THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN MỜ CHO HỆ NÂNG TỪ DỰA TRÊN MÔ HÌNH MỜ TAGAKI-SUGENO

Nguyễn Thị Việt Hương[1], Vũ Thị Thúy Nga[2*]

Tóm tắt: *Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển mờ cho hệ thống nâng từ ứng dụng trong các phòng thí nghiệm. Ban đầu mô hình toán học của hệ thống được xây dựng từ các mối quan hệ vật lý và các thử nghiệm thực nghiệm. Từ mô hình này, kỹ thuật điều khiển mờ dựa trên mô hình mờ Takagi-Sugeno được xây dựng để đảm bảo tính ổn định cho hệ thống. Bộ điều khiển có cấu trúc đơn giản nên khá thuận tiện cho việc cài đặt trong các hệ thống thực. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã chỉ ra rằng, hệ thống có đáp ứng tốt với các giá trị đặt cố định cũng như biến đổi theo thời gian.*

Từ khóa: Hệ thống nâng từ; Điều khiển mờ; Hệ phi tuyến.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các hệ thống nâng từ đang ngày càng được sử dụng nhiều trong các ngành công nghệ cao do các ưu điểm như loại bỏ tiếp xúc cơ khí, dễ dàng thay đổi vị trí vật cần nâng,…[1]-[9]. Tuy nhiên, việc điều khiển cho hệ thống này gặp không ít khó khăn do bản thân hệ thống là một hệ không ổn định và mô hình có độ phi tuyến cao. Chính vì vậy, việc thiết kế điều khiển cho các hệ thống nâng từ vẫn đang và sẽ nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học.

Trước đây, các kỹ thuật điều khiển kinh điển đã được các nhà khoa học áp dụng cho hệ thống nâng từ như PID [10], tuyến tính hóa quanh điểm làm việc [11]. Tuy nhiên, các phương pháp này chỉ đảm bảo hệ thống làm việc tốt trong một dải hẹp của giá trị đặt. Để khắc phục nhược điểm này, nhiều phương pháp điều khiển hiện đại đã được áp dụng. Ở (12) một bộ điều khiển trượt thích nghi đã được giới thiệu cho hệ nâng từ để giữ ổn định vị trí với độ sai lệch nhỏ và đáp ứng nhanh. Tuy nhiên, bộ điều khiển khá phức tạp và các kết quả đạt được còn đơn giản. Thuật toán điều khiển backstepping kết hợp mờ và mạng nơ ron được giới thiệu ở [13] để giữ ổn định cho hệ nâng từ lai. Ban đầu mô hình hệ thống được xây dựng dưới dạng truyền ngược, sau đó, bộ điều khiển backstepping được thiết kế dựa trên mô hình đã xây dựng. Một bộ điều khiển mờ và nơ ron với luật thích nghi trực tuyến được sử dụng kết hợp để loại bỏ sự ảnh hưởng của các yếu tố bất định ảnh hưởng đến sự hoạt động của hệ thống. Mặc dù thuật toán phức tạp nhưng đã cho đáp ứng tốt trong các điều kiện hoạt động khác nhau. Ở [14], bộ điều khiển tối ưu phi tuyến kết hợp với bộ ước lượng tham số được thiết kế để giữ ổn định cho hệ nâng từ. Thuật toán trình bày khá đơn giản; Tuy nhiên, các kết quả mô phỏng và thực nghiệm mới chỉ thực hiện với việc giữ ổn định vị trí ở một điểm cố định. Trong [15], bộ điều khiển mờ thích nghi dựa theo mô hình mẫu được đề xuất. Hệ cho chất lượng điều khiển tốt với các loại tín hiệu đặt khác nhau và có đáp ứng tốt với nhiễu tác động trong quá trình làm việc. Tuy nhiên, cấu trúc bộ điều khiển khá phức tạp với sự kết hợp của ba kỹ thuật điều khiển trong mô hình. Cấu trúc điều khiển trượt dự báo kết hợp với bộ ước lượng nhiễu được đề xuất cho hệ nâng từ trong [16]. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh chặt chẽ qua toán học cũng như các kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên, do sử dụng kỹ thuật điều khiển trượt trong mô hình nên đáp ứng đầu ra vẫn còn tồn tại hiện tượng dao động (chattering). Ở [17], mô hình mờ T-S được các tác giả sử dụng để thiết kế điều khiển cho hệ nâng từ nhưng kết quả đạt được mới ở mức mô phỏng và giữ ổn định vật nâng tại một vị trí không đổi.

