

BACKSTEPPING PI SLIDING MODE CONTROLLER APPLICATIONS BASED ON EXPONENTIAL REACHING LAW FOR TWO_TANK INTERACTING SYSTEM

Pham Thanh Tung^{1*}, Le Thanh Quang Duc¹, Nguyen Chi Ngon²

¹Vinh Long University of Technology Education, ²Can Tho University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 19/10/2022 Revised: 26/12/2022 Published: 26/12/2022	This article presents a method to design a backstepping PI sliding mode control based on exponential reaching law (BPISM-C-ERL) for two_tank interacting system. The proposed controller is designed to ensure that the actual liquid level position follows the desired position in a finite time and to reduce the high frequency oscillation (so called chattering phenomena) around the sliding surface. This is the major drawback of classical sliding mode control. The performance of the designed controller is verified in simulation and compared with sliding mode control using conditional integrators, intelligent controller, Fuzzy-Optimized model reference adaptive control based on Lyapunov rules and Fuzzy-PID controller. Simulation results in MATLAB/Simulink show that the proposed controller is more effective with the rise time achieves 0.0771(s), the percent overshoot is 0(%), the steady state error converges to zero, the settling time is 0.1409(s) and the chattering is eliminated.
KEYWORDS	
Two-tank interacting system	
Backstepping PI sliding mode control	
Chattering	
Exponential reaching law	
MATLAB/Simulink	

ỨNG DỤNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT PI BACKSTEPPING DỰA VÀO LUẬT TIẾP CẬN SỐ MŨ HỆ THỐNG BỒN KÉP

Phạm Thanh Tùng^{1*}, Lê Thanh Quang Đức¹, Nguyễn Chí Ngôn²

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, ²Trường Đại học Cần Thơ

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 19/10/2022 Ngày hoàn thiện: 26/12/2022 Ngày đăng: 26/12/2022	Bài báo này trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ cho ứng dụng điều khiển hệ thống bồn kép. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế để đảm bảo vị trí mức chất lỏng thực tế bám theo vị trí mong muốn trong thời gian hữu hạn và giảm hiện tượng dao động tần số cao (còn gọi là hiện tượng chattering) quanh mặt trượt. Đây là nhược điểm chính của bộ điều khiển trượt truyền thống. Hiệu quả của bộ điều khiển thiết kế được kiểm chứng trong mô phỏng và so sánh với điều khiển trượt sử dụng điều kiện tích phân, điều khiển thông minh, điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu tối ưu dựa vào các luật Lyapunov và điều khiển PID mờ. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy rằng phương pháp đề xuất hiệu quả với thời gian tăng đạt 0,0771(s), độ quá điều chỉnh là 0(%), triệt tiêu sai số xác lập, thời gian xác lập là 0,1409(s) và giảm đáng kể hiện tượng chattering.
TỪ KHÓA	
Bồn kép	
Điều khiển trượt PI backstepping	
Chattering	
Luật tiếp cận số mũ	
MATLAB/Simulink	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6722>

* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

1. Giới thiệu

Điều khiển mức chất lỏng trong hệ thống bồn kép là một trong các bài toán quan trọng trong quy trình công nghiệp. Các ứng dụng công nghiệp của điều khiển mức chất lỏng bao gồm chế biến thực phẩm, xử lý nước thải, hệ thống lọc nước, nhà máy điện hạt nhân, thiết bị phân phối và bổ sung chất lỏng tự động [1], nhà máy lọc dầu, công nghiệp giấy [2], công nghệ sinh học, dược phẩm [3]. Đây là hệ thống đã được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và công bố, điển hình như: trong [1] đã sử dụng bộ điều khiển trượt với điều kiện tích phân, bộ điều khiển thông minh được đề xuất trong [2], trong [3] sử dụng bộ điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu tối ưu mờ dựa vào luật MIT (Massachusetts Institute of Technology) và Lyapunov, bộ điều khiển PID mờ được đề xuất trong [4], trong [5] thực hiện bộ điều khiển PID sử dụng phương pháp Ziegler-Nichols và quỹ tích Routh, điều khiển trượt bậc hai được thực hiện trong [6], trong [7] sử dụng bộ điều khiển trượt.

