

ỨNG DỤNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VÀ KỸ THUẬT CUỐN CHIẾU HỆ THỐNG BỒN KÉP

APPLICATION OF SLIDING MODE CONTROL AND BACKSTEPPING TECHNIQUES FOR COUPLED-TANK SYSTEM

HUỶNH ĐẮC SƠN TIỀN^{1a}, TRẦN THỊ THÙY TRANG¹,
NGUYỄN VIỆT TRUNG¹, PHẠM THANH TÙNG¹

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long
+ Tác giả liên hệ: ^aEmail: tienhds@vlute.edu.vn

Nhận bài (Received): 10/01/2023; Phản biện (Reviewed): 15/02/2023; Chấp nhận (Accepted): 01/3/2023

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển bám mức chất lỏng cho hệ thống bồn kép dựa vào phương pháp điều khiển trượt và điều khiển trượt kết hợp với kỹ thuật cuốn chiếu. Điều khiển trượt là phương pháp điều khiển bền vững để loại bỏ nhiễu và thành phần không chắc chắn. Kỹ thuật cuốn chiếu chia bài toán điều khiển các hệ thống bậc cao phức tạp thành một chuỗi các bài toán điều khiển bậc thấp hơn thông qua thủ tục đệ quy. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Các kết quả mô phỏng trong MATLAB/Simulink đã cho thấy hiệu quả, sự phù hợp và bền vững của phương pháp điều khiển đề xuất so với bộ điều khiển PID truyền thống với thời gian tăng, thời gian xác lập, độ vọt lố, sai số xác lập của bộ điều khiển trượt và trượt cuốn chiếu tương ứng là 12.4(s), 23.2(s), 0(%), 0(cm); 11.23(s), 20(s), 0(%), 0(cm).

Từ khóa: Bồn kép, điều khiển trượt, kỹ thuật cuốn chiếu, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

This research presents the method to design a liquid level track controller for a coupled-tank system based on sliding mode control (SMC) approach and sliding mode control combined with a backstepping techniques (BSMC). The sliding mode controller is known as robust nonlinear controller to reject uncertainty and perturbation. The backstepping method breaks the problem of controlling complex higher order systems into a sequence of lower order control problems through a recursive procedure. The stability of the control system is proved by the Lyapunov theory. Simulation results in MATLAB/Simulink show the efficiency, suitability and robustness of the proposed control method compared with the traditional PID controller with the rising time, the settling time, the percent overshoot, the steady state error of the sliding mode controller and the backstepping techniques are 12.4(s), 23.2(s), 0(%), 0(cm); 11.23(s), 20(s), 0(%), 0(cm), respectively.

Keywords: coupled-tank system, sliding mode control, backstepping, MATLAB/Simulink.

1. Giới thiệu

Điều khiển mức chất lỏng đóng vai trò rất quan trọng trong lĩnh vực công nghiệp [1], đặc biệt với các ứng dụng trong công nghiệp hóa chất, lọc hóa dầu, xử lý nước, sản xuất điện và sản xuất vật liệu xây dựng [2], nồi hơi, thiết bị bay hơi, lò phản ứng, cột chưng cất [3]. Hệ thống bồn kép được sử dụng để điều khiển mức chất lỏng là mô hình thường được sử dụng như một phần của các dự án kinh doanh thương mại [4].

Điều khiển mức chất lỏng trong hệ thống bồn kép được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và công bố, tiêu biểu như: trong [1], [2], [5] đã kết hợp bộ điều khiển PID và kỹ thuật logic mờ. Bộ điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu đã chứng minh tính hiệu quả hơn so với bộ điều khiển PI và logic mờ được thực hiện trong [4]. Hiệu quả của bộ điều khiển logic mờ so với bộ điều khiển P, PI, PID được chứng minh trong [6]. Bộ điều khiển mờ tỷ lệ PID được thực hiện trong [7]. Trong [8] đã thực hiện điều khiển tối ưu với sự khác nhau giữa mô hình thực và mô hình thay thế, hiệu quả bộ điều khiển PI được đánh giá trong [9].