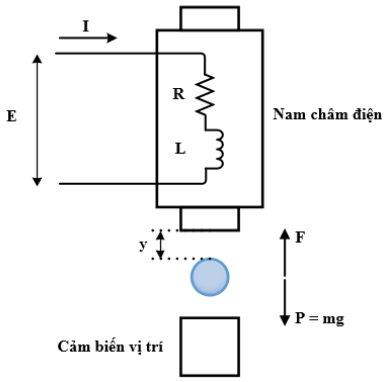
Trong bài báo này, một bộ điều khiển mờ dựa trên mô hình mờ Tagaki-Sugeno (TS) được giới thiệu để giữ ổn định cho hệ thống nâng từ. Đầu tiên, mô hình phi tuyến của hệ

thống được xây dựng dựa trên các mối quan hệ về cơ và điện trong hệ thống. Sau đó, mô hình tuyến tính cục bộ cho các điểm làm việc xác định được xây dựng dựa trên mô hình mờ TS. Các bộ điều khiển phản hồi trạng thái cục bộ được thiết kế cho các mô hình tuyến tính cục bộ này bằng cách giải phương trình Lyapunov của hệ tuyến tính đó. Mô hình cũng như bộ điều khiển toàn cục sau đó được xấp xỉ dựa vào kỹ thuật mờ. Tính khả thi của thuật toán được kiểm chứng thông qua mô phỏng và cài đặt thực nghiệm. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm chứng tỏ rằng, bộ điều khiển đề xuất cho đáp ứng tốt với các loại tín hiệu đặt khác nhau.

2. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ NÂNG TỪ

2.1. Mô hình hệ thống nâng từ

Xét hệ thống nâng từ có cấu trúc như hình 1.



Hình 1. *Sơ đồ cấu trúc hệ thống nâng từ.*

Trong đó, *I* là dòng điện chạy trong cuộn dây, *F* là lực từ trường tác động lên vật, *P* là trọng lực của vật, *y* là khoảng cách từ cuộn dây đến vật.

Các lực tác dụng lên nam châm vĩnh cửu bao gồm trọng lực và lực hút của nam châm điện. Áp dụng định luật II Newton, ta có:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = mg - F \tag{1}$$

Trong đó, *m* là khối lượng vật nặng, *g* là gia tốc trọng trường.

Mô hình của mạch điện được biểu diễn như sau:

$$E(t) = RI(t) + L\frac{dI(t)}{dt} \tag{2}$$

trong đó, *E* là điện áp 2 đầu nam châm điện, *R* là điện trở nam châm điện, *L* là độ từ cảm của nam châm điện. Tuy nhiên, bằng thực nghiệm đã xác định được thời gian xác lập của dòng điện là rất nhỏ (< 50us) và không đáng kể so với động học của hệ thống nên ta có thể viết :

$$E(t)=RI(t) \tag{3}$$

Giả sử ảnh hưởng của từ trường nam châm vĩnh cửu lên từ trường nam châm điện là không đáng kể, khi đó, độ lớn của lực từ tác dụng lên nam châm vĩnh cửu là:

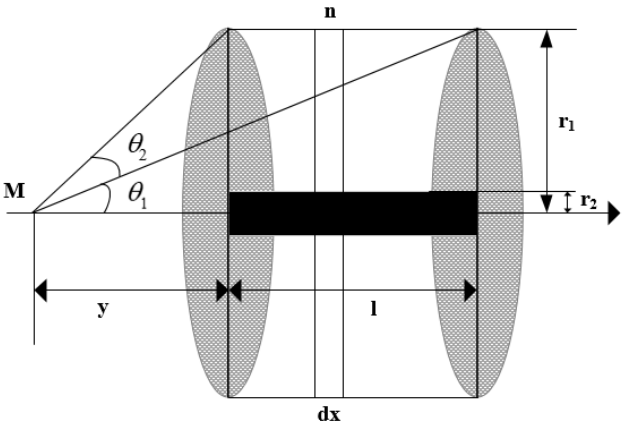
$$F = grad(\vec{B}.\vec{m}_m) \tag{4}$$

Trong đó, m_m là vector moment từ của nam châm vĩnh cửu, do 2 vector cùng phương

nên $\vec{B}.\vec{m}_m = B.m_m$. Mặt khác do tính đối xứng nên thành phần lực theo phương ngang sẽ bị triệt tiêu. Do đó :

$$F = \frac{d}{dt}(B.m_m) \tag{5}$$

Theo [11], với một nam châm điện có kích thước như hình 2 thì từ trường tại một điểm cách một đầu nam châm khoảng cách *y* có độ lớn là:



Hình 2. *Các kích thước của nam châm.*

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r n^2 I}{2}\left((y+l)\sin^{-1}\left(\frac{r_2}{y+l}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r_1}{y+l}\right) + y\left(\sin^{-1}\left(\frac{r_1}{y}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r_2}{y}\right)\right)\right) \tag{6}$$

Thay (6) vào (5) thu được:

$$F = I.k\left(\arcsin\left(\frac{r_1}{y}\right) - \arcsin\left(\frac{r_2}{y}\right) + \arcsin\left(\frac{r_2}{1+y}\right) - \left(\frac{r_1}{y\sqrt{1-\frac{r_1^2}{y^2}}} - \frac{r_2}{y\sqrt{1-\frac{r_2^2}{y^2}}}\right)\right.$$

$$\left. + \frac{r_1}{\sqrt{1-\frac{r_1^2}{(l+y)^2}}(l+y)^2} - \frac{r_2}{\sqrt{1-\frac{r_2^2}{(l+y)^2}}(l+y)}\right) \tag{7}$$

Trong đó, $k = \dfrac{\mu\mu_0 n^2 \,\mathrm{Im}_m}{2}$

Ta nhận thấy đa thức

$$k\left(\arcsin\left(\frac{r_1}{y}\right) - \arcsin\left(\frac{r_2}{y}\right) + \arcsin\left(\frac{r_2}{1+y}\right) - \left(\frac{r_1}{y\sqrt{1-\frac{r_1^2}{y^2}}} - \frac{r_2}{y\sqrt{1-\frac{r_2^2}{y^2}}}\right)\right.$$

$$+\frac{r_1}{\sqrt{1-\frac{r_1^2}{(l+y)^2}(l+y)^2}}-\frac{r_2}{\sqrt{1-\frac{r_2^2}{(l+y)^2}(l+y)}}\Bigg)$$

là một hàm đơn điệu giảm của y nên ta có thể xấp xỉ nó dưới dạng một phân thức bậc n như sau

$$q(y)=\frac{1}{b_0+b_1y+b_2y^2+...+b_ny^n} \tag{8}$$

Trong đó, các hệ số b_i (i = 1,…n) được xác định bằng các kết quả đo thực nghiệm và cộng cụ Identification trong Matlab. Sau khi tiến hành việc đo đạc số liệu và tính toán, các hệ số này có giá trị như sau: b_0=-2.259, b_1=300.1, b_2=-10280, b_3=342400, b_4=-670000;

Thay (8) vào (7) ta được

$$F=I.q(y)=\frac{I}{b_0+b_1y+b_2y^2+...+b_ny^n} \tag{9}$$

Đặt các biến trạng thái $x_1 = y$, $x_2 = dy/dt$. Lúc này, phương trình (1) được viết lại dưới dạng hệ phương trình trạng thái như sau:

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=g-\dfrac{q(x_1)}{mR}u\\ y=x_1\end{cases} \tag{10}$$

Với u là điện áp E đặt vào hai đầu cuộn dây.

