, "Trajectory Tracking of Flexible-Joint Robots Actuated by PMSM via a Novel Smooth Switching Control Strategy," *Appl. Sci.*, vol. 9, 2019, Art. no. 4382; doi: 10.3390/app9204382.
- [12] D. Łuczak, "Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection," *19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2014, doi: 10.1109/MMAR.2014.6957420.