Phương pháp backstepping dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov [8] và thường được sử dụng như một phần của thiết kế điều khiển [9]. Hệ thống bậc cao ban đầu tương đương với một số hệ thống con. Tính ổn định Lyapunov được đảm bảo khi chọn biến trạng thái thích hợp như là biến điều khiển ảo của hệ thống con [8] – [10]. Điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) là một trong các phương pháp điều khiển hiệu quả hệ thống với ưu điểm là tính ổn định bền vững ngay cả khi hệ thống nhiễu hoặc thông số của mô hình thay đổi theo thời gian [11]. Tuy nhiên, nhược điểm chính của bộ điều khiển trượt là hiện tượng dao động tần số cao (còn gọi là hiện tượng chattering) quanh mặt trượt. Hiện tượng chattering do sự không hoàn hảo và chậm trễ thời gian trong chuyển mạch, do thiết bị truyền động hằng số thời gian nhỏ, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng [12].

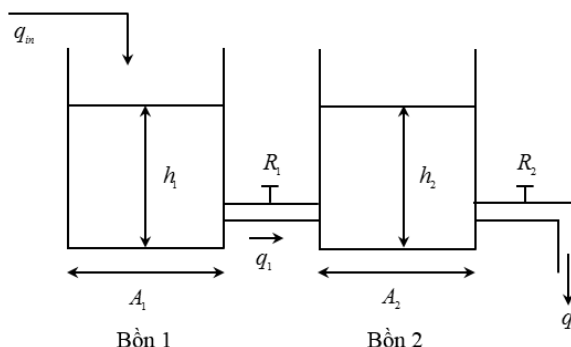
Nghiên cứu này đề xuất kết hợp bộ điều khiển trượt với mặt trượt PI và phương pháp backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ để điều khiển bám vị trí mức chất lỏng của hệ thống bồn kép và giảm hiện tượng chattering quanh mặt trượt. Bộ điều khiển đề xuất được sử dụng để kết hợp ưu điểm của phương pháp backstepping là tìm một mô hình điều khiển ổn định và của điều khiển trượt là sự ổn định bền vững với nhiễu và các tham số mô hình thay đổi. Mặt trượt PI và luật tiếp cận số mũ được sử dụng để giảm hiện tượng chattering quanh mặt trượt.

Bài báo này được tổ chức gồm 4 phần: phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ cho hệ thống được trình bày trong phần 2, phần 3 trình bày các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink và đánh giá, kết luận là phần 4.

2. Thiết kế bộ điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ

2.1. Mô hình toán học của hệ thống

Mô hình hệ thống bồn kép được trình bày như Hình 1 [2] – [4].



Hình 1. Mô hình hệ thống bồn kép [2] – [4]

Trong Hình 1, cấu trúc liên kết là sự bố trí nối tiếp 2 bồn chứa chất lỏng. Đầu tiên, chất lỏng chảy vào bồn 1, sau đó qua bồn 2. Đầu ra của mỗi bồn có lực cản dòng chảy do các van chi phối.

Chiều cao của mức chất lỏng là h_1 (cm) trong bồn 1 và h_2 (cm) trong bồn 2. Lưu lượng chất lỏng vào bồn 1 là q_{in} (cm^3/min), lưu lượng dòng chảy ra từ bồn 1 là q_1 (cm^3/min) và từ bồn 2 là q_o (cm^3/min). Diện tích của bồn 1 là A_1 (cm^2) và bồn 2 là A_2 (cm^2). R_1 và R_2 là lực cản dòng chảy của chất lỏng (s/m^2) ra khỏi bồn 1 và bồn 2.

