



THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ THỐNG NÂNG CỦA TÀU ĐỆM TỪ TRƯỜNG

Trần Nhật Thanh¹, Hoàng Minh Trí² và Nguyễn Chánh Nghiệm¹

¹ Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

² Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh

Thông tin chung:

Ngày nhận: 20/02/2014

Ngày chấp nhận: 30/06/2014

Title:

Sliding mode controller design for maglev train levitation system

Từ khóa:

Điều khiển trượt, tàu đệm từ trường, hệ thống nâng

Keywords:

Sliding mode control, levitation system, maglev train

ABSTRACT

This paper presents a model of a Maglev train (the fastest train in the world) and the sliding mode controller for it. The control objectives are to levitate it to an equilibrium position and to keep it in this equilibrium position. In this study, the chattering problem is resolved by replacing the function $\text{sign}(S)$ by the function $\tanh(S)$ in the control law. Matlab/Simulink simulation and experimental results showed that the levitation system of Maglev train had been decoded.

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình và bộ điều khiển trượt cho hệ thống nâng của tàu đệm từ trường (một phương tiện giao thông mặt đất nhanh nhất thế giới). Mục tiêu điều khiển là nâng tàu lên ở vị trí cân bằng và giữ tàu ổn định ở vị trí cân bằng đó. Trong bài viết này, hiện tượng dao động (chattering) của bộ điều khiển trượt cho hệ thống nâng được giải quyết bằng cách thay đổi hàm $\text{sign}(S)$ trong luật điều khiển bằng hàm $\tanh(S)$. Từ kết quả của mô phỏng bằng Matlab/Simulink và mô hình thực nghiệm cho thấy công nghệ hệ thống nâng của tàu đệm từ trường đã được giải mã.

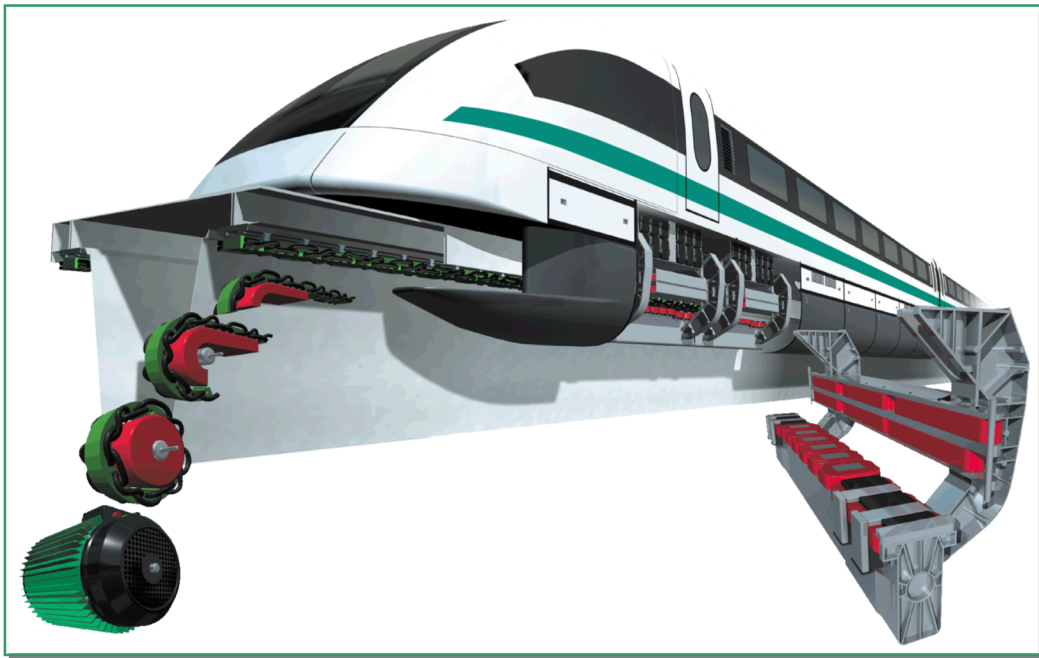
1 GIỚI THIỆU

Tàu đệm từ trường (Maglev Train) được xem là một giải pháp đầy triển vọng cho hệ thống giao thông trong thế kỷ 21 và trong tương lai. Tàu hoạt động dựa vào nguyên lý lực điện từ và có các đặc điểm nổi bật như di chuyển với tốc độ cao, độ an toàn cao, thân thiện với môi trường và có khả năng chuyên chở tốt.