2.2. Thiết kế bộ điều khiển mờ cho hệ thống nâng từ

Đặt $e=\begin{bmatrix}e_1 & e_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_1-x_{1r} & x_2-x_{2r}\end{bmatrix}$, trong đó, x_{1r}, x_{2r} là giá trị khoảng cách mong muốn từ vật cần nâng đến nam châm điện và đạo hàm khoảng cách mong muốn. Từ (10) ta có mô hình động học sai số của hệ thống như sau:

$$\begin{cases}\dot{e}_1=x_2-\dot{x}_{1r}\\ \dot{e}_2=g-\dfrac{q(x_1)}{mR}u-\dot{x}_{2r}\\ y=x_1\end{cases} \tag{11}$$

Hay

$$\begin{cases}\dot{e}_1=e_2\\ \dot{e}_2=g-\dfrac{q(x_1)}{mR}u-\dot{x}_{2r}\\ y=x_1\end{cases} \tag{12}$$

Từ mô hình (12), bộ điều khiển được tách làm hai thành phần u_1 và u_2 như sau:

$$u=u_1+u_2 \tag{13}$$

Trong đó, u_1 là thành phần điều khiển phản hồi giữ cho hệ ổn định, u_2 là thành phần truyền thẳng:

$$u_2 = \frac{mR}{q(x_1)}\left(g + \dot{x}_{2r}\right) \tag{14}$$

Với sự biến đổi này, mô hình (12) trở thành:

$$\begin{cases} \dot{e} = Ae + g(x_1)u_1 \\ y = x_1 \end{cases} \tag{15}$$

Trong đó, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $g(x_1) = \frac{q(x_1)}{mR}$

Để thiết kế bộ điều khiển mờ T-S cho hệ (15) trước tiên cần phải xây dựng mô hình mờ T-S từ mô hình phi tuyến. Mô hình mờ T-S được xây dựng bằng cách, lựa chọn *r* điểm làm việc trong không gian trạng thái, từ *r* điểm đó ta xác định được *r* mô hình tuyến tính cục bộ. Sau cùng, mô hình tuyến tính toàn cục được suy luận từ các mô hình cục bộ đó.

Luật mờ cho mỗi điểm làm việc cục bộ như sau:

Luật *i*: Nếu $x_{1i} = X_i$ thì:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= Ae + B_i u_1 \\ u_1 &= -K_i e \end{aligned} \tag{16}$$

Trong đó, *Ki* là hệ số khuếch đại của bộ điều khiển phản hồi trạng thái LQR, giá trị của *Ki* được tính từ việc giải phương trình Ricatti cho cặp tham số (*A, Bi*).

Mô hình và bộ điều khiển toàn cục của hệ thống được suy luận từ luật mờ có dạng như sau:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= Ae + \sum_{i=1}^{r} h_i(x_1) B_i u_1 \\ u_1 &= -\sum_{i=1}^{r} h_i(x_1) K_i e \end{aligned} \tag{17}$$

Trong đó, $h_i(x_1) = m_i(x_1) / \sum_{j=1}^{r} m_j(x_1)$ với $m_i(x_1)$ là hàm thành viên của luật mờ thứ *i*.

Tính ổn định của hệ kín (17) dễ dàng được chứng minh bởi vì do K_i được tính từ phương trình Ricatti nên ở mỗi hệ cục bộ ta có:

$$\begin{aligned} A^T P + PA^T - PB_i R^{-1} B_i^T P + Q = 0 \\ K_i = R^{-1}\mathbf{B}_i P \end{aligned} \tag{18}$$

trong đó, *P, Q, R* là các ma trận đối xứng xác định dương.