Biểu diễn không gian trạng thái của hệ thống như (1), (2) và (3) [2]:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (1)$$

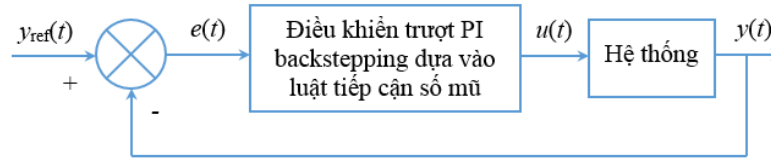
$$\dot{x}_2(t) = -\frac{1}{b}x_1(t) - \frac{c}{b}x_2(t) + \frac{a}{b}u(t) + d(t) \quad (2)$$

$$y(t) = x_1(t) \quad (3)$$

Với hằng số thời gian của bồn 1 là $T_1 = A_1R_1$ và hằng số thời gian của bồn 2 là $T_2 = A_2R_2$, $a = R_2$; $b = T_1T_2$; $c = T_1 + T_2 + A_1R_2$, $h_2(t) = x_1(t) = y(t)$ là vị trí mức chất lỏng của bồn 2 – đầu ra, $d(t)$ bao hàm nhiễu ngoài và các yếu tố bất định khác, $d(t) \leq D$. Mục tiêu trong nghiên cứu này là điều khiển ổn định mức chất lỏng trong bồn 2.

2.2. Điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ (BPISMC-ERL) cho hệ thống được trình bày như Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc bộ BPISMC-ERL

Các bước thiết kế bộ điều khiển BPISMC-ERL được thực hiện như sau [13]:

Bước 1

Sai số bám của hệ thống được định nghĩa như (4):

$$e(t) = y(t) - y_{ref}(t) = x_1(t) - y_{ref}(t) \quad (4)$$

Trong đó $y(t)$ là mức chất lỏng thực tế, $y_{ref}(t)$ là vị trí mức chất lỏng mong muốn trong bồn 2.

Lấy đạo hàm 2 vế (4), ta được (5):

$$\dot{e}(t) = \dot{x}_1(t) - \dot{y}_{ref}(t) = x_2(t) - \dot{y}_{ref}(t) \quad (5)$$

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (6):

$$V_1(t) = \frac{1}{2}e^2(t) \quad (6)$$

Đạo hàm của (6), ta được (7):

$$\dot{V}_1(t) = e(t)\dot{e}(t) = e(t)(x_2(t) - \dot{y}_{ref}(t)) \quad (7)$$

Để $\dot{V}_1(t) \leq 0$, ta chọn $x_2(t) = s(t) - \dot{e}(t) - (\lambda + 2\alpha)e(t) - \alpha^2 \int_0^t e(\tau) d\tau + \dot{y}_{ref}(t)$, nghĩa là:

$$\begin{aligned} s(t) &= x_2(t) - \dot{y}_{ref}(t) + \dot{e}(t) + (\lambda + 2\alpha)e(t) + \alpha^2 \int_0^t e(\tau) d\tau \\ &= 2\dot{e}(t) + (\lambda + 2\alpha)e(t) + \alpha^2 \int_0^t e(\tau) d\tau = s_1(t) + s_2(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó $\alpha > 0, \lambda > 0$, $s(t)$ là mặt trượt với mặt trượt tỷ lệ $s_1(t)$ và mặt trượt vi phân $s_2(t)$ như (9) và (10) [14]:

$$s_1(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e(t) \quad (9)$$

$$s_2(t) = \left(\frac{d}{dt} + \alpha \right)^2 \xi_e(t); \quad \xi_e(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (10)$$

Thế (8) vào (7), ta được (11):

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2} \left(e(t)s(t) - (\lambda + 2\alpha)e^2(t) - \alpha^2 \int_0^t e^2(\tau) d\tau \right) \quad (11)$$

Nếu $s(t) = 0$ thì $\dot{V}_1(t) \leq 0$. Do đó, Bước 2 sẽ được thực hiện.

Bước 2

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (12):

$$V_2(t) = V_1(t) + \frac{1}{2} s^2(t) \quad (12)$$

$$\text{Vì } \dot{s}(t) = \dot{x}_2(t) - \ddot{y}_{ref}(t) + \ddot{e}(t) + (\lambda + 2\alpha)\dot{e}(t) + \alpha^2 e(t)$$

Nên ta có (13):