Tàu đệm từ trường có ba hệ thống chính đó là hệ thống nâng tàu, hệ thống dẫn hướng và hệ thống đẩy tàu đi tới. Hiện nay trên thế giới có ba công nghệ tàu đệm từ trường chính đó là công nghệ EMS (ElectroMagnetic Suspension) của Đức, công nghệ EDS (ElectroDynamic Suspension) của Nhật

Bản và công nghệ Inductrack của Mỹ.

Mô hình tàu đệm từ trường theo công nghệ EMS được mô tả ở Hình 1. Mô hình của hệ thống nâng tàu bao gồm một nam châm điện, một thanh dẫn sắt từ và bộ điều khiển vị trí (Hình 2). Nam châm điện và bộ điều khiển được đặt trên tàu. Chức năng của hệ thống nâng tàu là dùng lực điện từ để nâng tàu lên cách đường ray khoảng 15 mm (vị trí cân bằng) và giữ tàu ở vị trí cân bằng này. Do đó, cần có một bộ điều khiển để điều khiển dòng điện cấp cho nam châm điện. Mô hình hệ thống nâng của tàu đệm từ trường là một mô hình có độ phi tuyến cao nên các bộ điều khiển phi tuyến được áp dụng.



Hình 1: Mô hình tàu đệm từ trường theo công nghệ EMS

<http://www.transrapid.de/>

Các công trình nghiên cứu tập trung vào giải quyết vấn đề đưa ra mô hình toán học của các hệ thống và mô phỏng sự tác động qua lại giữa các hệ thống của tàu (Dai 2005, Boudali *et al.*, 2003, Lee *et al.*, 2006). Bên cạnh việc đưa ra mô hình toán học, các nhà nghiên cứu cũng đưa ra một số phương pháp điều khiển từ cổ điển đến hiện đại cho hệ thống nâng tàu (Barie and Chiasson 1996, Mahmoud 2003, Hypiussová and Osuský 2010, Kharaajoo and Rashidi n.d., Ko *et al.*, 2009).

Đặc biệt trong bài viết “*Sliding Mode Control of a Magnetic Levitation System*” của tác giả Al-Muthairi và Zribi (Al-Muthairi and Zribi, 2004) đã trình bày thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ thống nâng vật trong từ trường và đã giải quyết hiện tượng giao động (chattering). Trong bài viết này, bên cạnh việc thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển trượt cho hệ thống nâng của tàu đệm từ trường, tác giả còn áp dụng bộ điều khiển này vào mô hình thực tế và kiểm tra tính ổn định của hệ thống để chứng tỏ tính hiệu quả của bộ điều khiển.

Nội dung của bài viết được tóm lược như sau: Phần 1 là giới thiệu chung, mô hình toán học của hệ thống nâng sẽ được trình bày ở phần 2, thiết kế

bộ điều khiển trượt cho hệ thống nâng được trình bày ở phần 3, phần 4 là kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm của mô hình và cuối cùng là phần kết luận và đề xuất.

2 MÔ HÌNH HỆ THỐNG NÂNG CỦA TÀU ĐỆM TỪ TRƯỜNG

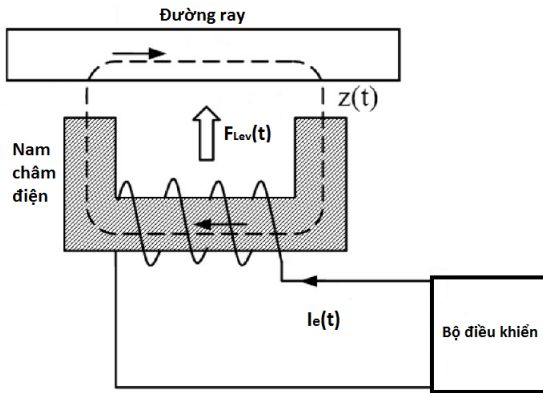
Hệ thống nâng của tàu đệm từ trường theo công nghệ EMS được mô hình hóa như một mạch điện từ và được trình bày ở Hình 2.

Lực nâng $F_{Lev}(t)$ được tạo ra bởi hệ thống nâng tàu, nó giữ cho tàu được nâng lên ở một khoảng cách $z(t)$ nhất định so với đường ray. $F_{Lev}(t)$ được điều khiển bằng cách thay đổi dòng điện một chiều $I_e(t)$.