Tương tự như thế, hệ số khuếch đại của bộ điều khiển LQR cho hệ toàn cục (17) có dạng:

$$K = \sum_{i=1}^{r} h_i(x_1) R^{-1}\mathbf{B}_i P = \sum_{i=1}^{r} h_i(x_1) K_i \tag{19}$$

Do đó, bộ điều khiển LQR cục bộ có dạng: $u_1 = -\sum_{i=1}^{r} h_i(x_1) K_i e$.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để kiểm nghiệm tính đúng đắn và phù hợp của bộ điều khiển thiết kế ở trên, thuật toán được mô phỏng trên Matlab/Simulink và cài đặt trên hệ thống thực.

Vật nặng trong thí nghiệm có khối lượng m = 50g, điện trở cuộn dây $R = 8\Omega$.

Số luật mờ được lựa chọn để thực thi là $r = 4$, hàm thành viên được lựa chọn là hàm mũ:

$$h_i(x_1) = \frac{e^{-\mu(x_1 - X_{1i})}}{\sum_{j=1}^{r} e^{-\mu(x_1 - X_{1j})}} \quad (20)$$

Cần lưu ý rằng, số luật mờ cũng như hàm thành viên của luật mờ được lựa chọn hoàn toàn dựa vào kinh nghiệm. Số luật mờ càng lớn thì độ tin cậy càng cao nhưng độ phức tạp sẽ tăng lên. Do vậy, ở bài báo này, các số luật mờ và thành thành viên được lựa chọn dựa vào việc thử nghiệm trực tiếp trên hệ thống để đạt được độ tin cậy hợp lý và độ phức tạp vừa phải.

Các giá trị rõ của x_1 được lựa chọn là Xi nằm trong dải hoạt động của x1, cụ thể trong bài này, các giá trị được chọn là:

$$X_{11} = 0.01; \quad X_{12} = 0.02; \quad X_{13} = 0.03; \quad X_{14} = 0.04$$

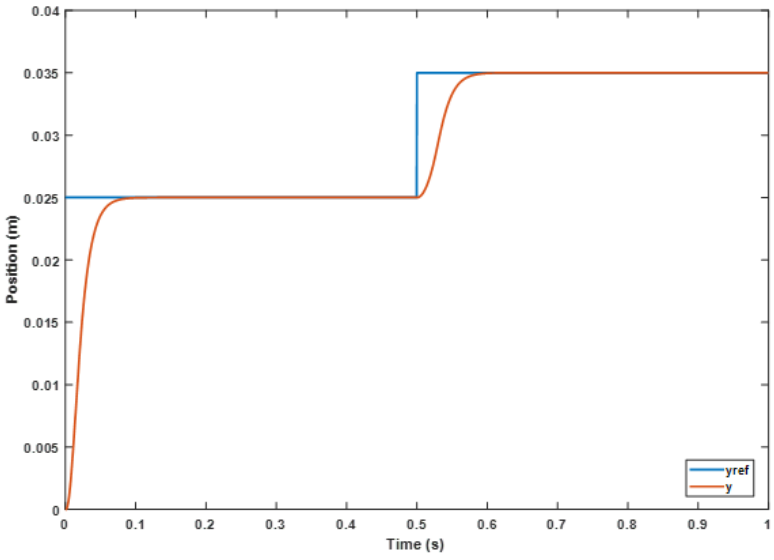
Tương ứng sẽ tính đượng các giá trị của $B_i = \frac{q(X_{1i})}{mR}$ là:

$$B_1 = 0.3767; \quad B_2 = 0.1642; \quad B_3 = 0.0825; \quad B_4 = 0.046$$

Quá trình mô phỏng và cài đặt thực nghiệm được thực hiện cho hai trường hợp:

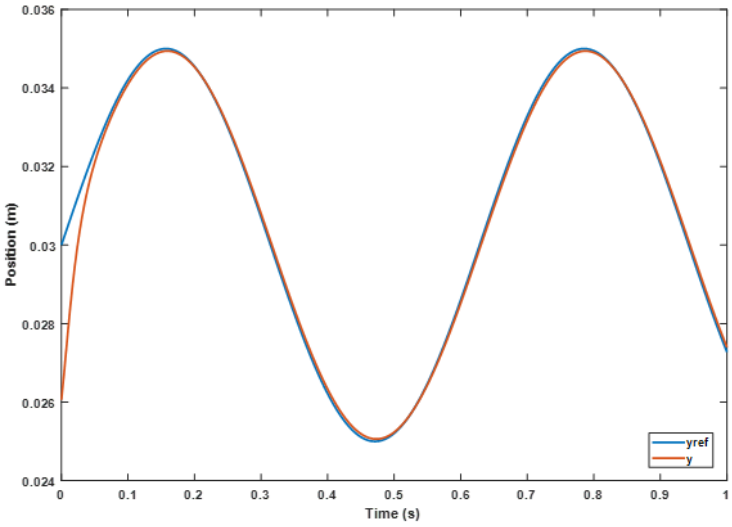
- Trường hợp 1: khoảng cách vị trí giữa vật nặng và cuộn dây là thay đổi bước nhảy.
- Trường hợp 2: khoảng cách vị trí giữa vật nặng và cuộn dây biến đổi hình sin.

Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm được cho trên các hình từ 3 đến 6

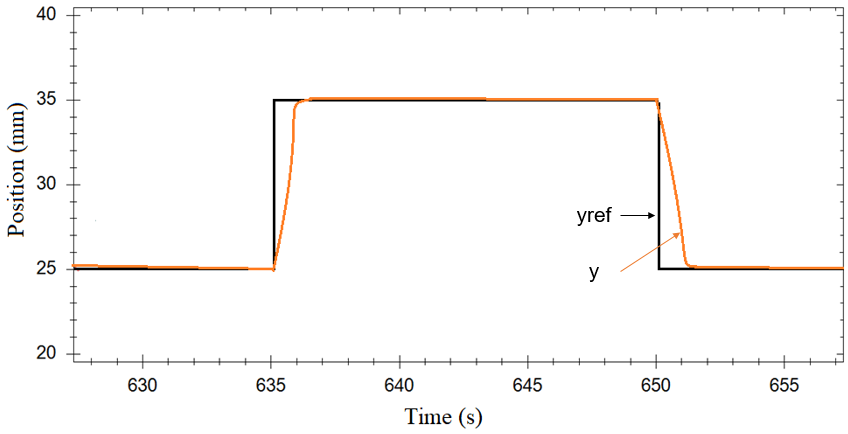


Hình 3. *Kết quả mô phỏng khi giá trị đặt là đáp ứng bước nhảy.*

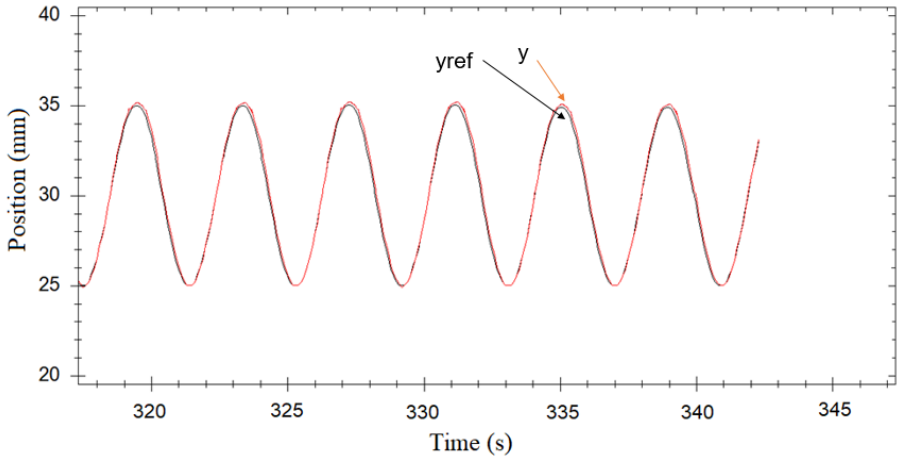
Hình 3 và 4 là kết quả mô phỏng với các dạng tín hiệu đặt khác nhau. Hình 3 là đáp ứng của hệ thống khi tín hiệu đặt có dạng bước nhảy. Thời gian đáp ứng của tín hiệu khoảng 0.1 giây và độ sai lệch vị trí gần như bằng 0.