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= \dot{V}_1(t) + s(t)\dot{s}(t) \\ &= - \left((\lambda + 2\alpha)e^2(t) + \alpha^2 \int_0^t e^2(\tau) d\tau \right) + \dots \\ &\quad + s(t) \left(-\frac{1}{b}x_1(t) - \frac{c}{b}x_2(t) + \frac{a}{b}u(t) + d(t) \right. \\ &\quad \left. - \ddot{y}_{ref}(t) + \ddot{e}(t) + \frac{1}{2}e(t) + (\lambda + 2\alpha)\dot{e}(t) + \alpha^2 e(t) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Để $\dot{V}_2(t) \leq 0$, bộ điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ ($u_{BPISMC-ERL}(t)$) được thiết kế như (14):

$$u_{BPISMC-ERL}(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{1}{b}x_1(t) + \frac{c}{b}x_2(t) + \ddot{y}_{ref}(t) - \ddot{e}(t) - (\lambda + 2\alpha)\dot{e}(t) - \alpha^2 e(t) - \dots \right. \\ \left. - cs(t) - \frac{1}{2}e(t) - \eta \text{sign}(s(t)) - \kappa s(t) \right) \quad (14)$$

Trong đó $c > 0$, $\eta > 0$, $\kappa > 0$. Lúc này ta có (15):

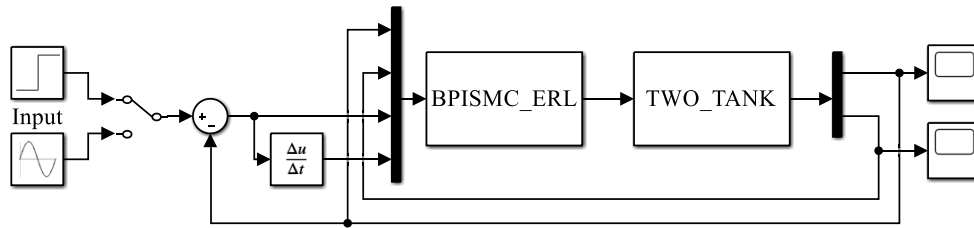
$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= \dot{V}_1(t) + s(t)\dot{s}(t) \\ &= - \left((\lambda + 2\alpha)e^2(t) + \alpha^2 \int_0^t e^2(\tau) d\tau \right) + s(t) \left(-cs(t) - \eta \text{sign}(s(t)) - \kappa s(t) - d(t) \right) \\ &= -(\lambda + 2\alpha)e^2(t) - \alpha^2 \int_0^t e^2(\tau) d\tau - cs^2(t) - \kappa s^2(t) - s(t)d(t) - \eta |s(t)| \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Do đó, $e(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.

Luật điều khiển (14) đảm bảo vị trí mức chất lỏng thực tế của bồn 2 hội tụ về mức chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0 và khắc phục hiện tượng dao động tần số cao (còn gọi là chattering) quanh mặt trượt $s(t)$.

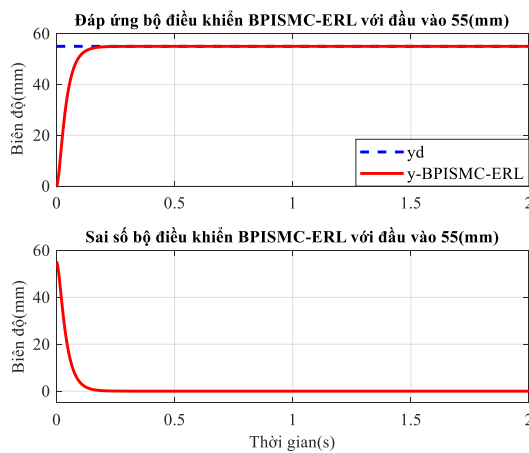
3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất với MATLAB/Simulink được trình bày như Hình 3. Các thông số của hệ thống bồn kép như sau: $A_2 = A_1 = 0,0145(m^2)$; $R_1 = 1478,57(sec/m^2)$ và $R_2 = 642,86(sec/m^2)$. Các thông số của bộ điều khiển BPISMC_ERL được trình bày như sau: $\eta = 20$; $\lambda = 2,5$; $\alpha = 50$; $c = 25$ và $\kappa = 45$.