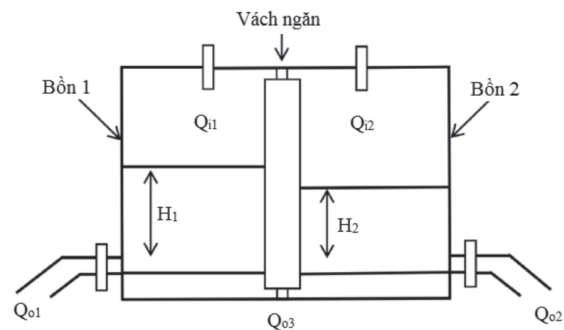
Từ các cơ sở nêu trên, nhóm nghiên cứu đề xuất và kiểm chứng bộ điều khiển trượt và điều khiển trượt kết hợp với kỹ thuật cuộn chiếu để điều khiển bám mức chất lỏng hệ thống bồn kép trong thời gian hữu hạn. Phương pháp điều khiển trượt xuất hiện như một công cụ hiệu quả để giải quyết sự không chắc chắn và nhiễu ngoài trong hầu hết các hệ thống thực tế và là một trong các phương pháp điều khiển hồi tiếp bền vững [10]. Kỹ thuật cuộn chiếu chia bài toán điều khiển các hệ thống bậc cao phức tạp thành một chuỗi các bài toán điều khiển bậc thấp hơn thông qua thủ tục đệ quy. Bằng cách này, tính linh hoạt trong

các hệ thống bậc thấp hơn này có thể được nghiên cứu để thiết kế bộ điều khiển, giúp cho việc điều khiển ít bị hạn chế hơn trong các yêu cầu về độ phức tạp của hệ thống so với các phương pháp khác [11].

Bài báo được tổ chức gồm 5 phần: phần 2 trình bày mô hình toán học của hệ thống bồn kép, điều khiển trượt và trượt cuộn chiếu được thiết kế trong phần 3, phần 4 trình bày các kết quả mô phỏng và đánh giá; kết luận là phần 5.

2. Mô hình toán học của hệ thống bồn kép

Hệ thống bồn kép gồm 2 bồn liên kết nối tiếp như Hình 1 [1]. Mô hình có thể được thể hiện dưới dạng hệ thống bậc hai với một số xấp xỉ tuyến tính. H_1, H_2 là chiều cao mức chất lỏng trong bồn 1 và 2, A_1, A_2 là diện tích mặt cắt ngang của bồn 1 và 2, Q_{o3} là tốc độ dòng chảy giữa các bồn, Q_{i1}, Q_{i2} là tốc độ dòng chảy bơm vào bồn 1 và 2, Q_{o1}, Q_{o2} là tốc độ dòng chảy bơm ra từ bồn 1 và 2.



Hình 1. Cấu trúc hệ thống bồn kép

Với mô hình tuyến tính dưới sự thay đổi nhỏ trong hoạt động của hệ thống, giả sử với tốc độ dòng chảy Q_{i1} và Q_{i2} , mức chất lỏng trong bồn chứa có giá trị ổn định H_1 và H_2 . Xét sự thay đổi nhỏ trong mỗi dòng chảy, q_1 trong Q_{i1} , q_2 trong Q_{i2} . Ngõ ra của mô hình tuyến tính là h_1 và h_2 .

Hàm truyền của hệ thống như [1]

$$\frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{K_1 K_2}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + (1 - K_{12} K_{21})} \quad (1)$$

Trong đó:

$$\tau_1 = \frac{A_1}{\frac{\alpha_1}{2\sqrt{H_1}} + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}},$$

$$\tau_2 = \frac{A_2}{\frac{\alpha_2}{2\sqrt{H_2}} + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}},$$

$$K_1 = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{2\sqrt{H_1}} + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}},$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{\alpha_2}{2\sqrt{H_1}} + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}},$$

$$K_{12} = \frac{\frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}}{\frac{\alpha_1}{2\sqrt{H_1}} + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}},$$

$$K_{21} = \frac{\frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}}{\frac{\alpha_2}{2\sqrt{H_1}} + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}}},$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ là các hằng số.

Van (bộ truyền động bơm) có thể được mô hình như một thành phần quan trọng trong đối tượng. Phương trình vi phân mô tả động học của van như (2) [1]:

$$T_c \frac{dq_i(t)}{dt} + q_i(t) = Q_c(t) \quad (2)$$

Trong đó, T_c là hằng số thời gian của van, $q_i(t)$ là tốc độ dòng chảy ngõ vào thay đổi theo thời gian và $Q_c(t)$ tốc độ dòng chảy được tính toán hoặc theo yêu cầu.