Hình 4. *Kết quả mô phỏng khi giá trị đặt biến đổi hình sin.*



Hình 5. *Kết quả thực nghiệm khi giá trị đặt là đáp ứng bước nhảy.*



Hình 6. *Kết quả thực nghiệm khi giá trị đặt biến đổi hình sin.*

Hình 4 là đáp ứng đầu ra khi tín hiệu đặt thay đổi hình sin. Ở dạng tín hiệu đặt này hệ thống cũng cho đáp ứng tốt, tín hiệu ra bám theo giá trị đặt cả về biên độ và tần số với sai

lệch không đáng kể. Các hình 5 và 6 là kết quả chạy thực nghiệm trên mô hình vật lý tương ứng với hai trường hợp đã mô phỏng. Ở kết quả thực nghiệm, do ảnh hưởng của phần cứng nên đáp ứng của tín hiệu ra chậm hơn so với mô phỏng (khoảng 1 giây). Tuy nhiên, sai lệch tĩnh trong cả hai trường hợp đều không đáng kể.

Từ các kết quả mô phỏng và thực nghiệm ta thấy rằng, bộ điều khiển được đề xuất đảm bảo tính ổn định của hệ thống với các loại tín hiệu khác nhau (không đổi, nhảy bậc, và thay đổi theo thời gian). Thời gian đáp ứng của hệ thống khá nhanh và độ sai lệch của đáp ứng đầu ra so với giá trị đặt là không đáng kể. Như vậy, bộ điều khiển đã trình bày hoàn toàn khả thi khi cài đặt trong thực tế.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một bộ điều khiển mờ dựa trên mô hình mờ Tagaki-Sugeno (TS) để giữ ổn định cho hệ thống nâng từ. Đầu tiên, mô hình phi tuyến của hệ thống được xây dựng dựa trên các mối quan hệ về cơ và điện trong hệ thống. Sau đó, mô hình tuyến tính cục bộ cho các điểm làm việc xác định được xây dựng dựa trên mô hình mờ TS. Các bộ điều khiển phản hồi trạng thái cục bộ được thiết kế cho các mô hình tuyến tính cục bộ này bằng cách giải phương trình Lyapunov của hệ tuyến tính đó. Mô hình cũng như bộ điều khiển toàn cục sau đó được xấp xỉ dựa vào kỹ thuật mờ. Tính khả thi của thuật toán được kiểm chứng thông qua mô phỏng và cài đặt thực nghiệm. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm chứng tỏ rằng, bộ điều khiển đề xuất cho đáp ứng tốt với các loại tín hiệu đặt khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. P. Samanta, H. Hirani, "*Magnetic bearing configurations: Theoretical and experimental studies*," IEEE Transactions on Magnetics, **vol. 44**, no. 2, pp. 292–300, (2008).

[2]. M. Tsuda, K. Tamashiro, S. Sasaki, T. Yagai, T. Hamajima, T. Yamada, et al., "*Vibration transmission characteristics against vibration in magnetic levitation type HTS seismic/vibration isolation device*," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **vol. 19**, no. 3, pp. 2249–2252, (2009).

[3]. F. Lin, H. Shieh, L. Teng, P. Shieh, "*Hybrid controller with recurrent neural network for magnetic levitation system*," IEEE Transactions on Magnetics, **vol. 41**, no. 7, pp. 2260–2269, (2005).