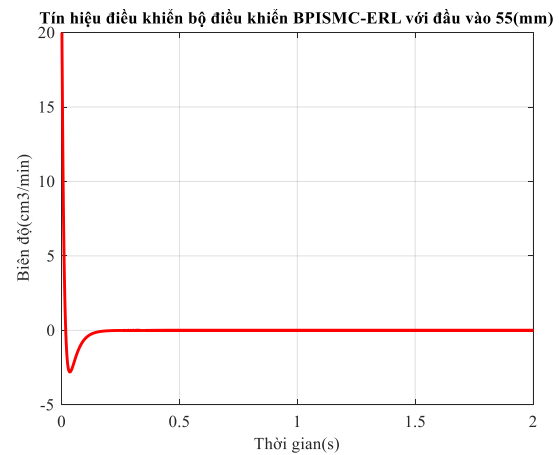


Hình 3. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất với MATLAB/Simulink

Kết quả đáp ứng và sai số của bộ điều khiển BPISM-C-ERL với đầu vào $y_{ref} = 55(mm)$ áp dụng cho hệ thống bồn kép được trình bày như Hình 4. Vị trí mức chất lỏng thực tế của hệ thống bám theo mức chất lỏng mong muốn với sai số xác lập hội tụ về 0, thời gian tăng đạt 0,0771(s), thời gian xác lập là 0,1409(s) và độ quá điều chỉnh là 0(%).



Hình 4. Đáp ứng và sai số của bộ BPISM-C-ERL với đầu vào $y_{ref} = 55(mm)$



Hình 5. Tín hiệu điều khiển của bộ BPISM-C-ERL với đầu vào $y_{ref} = 55(mm)$

Bảng 1. Các hiệu suất sai số của bộ điều khiển BPISM-C-ERL

Bộ điều khiển	Hiệu suất sai số					
	AAD	MSE	RMSE	MPE	MAPE	MRE
BPISM-C-ERL	5.4401e-08	5.9544e-12	2.4402e-06	-9.8910e-10	9.8910e-10	9.8910e-08

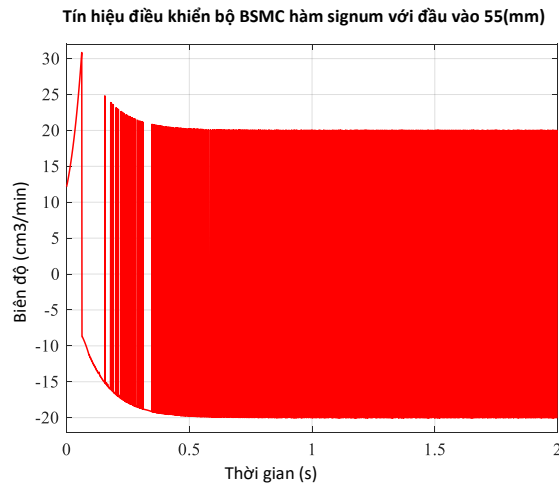
Bảng 2. Các chỉ tiêu của bộ điều khiển BPISM-C-ERL

Các chỉ tiêu chất lượng	BPISM-C-ERL	Điều khiển trượt sử dụng điều kiện tích phân [1]	Điều khiển thông minh [2]	Điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu tối ưu mờ dựa vào các luật Lyapunov [3]	PID mờ [4]
Thời gian xác lập (s)	0,1409	330	30	5,8708	4,2
Thời gian tăng (s)	0,0771	87,184	-	3,0678	1,3
Sai số xác lập (mm)	0	-	-	-8,1561e-6	0
Độ quá điều chỉnh (%)	0	0,6	4	0	20,2