Đặt các biến trạng thái như (3) và (4):

$$H_2(t) = x_1(t) \quad (3)$$

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (4)$$

Thế (3) và (4) vào (1), ta được (5):

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{1 - K_{12} K_{21}}{\tau_1 \tau_2} x_1(t) - \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} x_2(t) + \frac{K_1 K_2}{\tau_1 \tau_2} Q_1(t) \quad (5)$$

Đặt:

$$f(x) = -\frac{1 - K_{12} K_{21}}{\tau_1 \tau_2} x_1(t) - \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} x_2(t) \quad (6)$$

Không gian trạng thái của hệ thống bốn kép như (7) và (8):

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = f(x) + \frac{K_1 K_2}{\tau_1 \tau_2} u(t) \end{cases} \quad (7)$$

$$H_2(t) = x_1(t) \quad (8)$$

Với $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$ là vector trạng thái của hệ thống, $Q_1(t) = u(t)$ là tín hiệu điều khiển.

3. Thiết kế bộ điều khiển

3.1. Điều khiển trượt

Trong phần này, nghiên cứu sẽ thiết kế bộ điều khiển trượt (SMC) cho hệ thống bốn kép dựa vào luật tiếp cận hàm mũ (Exponential Reaching Law: ERL).

Sai số bám của bộ SMC được định nghĩa như (9):

$$e = H_{2d} - H_2 \quad (9)$$

Trong đó, H_{2d} là mức chất lỏng mong muốn và H_2 là mức chất lỏng thực tế của hệ thống bốn kép.

Đạo hàm bậc một và hai của (9), ta có (10) và (11):

$$\dot{e} = \dot{H}_{2d} - \dot{H}_2 \quad (10)$$

$$\ddot{e} = \ddot{H}_{2d} - \ddot{H}_2 \quad (11)$$

Mặt trượt s được định nghĩa như (12) [12]:

$$s = \dot{e} + ce \quad (12)$$

Thế (7) vào đạo hàm của mặt trượt, ta có (13):

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + c\dot{e} = \ddot{H}_{2d} - \ddot{H}_2 + c\dot{e} \\ &= \ddot{H}_{2d} - f - \frac{K_1 K_2}{\tau_1 \tau_2} u + c\dot{e} \end{aligned} \quad (13)$$

Với luật tiếp cận hàm mũ, ta có (14) [12]:

$$\dot{s} = -\eta \text{sign}(s) - \kappa s \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s \left(\ddot{H}_{2d} - f - \frac{K_1 K_2}{\tau_1 \tau_2} u + c\dot{e} \right) \\ &= s \left[\ddot{H}_{2d} - f - \frac{K_1 K_2}{\tau_1 \tau_2} \left[-\frac{\tau_1 \tau_2}{K_1 K_2} (f - c\dot{e} - \eta \text{sign}(s) - \kappa s - \ddot{H}_{2d}) \right] + c\dot{e} \right] \\ &= s(-\eta \text{sign}(s) - \kappa s) = -\eta |s| - \kappa s^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

3.2. Điều khiển trượt cuốn chiếu

Trong phần này, nghiên cứu sẽ thiết kế bộ điều khiển trượt cuốn chiếu (BSMC) cho hệ thống bồng kép dựa vào luật tiếp cận hàm mũ. Các bước cơ bản của bộ điều khiển BSMC có thể được thiết kế như sau [12]:

➤ Bước 1

Sai số bám của bộ BSMC được định nghĩa như (18):

$$e_1 = H_2 - H_{2d} \quad (18)$$

Đạo hàm của (18), ta được (19):

$$\dot{e}_1 = \dot{H}_2 - \dot{H}_{2d} = x_2 - \dot{H}_{2d} \quad (19)$$

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (20):

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (20)$$

Đạo hàm của (20), ta được (21):

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (x_2 - \dot{H}_{2d}) \quad (21)$$

Với $\eta > 0, \kappa > 0$

Luật điều khiển trượt dựa vào luật tiếp cận hàm mũ (SMC-ERL) cho hệ thống như (15):

$$u_{SMC-ERL} = -\frac{\tau_1 \tau_2}{K_1 K_2} (f - c\dot{e} - \eta \text{sign}(s) - \kappa s - \ddot{H}_{2d}) \quad (15)$$

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (16):

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (16)$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov, ta được (17):

Để $\dot{V}_1 \leq 0$, ta chọn $x_2 = s_{bs} - c_1 e_1 + \dot{H}_{2d}$, nghĩa là:

$$s_{bs} = x_2 + c_1 e_1 - \dot{H}_{2d} = c_1 e_1 + \dot{e}_1, \quad c_1 > 0 \quad (22)$$

Trong đó, S_{bs} là mặt trượt của bộ BSMC. Vì thế, ta có (23):

$$\dot{V}_1 = e_1 s_{bs} - c_1 e_1^2 \quad (23)$$

Nếu $S_{bs} = 0$, thì $\dot{V}_1 \leq 0$. Do đó, Bước 2 sẽ được thực hiện.