[4]. K. Raggl, B. Warberger, T. Nussbaumer, S. Burger, J. W. Kolar, "*Robust angle-sensorless control of a PMSM bearingless pump*," IEEE Transactions on Industrial Electronics, **vol. 56**, no. 6, (2009).

[5]. M. Komori, T. Yamane, "*Magnetically levitated micro PM motors by two types of active magnetic bearings*," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **vol. 6**, no. 1, pp. 43–49, (2001).

[6]. L. Yan, "*Development and application of MagLev transportation system*," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **vol. 18**, no. 2, pp. 92–99, (2008).

[7]. T. Ohji, H. Hara, K. Amei, M. Sakui, "*Three-dimensional motion of a small object by using a new magnetic levitation system having four I-shaped electromagnets*," IEEE Transactions on Magnetics, **vol. 44**, no. 11, pp. 4159–4162, (2008).

[8]. H. Han, D. Kim, "*Magnetic levitation: Maglev technology and applications*," London: Springer-verlag, (2016).

[9]. G. Schweitzer, E. Maslen, "*Magnetic bearings: Theory, design and application to rotating machinery*," Heidelberg: Springer-Verlag, (2009).

[10]. Q. Chen, Y. Tan, J. Li, I. Mareels, "*Decentralized PID control design for magnetic levitation systems using extremum seeking*," IEEE Access, **vol. 6**, pp. 3059-3067, (2018).
[11]. A. E. Hajjaji, M. Ouladsine, "*Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems*," IEEE Transactions on Industrial Electronics, **vol. 48**, no. 4, pp. 831-838, (2001).
[12]. N. Boonsatit1, C. Pukdeboon, "*Adaptive Fast Terminal Sliding Mode Control of Magnetic Levitation System*", Brazilian Society for Automatics–SBA, Springer, (2016).
[13]. R. J. Wai, J. X. Yao, J. D. Lee, "*Back stepping Fuzzy-Neural-Network Control Design for Hybrid Maglev Transportation System*," IEEE Transactions on neural networks and learning systems, (2016).
[14]. A. T. Tran, S. Suzuki, N. Sakamoto, "*Nonlinear optimal control design considering a class of system constraints with validation on a magnetic levitation system*," IEEE Journal, (2016).
[15]. J. J. Hernandez-Casan, M. A. Marquez-Veraa, B. D. Balderrama -Hernandez, "*Characterization and adaptive fuzzy model reference control for a magnetic levitation system*," Science Direct, (2016).
[16]. P. A. Q. Assis, R. K. H. Galvao, "*Sliding Mode Predictive Control of a Magnetic Levitation System Employing Multi-Parametric Programming*," IEEE Latin America Transactions, (2017).
[17]. M. Gholami, M. A. Shoorehdeli, Z. A. S. Dashti and M. Teshnehlab, "*Design of fuzzy parallel distributed compensation controller for magnetic levitation system*," 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC), Qazvin, pp. 1-5, (2013).

ABSTRACT

FUZZY LOGIC CONTROL FOR MAGNETIC LEVITATION SYSTEM BASED ON TAGAKI-SUGENO FUZZY MODEL

In this paper, the fuzzy logic control method for magnetic levitation system with laboratory size is presented. Firstly, the mathematical model of the system is built from physical relationships and experimental setup. From this model, fuzzy logic control technique based on Takagi-Sugeno fuzzy model is built to ensure the stability of the system. The controller has a simple structure so it is quite convenient for installation in real systems. The simulation and experimental results show that the system responds well to the step and time varying reference signals.

Từ khóa: Magnetic levitation system; Fuzzy logic control; Nonlinear system.

Nhận bài ngày 17 tháng 3 năm 2020
Hoàn thiện ngày 12 tháng 4 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 03 tháng 8 năm 2020

Địa chỉ: [1] Trường Cao đẳng Công nghiệp Thái Nguyên;
[2] Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
[*]Email: nga.vuthithuy@hust.edu.vn.