Biểu thức lực nâng (Boudali *et al.* 2003):

$$F_{Lev}(t) = C \cdot \frac{I_e^2(t)}{z^2(t)}, \quad (1)$$

trong đó: C là hằng số lực từ, $F_{Lev}(t)$ là lực tác dụng lên khung tàu, $z(t)$ là vị trí của tàu so với đường ray ($0mm \leq z(t) \leq 20mm$), $I_e(t)$ là dòng điện kích một chiều.



Hình 2: Mô hình hệ thống nâng của tàu đệm từ trường

3 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Áp dụng định luật thứ 2 của Newton và định luật Kirchoff về điện áp, mô hình động học của hệ thống được viết:

$$\begin{cases} \frac{dz(t)}{dt} = v(t) \\ m \frac{dv}{dt} = m \cdot g - C \left(\frac{I_e(t)}{z(t)} \right)^2 \\ R \cdot I_e(t) + \frac{d(L(z) \cdot I_e(t))}{dt} = u(t) \end{cases}, \quad (2)$$

trong đó $u(t)$ là điện áp đặt vào nam châm, R là điện trở cuộn dây quấn nam châm, $L(z)$ là độ từ cảm của cuộn dây, m là khối lượng của tàu cần nâng, $v(t)$ là vận tốc nâng của tàu.

Độ từ cảm của cuộn dây $L(z)$ là hàm phi tuyến phụ thuộc vào vị trí $z(t)$, và theo (Al-Muthairi and Zribi 2004) thì $L(z)$ được tính bằng công thức (3), trong đó L là hệ số từ cảm của cuộn dây.

$$L(z) = L + \frac{2C}{z(t)}. \quad (3)$$

Đặt biến trạng thái và ngõ vào điều khiển:

$$\begin{cases} x_1 = z(t) \\ x_2 = v(t) \\ x_3 = I_e(t) \\ u = u(t) \end{cases}. \quad (4)$$

Từ (2), (3) và (4) suy ra mô hình không gian

trạng thái của hệ thống:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \dot{x}_3 = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 \cdot x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} u \end{cases}. \quad (5)$$

Phương trình không gian trạng thái (5) được dùng trong thiết kế bộ điều khiển trượt của hệ thống.

3.1 Thiết kế bộ điều khiển trượt

Do hệ thống nâng của tàu đệm từ trường là hệ thống không ổn định vòng hở và có đặc tính phi tuyến cao nên bộ điều khiển trượt (Sliding Mode Controller – SMC) được xem xét như là một lựa chọn tốt trong trường hợp này.

Đặt x_{1d} , x_{2d} và x_{3d} là các giá trị mong muốn của x_1 , x_2 và x_3 . Mục tiêu của việc thiết kế bộ điều khiển là đưa các biến trạng thái x_1 , x_2 và x_3 về các giá trị mong muốn x_{1d} , x_{2d} và x_{3d} tương ứng.

Đặt:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_{1d} \\ z_2 = x_2 \\ z_3 = g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \end{cases}. \quad (6)$$

Nếu z_1 , z_2 , z_3 được đưa về 0 khi $t \rightarrow \infty$ thì x_1 sẽ hội tụ về x_{1d} , x_2 sẽ hội tụ về $x_{2d} = 0$ và x_3 sẽ hội tụ

$$\text{về } x_{3d} = x_{1d} \sqrt{\frac{g \cdot m}{C}}.$$

Mô hình động học của hệ thống trong tọa độ mới là

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = f(z) + g(z) \cdot u \end{cases}, \quad (7)$$

với

$$\begin{cases} f(z) = 2(g - z_3) \left[\left(1 - \frac{2C}{L(z_1 - x_{1d})} \right) \frac{z_2}{(z_1 - x_{1d})} + \frac{R}{L} \right] \\ g(z) = -\frac{2}{L(z_1 - x_{1d})} \sqrt{\frac{C}{m}(g - z_3)} \end{cases} \quad (8)$$

Hàm $f(z)$ tương ứng $f_1(x)$ và $g(z)$ tương ứng với $g_1(x)$ trong tọa độ gốc:

$$\begin{cases} f_1(x) = \frac{2C}{m} \left[\left(1 - \frac{2C}{Lx_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \left(\frac{x_1}{x_3} \right)^2 \right] \\ g_1(x) = -\frac{2Cx_3}{Lmx_1^2} \end{cases} \quad (9)$$

Ngõ ra của hệ thống trong hệ tọa độ mới là

$$y = z_1 = e = x_1 - x_{1d}, \quad (10)$$

trong đó e là sai số vị trí.