➤ Bước 2

Hàm Lyapunov được định nghĩa như (24):

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} s_{bs}^2 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{vì } \dot{s}_{bs} &= \dot{x}_2 + c_1 \dot{e}_1 - \ddot{H}_{2d} \\ &= f + \frac{K_1 K_2}{\tau_1 \tau_2} u + c_1 \dot{e}_1 - \ddot{H}_{2d} \end{aligned}$$

nên (24) trở thành (25):

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + s_{bs}\dot{s}_{bs} = -c_1e_1^2 + s_{bs} \left(f + \frac{K_1K_2}{\tau_1\tau_2}u + c_1\dot{e}_1 - \ddot{H}_{2d} + e_1 \right) \quad (25)$$

Để $\dot{V}_2 \leq 0$, bộ điều khiển BSMC dựa vào luật tiếp cận hàm mũ được thiết kế như (26)

$$f + \frac{K_1K_2}{\tau_1\tau_2}u + c_1\dot{e}_1 - \ddot{H}_{2d} + e_1 = -c_2s_{bs} - \mu \text{sign}(s_{bs}) - \rho s_{bs} \quad (26)$$

Hay
$$u_{BSMC-ERL} = \frac{\tau_1\tau_2}{K_1K_2} \left(-f - c_1\dot{e}_1 + \ddot{H}_{2d} - e_1 - c_2s_{bs} - \mu \text{sign}(s_{bs}) - \rho s_{bs} \right) \quad (27)$$

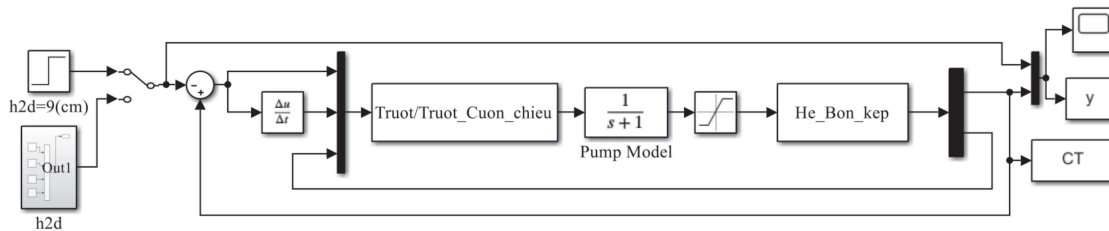
Trong đó, $c_2 > 0, \mu > 0, \beta > 0$. Thành phần $-c_2s_{bs}$ được chọn để đảm bảo cung cấp sự giảm dần cần thiết cho hệ thống với c_1 như là thông số thiết kế. Lúc này, ta có:

$$\dot{V}_2 = -c_1e_1^2 - c_2s_{bs}^2 - \mu|s_{bs}| - \rho s_{bs}^2 \leq 0 \quad (28)$$

Vì thế, $e_1 \rightarrow 0$ và $\dot{e}_1 \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.

4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất trong MATLAB/Simulink hệ thống bồn kép được trình bày như Hình 2.

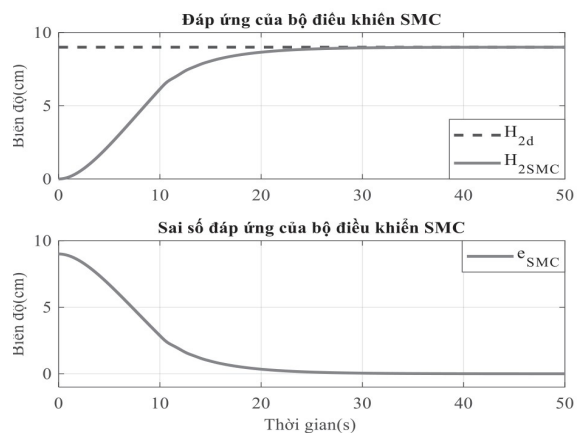


Hình 2. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất trong MATLAB/Simulink