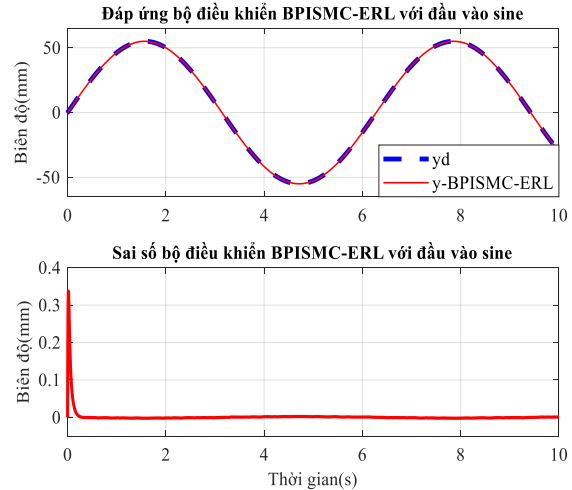
Bảng 1 trình bày các hiệu suất khác nhau của bộ điều khiển đề xuất [15]. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển BPISM-C-ERL được trình bày như Bảng 2 và được so sánh với điều khiển trượt sử dụng điều kiện tích phân [1], điều khiển thông minh [2], điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu tối ưu mờ dựa vào các luật Lyapunov [3] và điều khiển PID mờ [4]. Các thông số ở Bảng 2 cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển BPISM-C-ERL so với các phương pháp đã thực hiện trong [1] – [4]. Điều này thể hiện sự phù hợp của phương pháp đề xuất áp dụng cho hệ thống.

Hình 5 trình bày tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển BPISM-C-ERL với đầu vào $y_{ref} = 55(mm)$. Hiện tượng chattering của tín hiệu điều khiển trong Hình 5 giảm đáng kể so với trường hợp

sử dụng hàm sigum (Hình 6). Như vậy, bộ điều khiển BPISM-ERL đã khắc phục hiệu quả hiện tượng chattering quanh mặt trượt so với bộ điều khiển trượt backstepping (BSMC) dựa vào luật tiếp cận tốc độ hằng (hàm sigum).



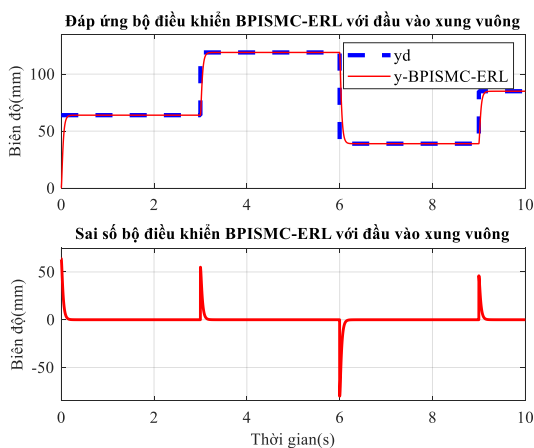
Hình 6. Tín hiệu điều khiển của bộ BSMC hàm sigum với đầu vào $y_{ref} = 55(\text{mm})$



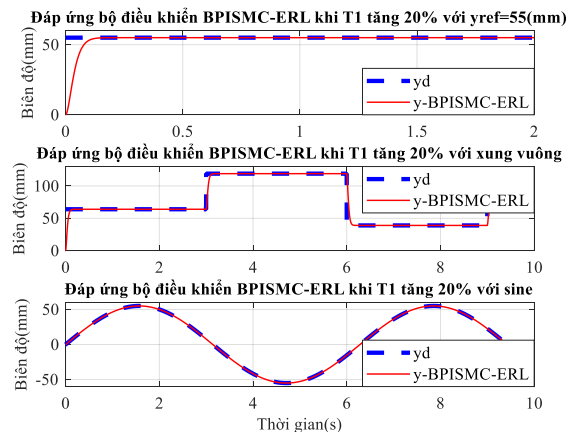
Hình 7. Đáp ứng và sai số của bộ BPISM-ERL với đầu vào hình sine

Đáp ứng và sai số với đầu vào hình sine và xung vuông bộ điều khiển BPISM-ERL được trình bày như Hình 7 và 8, tương ứng. Quan sát các tín hiệu trên Hình 7 và 8 ta thấy rằng vị trí mức chất lỏng thực tế vẫn hội tụ về mức chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0. Điều này một lần nữa khẳng định tính hợp lý của bộ điều khiển đề xuất.

Các đáp ứng với đầu vào $y_{ref} = 55(\text{mm})$, xung vuông và hình sine của bộ BPISM-ERL được khảo sát khi hằng số thời gian của bồn 1 (T_1) tăng 20% và của bồn 2 (T_2) tăng 30% được trình bày như Hình 9 và 10, tương ứng. Quan sát các đáp ứng trên Hình 9 và 10 ta thấy rằng vị trí mức chất lỏng thực tế vẫn hội tụ về mức chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0.