Từ (7), (9) và (10), suy ra mối quan hệ của ngõ vào và ngõ ra của hệ thống như sau:

$$y^{(3)} = f_1(x) + g_1(x)u. \quad (11)$$

Định nghĩa mặt trượt

$$u = -\frac{1}{g} \left[f_1 + a_1 \left(g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) + a_2 x_2 + \alpha \cdot \text{sign} \left(g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + a_1 x_2 + a_2 (x_1 - x_{1d}) \right) \right], \quad (15)$$

trong đó α là một hằng số dương chọn trước.

3.2 Giải quyết vấn đề dao động (chattering)

Trong thực tế, hiện tượng dao động (chattering) gây ra các hiện tượng không mong muốn như: Phát sinh sai số điều khiển, làm phát nóng mạch điện tử, mài mòn các bộ phận cơ khí, kích động các mode tần số cao không mô hình hóa làm giảm chất lượng điều khiển hoặc mất điều khiển. Vấn đề này thường được các nhà nghiên cứu giải quyết bằng cách giảm biên độ của luật điều khiển bằng cách giảm hệ số α , hoặc thay hàm *signum* trong luật điều khiển bởi hàm *saturation* hay hàm *tanh*, hoặc dùng logic mờ,...

4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

4.1 Kết quả mô phỏng

Các kết quả mô phỏng hệ thống được thực hiện

$$\begin{aligned} S &= \ddot{e} + a_1 \dot{e} + a_2 e \\ &= \ddot{z}_1 + a_1 \dot{z}_1 + a_2 z_1 \\ &= z_3 + a_1 z_2 + a_2 z_1, \end{aligned} \quad (12)$$

với a_1, a_2 là các hệ số dương thỏa điều kiện Hurwitz.

Áp dụng (6), mặt trượt S được viết lại theo các biến x_1, x_2 và x_3 :

$$S = g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + a_1 x_2 + a_2 (x_1 - x_{1d}). \quad (13)$$

Vấn đề: xác định luật điều khiển u để đưa các quỹ đạo pha của hệ thống về mặt trượt và duy trì trên mặt trượt một cách bền vững đối với các biến động của $f(x)$ và $g(x)$.

Lấy đạo hàm mặt trượt S và u được chọn sao cho (Nghĩa, 2007):

$$\dot{S} = -\alpha \text{sign}(S). \quad (14)$$

Từ (11), (13) và (14), luật điều khiển u được chọn như sau:

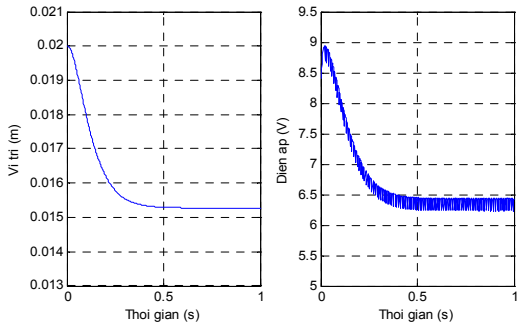
trên Matlab/Simulink và bộ điều khiển trượt sử dụng hàm $\text{sign}(S)$, $\text{sat}(S)$ và $\text{tanh}(S)$ được thiết kế (như đã đề cập ở phần 3) sẽ áp dụng cho vào hệ thống. Các thông số của hệ thống dùng để mô phỏng được cho ở Bảng 1.

Bảng 1: Thông số của hệ thống dùng để mô phỏng

Điện trở dây quấn	R = 19.2 (Ω)
Độ từ cảm	L = 0.0614 (H)
Hằng số lực từ	C = 0.011 (N.m ² .A ²)
Khối lượng tàu	m = 0.52 (kg)
Gia tốc trọng trường	g = 9.81 (m/s ²)
Vị trí ban đầu	0.02 (m)

4.1.1 Sử dụng bộ điều khiển trượt với hàm $\text{sign}(S)$, $x_{1d} = 0.015$ (m)

Các thông số của bộ điều khiển được chọn như sau: $\alpha = 100$, $a_1 = 31$, $a_2 = 240$. Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 3.