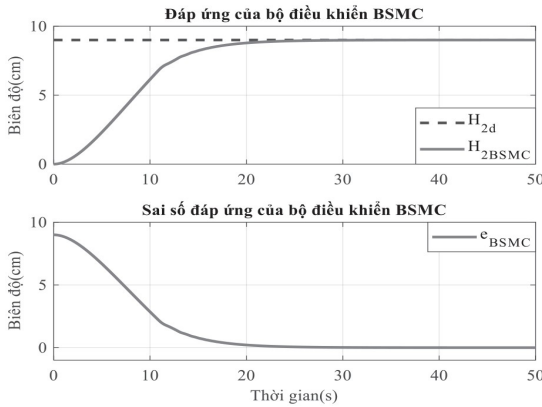
Các thông số của hệ thống bồn kép sử dụng mô phỏng như sau: $A_1=A_2=32(cm^3)$, $\alpha_1=\alpha_2=14.3(cm^{3/2}/s)$, $\alpha_3=20(cm^{3/2}/s)$, $T_c=1(s)$, $Q_{imax}=300(cm^3/s)$, $\tau_1=7.445$, $\tau_2=6.2$, $K_1=0.23267$, $K_2=0.1939$, $K_{12}=0.6453$ và $K_{21}=0.5378$. Các thông số của bộ điều khiển SMC là: $c = 0.2, \eta = 0.2, K = 10$ và $c_1 = 0.2, c_2 = 25, \mu = 0.2, \beta = 10$ là các thông số của bộ điều khiển BSMC.

Đáp ứng và sai số của hệ thống bồn kép với bộ điều khiển SMC và BSMC khi chiều cao mức chất lỏng mong muốn (H_{2d}) trong bồn 2 là 9(cm) được trình bày như Hình 3 và Hình 4. Mức chất lỏng thực tế (H_2) của bộ điều khiển SMC và BSMC đều hội tụ về H_{2d} trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0 và không có vọt lố. Tuy nhiên, thời gian tăng và thời gian xác lập của bộ điều khiển BSMC lớn hơn bộ điều khiển SMC. Các chỉ tiêu chất lượng này được trình bày trong Bảng 1 và được

so sánh với bộ điều khiển PID [1] áp dụng cho hệ thống này (có cùng thông số với hệ thống nghiên cứu). Kết quả ở Bảng 1 cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển SMC và BSMC so với bộ điều khiển PID [1]. Điều này chứng tỏ sự phù hợp của bộ điều khiển SMC và BSMC trong ứng dụng điều khiển bám mức chất lỏng hệ thống bồn kép.



Hình 3. Đáp ứng và sai số của hệ thống bồn kép với bộ điều khiển SMC

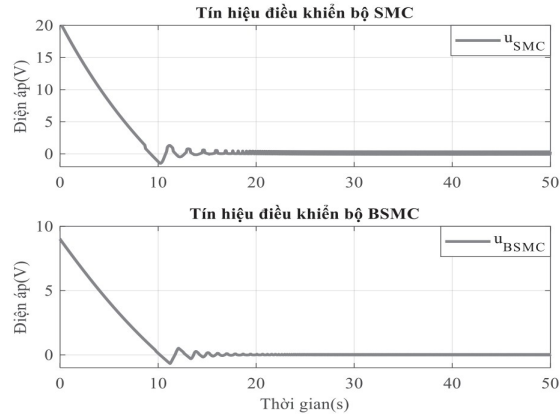


Hình 4. Đáp ứng và sai số của hệ thống bồn kép với bộ điều khiển BSMC

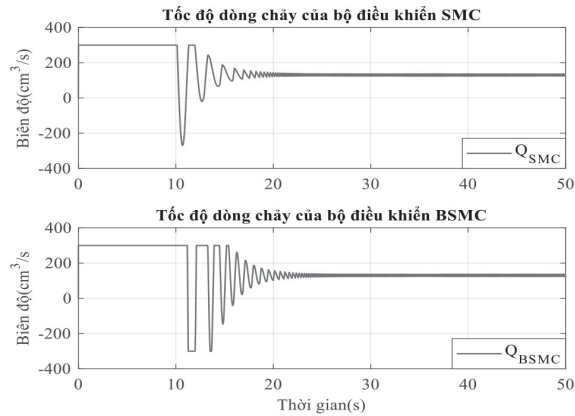
Bảng 1. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển SMC và BSMC