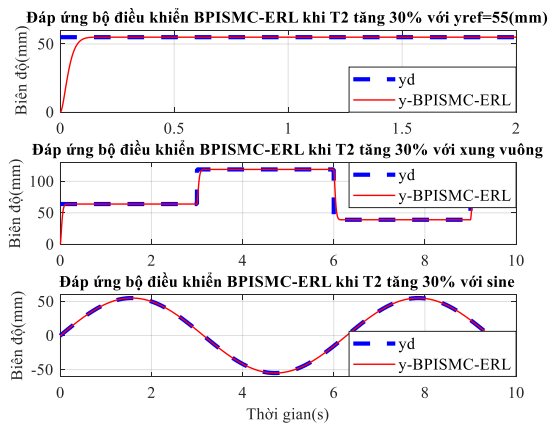
Hình 8. Đáp ứng và sai số của bộ BPISM-ERL với đầu vào xung vuông



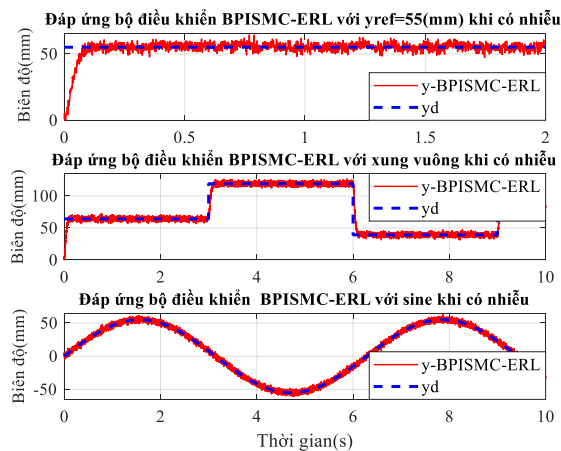
Hình 9. Đáp ứng với đầu vào $y_{ref} = 55(\text{mm})$, xung vuông và hình sine của bộ BPISM-ERL khi T_1 tăng 20%

Hình 11 trình bày các đáp ứng với đầu vào $y_{ref} = 55(\text{mm})$, xung vuông và hình sine của bộ BPISM-ERL khi nhiễu ngoài (nhiều trắng - giả sử nhiễu cảm biến) với công suất 0,005(w) tác động vào đầu ra của hệ thống. Quan sát các đáp ứng trên Hình 11 ta thấy rằng các đáp ứng vị trí

thực tế vẫn bám theo vị trí mong muốn trong thời gian hữu hạn. Kết quả này đã chứng minh tính bền vững của bộ điều khiển đề xuất trong điều khiển bám vị trí hệ thống bồn kép.



Hình 10. Đáp ứng với đầu vào $y_{ref} = 55(\text{mm})$, xung vuông và hình sine của bộ BPISM-C-ERL khi T_2 tăng 30%



Hình 11. Đáp ứng với đầu vào $y_{ref} = 55(\text{mm})$, xung vuông và hình sine của bộ BPISM-C-ERL khi có nhiễu