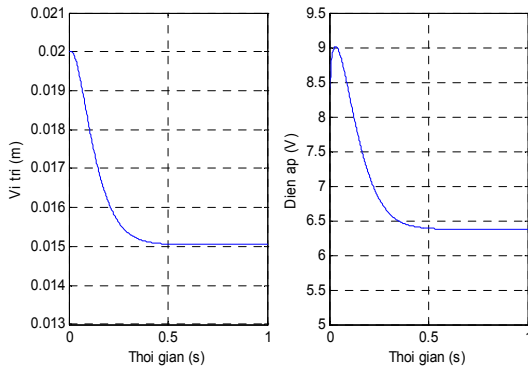


Hình 3: Đáp ứng của hệ thống sử dụng SMC

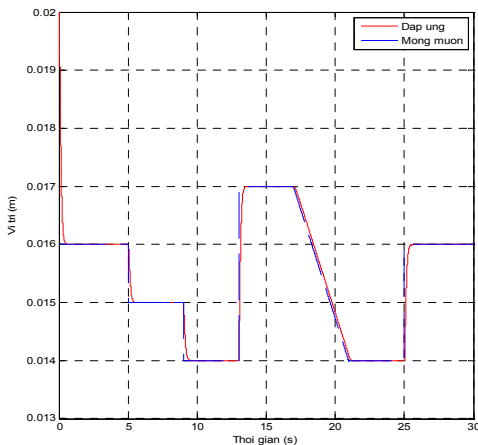
Dựa vào Hình 3 ta thấy đáp ứng vị trí tiến về giá trị mong muốn của nó. Tuy nhiên, đáp ứng của hệ thống vẫn còn một sai số xác lập nhỏ và xuất hiện hiện tượng dao động (chattering) ở tín hiệu điều khiển.

4.1.2 Sử dụng bộ điều khiển trượt với hàm

$$\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right), x_{1d} = 0.015 \text{ (m)}$$



Hình 4: Đáp ứng của hệ thống sử dụng SMC với hàm $\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right)$

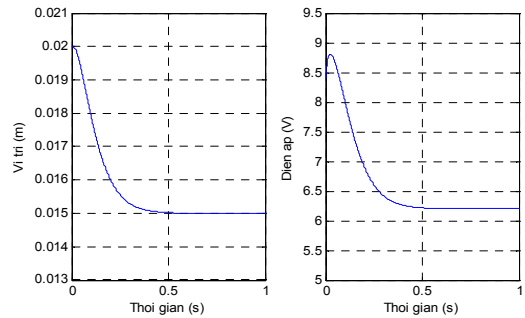


Hình 6: Đáp ứng của hệ thống sử dụng SMC với hàm tanh(S) và tín hiệu đặt thay đổi

Trường hợp thay hàm $\text{sign}(S)$ bằng hàm $\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right)$ đã giải quyết được vấn đề dao động, xem Hình 4. Ở hình này cho thấy, đáp ứng vị trí của hệ thống tiến về giá trị mong muốn và hiện tượng dao động trong tín hiệu điều khiển đã bị loại bỏ.

4.2 Sử dụng bộ điều khiển trượt với hàm tanh(S)

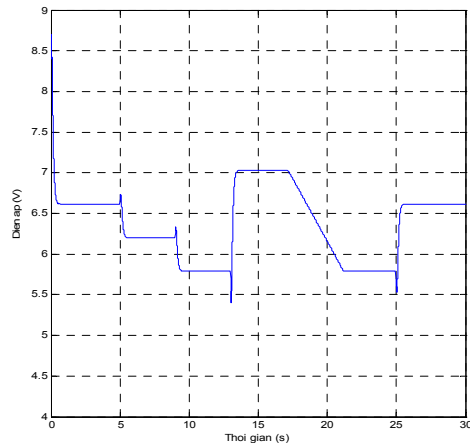
Trường hợp 1: Khi tín hiệu đặt cố định $x_{1d} = 0.015 \text{ (m)}$



Hình 5: Đáp ứng của hệ thống sử dụng SMC với hàm tanh(S)

Trường hợp 2: Khi tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian

Nhận xét: Vấn đề dao động đối với bộ điều khiển trượt được giải quyết bằng cách thay hàm $\text{sign}(S)$ bằng hàm $\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right)$ hay hàm $\text{tanh}(S)$. Thay hàm $\text{sign}(S)$ bằng hàm $\text{tanh}(S)$ không chỉ giúp giải quyết vấn đề dao động mà còn giúp hệ thống đáp ứng tốt hơn. Vì vậy, bộ điều khiển trượt với hàm $\text{tanh}(S)$ sẽ được áp dụng cho mô hình thực.