Các chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập (cm)
SMC	12.4	23.2	0	0
BSMC	11.23	20	0	0
PID [1]	3.72	24.9	28	0

Hình 5 trình bày tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển SMC (u_{SMC}) và BSMC (u_{BSMC}). Tín hiệu điều khiển của bộ BSMC ít dao động hơn so với bộ SMC. Điều này đã chứng minh rằng hiện tượng dao động tần số cao (chattering) đã được giảm bớt sau khi kết hợp bộ điều khiển trượt với kỹ thuật cuốn chiếu. Tốc độ dòng chảy của bộ điều khiển SMC và BSMC được trình bày như Hình 6.

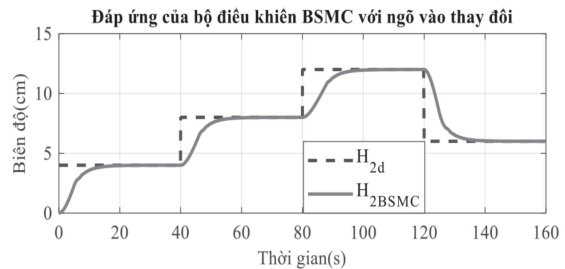
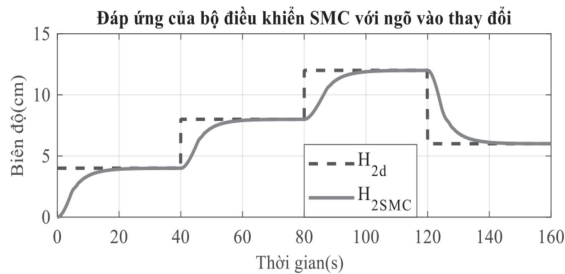


Hình 5. Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển SMC và BSMC



Hình 6. Tốc độ dòng chảy của bộ điều khiển SMC và BSMC

Đáp ứng của hệ thống bồn kép với bộ điều khiển SMC và BSMC khi ngõ vào thay đổi được thể hiện trên Hình 7. Quan sát đáp ứng ở Hình 7 ta thấy rằng mức chất lỏng thực tế của hệ thống vẫn hội tụ về mức chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0 và không có độ vọt lố.

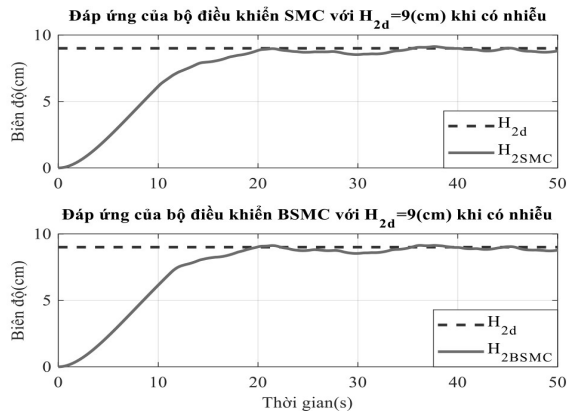


Hình 7. Đáp ứng của hệ thống bồn kép với bộ điều khiển SMC và BSMC khi ngõ vào thay đổi

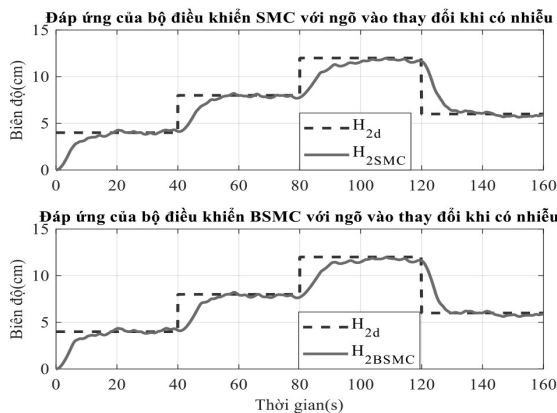
Đáp ứng của hệ thống bồn kép bộ điều khiển SMC và BSMC khi nhiễu trắng

tác động vào ngõ ra của hệ thống (giả sử nhiễu cảm biến với công suất 0.1(w)) với

ngõ vào mong muốn $H_{2d} = 9(\text{cm})$ và H_{2d} thay đổi được trình bày như Hình 8 và Hình 9. Mức chất lỏng thực tế của bồn 2 vẫn hội tụ về mức chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn. Điều này khẳng định tính bền vững của phương pháp điều khiển đề xuất.