Qua các kết quả được trình bày ở Hình 4, 5 và từ Hình 7 đến 11, các chỉ tiêu chất lượng được trình bày ở Bảng 3 và các hiệu suất ở Bảng 4 cho thấy bộ điều khiển BPISM-C-ERL được lựa chọn trong nghiên cứu đã điều khiển bám tốt mức chất lỏng của hệ thống bồn kép, loại bỏ hiện tượng chattering quanh mặt trượt và bền vững với sự tác động của nhiễu ở đầu ra.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt PI backstepping dựa vào luật tiếp cận số mũ cho hệ thống bồn kép. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế đã điều khiển vị trí mức chất lỏng thực tế bám theo vị trí mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0. Mặt trượt PI và luật tiếp cận số mũ được sử dụng đã giảm đáng kể hiện tượng chattering quanh mặt trượt so với luật tiếp cận tốc độ hằng (hàm signum). Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy rằng bộ điều khiển BPISM-C-ERL hiệu quả hơn điều khiển trượt sử dụng điều kiện tích phân, điều khiển thông minh, điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu tối ưu mờ dựa vào các luật Lyapunov và điều khiển PID mờ. Các đáp ứng với các đầu vào khác nhau trong trường hợp hằng số thời gian của bồn 1 và 2 thay đổi và nhiễu ngoài tác động vào đầu ra của hệ thống cũng được nghiên cứu khảo sát đã cho thấy sự phù hợp và tính bền vững của phương pháp đề xuất áp dụng cho hệ thống bồn kép. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ tiến hành sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo ước lượng các biến trạng thái của hệ thống hoặc sử dụng giải thuật di truyền để xác định các giá trị thông số của bộ điều khiển BPISM-C-ERL và thực nghiệm trên mô hình ứng dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. B. Prusty, S. Seshagiri, U. C. Pati, and K. K. Mahapatra, "Sliding mode control of coupled tank systems using conditional integrators," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 7, no. 1, pp. 118-125, 2020.
- [2] S. Gomathyn and M. M. Prabha, "Level control for interacting tank system using intelligent controller," *International Journal of Current Engineering and Scientific Research*, vol. 6, no. 6, pp. 71-75, 2019.
- [3] D. D. Dinakin and P. O. Oluseyi, "Fuzzy-Optimized model reference adaptive control of interacting and noninteracting processes based on MIT and Lyapunov rules," *Turkish Journal of Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 141-153, 2021.

-
- [4] K. Pravallika and G. V. Krishna, "Fuzzy-PID controller for coupled two tank interacting system," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 10, no. 3, pp. 8817–8830, 2020.
 - [5] M. Imaduddin, M. A. N. Kamil, S. H. Putra, R. Imawan, A.T. N. Zahra, R. F. Iskandar, and N. Fitriyanti, "Implementation PID in coupled two tank liquid level control using Ziegler-Nichols and Routh Locus method," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Science, Engineering and Social Sciences*, Indonesia, 2019, pp. 274-279.
 - [6] B. A. Reddy and P. V. Krishna, "Comparison of second order sliding mode control strategies for coupled tank system," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8, no. 6S3, pp. 344-349, 2019.
 - [7] R. S. Naik, A. Adil, and A. Veerraju, "Sliding mode controller design for interacting and non interacting two tank system," *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 5, no. 10, pp. 1024-1032, 2020.
 - [8] X. Zhang, J. Huang, Y. Sun, and X. Tong, "Hybrid PI and Backstepping Controller Design of The LC-Type Three-phase Inverter," *Chinese Automation Congress (CAC)*, China, 2018, pp. 1729-1733.
 - [9] Z. A. Khan, L. Khan, S. Ahmad, S. Mumtaz, M. Jafar, and Q. Khan, "RBF neural network based backstepping terminal sliding mode MPPT control technique for PV system," *PLoS ONE*, vol. 16, no. 4, pp. 1-23, 2021.
 - [10] L. Xu, J. Du, B. Song, and M. Cao, "A combined backstepping and fractional-order PID controller to trajectory tracking of mobile robots," *Systems Science & Control Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 134-141, 2022.
 - [11] P. Leśniewski and A. Bartoszewicz, "Reaching Law Based Sliding Mode Control of Sampled Time Systems," *Energies*, vol. 14, no. 7, pp. 1-19, 2021.
 - [12] H. U. Suleiman, M. B. Mu'azu, T. A. Zarma, A. T. Salawudeen, S. Thomas, and A. A. Galadima, "Methods of chattering reduction in sliding mode control: A case study of Ball and Plate system," *International Conference on Adaptive Science & Technology*, 2018, pp. 1-9.
 - [13] J. Liu and X. Wang, *Advanced sliding mode control for mechanical systems*, Springer, 2012.
 - [14] C. -H. Lin and F.-Y. Hsiao, "Proportional-Integral Sliding Mode Control with an Application in the Balance Control of a Two-Wheel Vehicle System," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, pp. 1-27, 2020.
 - [15] I. Mukherjee and S. Routroy, "Comparing the performance of neural networks developed by using Levenberg-Marquardt and Quasi-Newton with the gradient descent algorithm for modelling a multiple response grinding process," *Expert Syst. Appl*, vol. 39, no. 3, pp. 2397-2407, 2012.