Hình 8. Đáp ứng của hệ thống bồn kép với bộ điều khiển SMC và BSMC khi có nhiễu



Hình 9. Đáp ứng của hệ thống bồn kép bộ điều khiển SMC và BSMC với ngõ vào thay đổi khi có nhiễu

Các kết quả mô phỏng bộ điều khiển SMC và BSMC thể hiện từ Hình 3 đến Hình 9 đã cho thấy sự phù hợp, tính hiệu quả và bền vững của bộ điều khiển đề xuất khi áp dụng điều khiển bám mức chất lỏng hệ thống bồn kép.

5. Kết luận

Bài báo đã thiết kế bộ điều khiển SMC và BSMC để điều khiển mức chất lỏng thực tế trong bồn 2 của hệ thống bồn kép hội tụ về mức chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn. Đáp ứng thực tế của hệ thống với bộ điều khiển đề xuất khi chiều cao mức chất lỏng mong muốn $H_{2d} = 9(\text{cm})$ và H_{2d} thay đổi đều hội tụ về giá trị mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0 và không có vọt lố. Chất lượng của bộ điều khiển đề xuất hiệu quả hơn so với bộ điều khiển PID truyền thống áp dụng cho cùng hệ thống (có cùng thông số với hệ thống nghiên cứu). Các kết quả mô phỏng đạt được với MATLAB/Simulink đã chứng tỏ sự phù hợp, tính hiệu quả và bền vững của bộ điều khiển SMC và BSMC trong ứng dụng điều khiển bám mức chất lỏng hệ thống bồn kép. Trong thời gian tới, nhóm nghiên cứu sẽ tiến hành áp dụng các phương pháp điều khiển lai hoặc điều khiển thông minh cho hệ thống để cải thiện, nâng cao chất lượng điều khiển và thực nghiệm trên mô hình thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Muntaser and N. Buaossa. (2021). *Coupled Tank Non-linear System; Modeling and Level Control using PID and Fuzzy Logic Techniques*. Systems and Control, 1-8.
- [2]. Trinh Luong Mien (2017). *Liquid Level Control of Coupled-Tank System Using Fuzzy-Pid Controller*. International Journal of Engineering Research & Technology, 6(11), 459-464.
- [3]. S. Yordanova. (2016). *Fuzzy logic approach to coupled level control*. Systems Science & Control Engineering, 4(1), 215-222.
- [4]. P. Gabriel Grace Keerthana and J. Gnanasoundharam (2016). *Comparison of PI*

- Controller, Model Reference Adaptive Controller and Fuzzy Logic Controller for Coupled Tank System.* Indian Journal of Science and Technology, 9(12), 1-5.
- [5]. D. Mursyitah, A. Faizal, and E. Ismaredah. (2018). *Level Control in Coupled Tank System Using PID-Fuzzy Tuner Controller.* In 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS), Batu, East Java, Indonesia, Oct, 293-298.
- [6]. Sumit Kumar and Mrs. Pooja Nagpal. (2017). *Comparative Analysis of P, PI, PID and Fuzzy Logic Controller for Tank Water Level Control System.* International Research Journal of Engineering and Technology, 4(4), 1174-1177.
- [7]. A. N. Abdalla, T. K. Ibrahim, and H. Tao. (2018). *Adaptive Fuzzy/PD controller for Coupled Two Tank Liquid Levels system.* MATEC Web Conf, 225, 1-9.
- [8]. S. Y. Sim, S. L. Kek, and K. G. Tay. (2017). *Optimal control of a coupled tanks system with model-reality differences.* Cambridge, UK, 1872, 1-7.
- [9]. M. Saad. (2017). *Performance Analysis of a Nonlinear Coupled-Tank System Using PI Controller.* ujca, 5(4), 55–62.
- [10]. S. Balamurugan, P. Venkatesh, and M. Varatharajan. (2017). *Fuzzy sliding-mode control with low pass filter to reduce chattering effect: an experimental validation on Quanser SRIP.* Sādhanā, 42(10), 1693-1703.
- [11]. He Shen, Joseph Iorio and Ni Li. (2019). *Sliding Mode Control in Backstepping Framework for a Class of Nonlinear Systems.* Journal of Marine Science and Engineering, 7(12), 1-18.
- [12]. Jinkun Liu. (2017). *Sliding Mode Control Using MATLAB.* Elsevier Science.