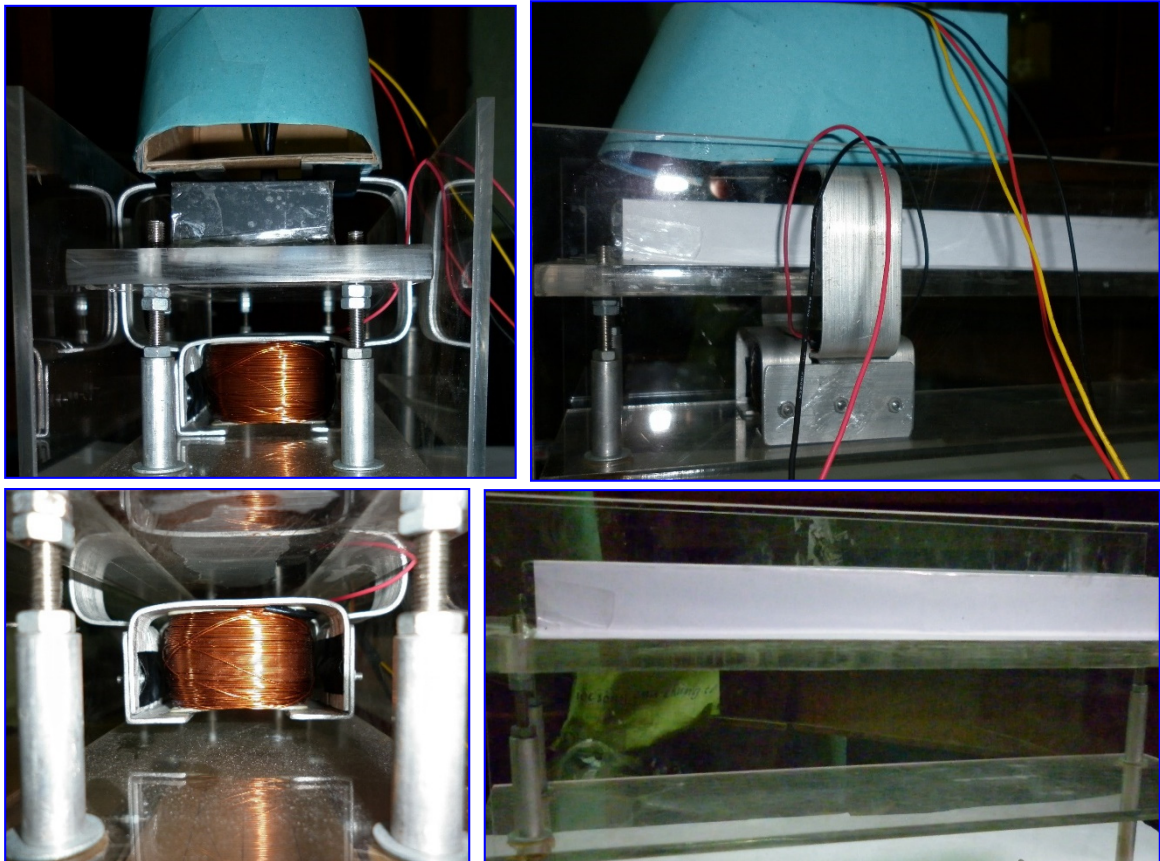


4.3 Kết quả thực nghiệm

4.3.1 Mô hình thực nghiệm

Mô hình thực mà tác giả dùng để áp dụng luật điều khiển đã được chế tạo bao gồm: Máy tính, thiết bị thu thập dữ liệu (Card PCI 1711), board điều chế độ rộng xung (PWM), cảm biến đo vị trí

(cảm biến hồng ngoại RPR 220 kết hợp với bộ xử lý mờ để cải thiện độ chính xác), cảm biến đo dòng điện (ACS712), nam châm điện, khung tàu, đường ray, nguồn điện,... Thông số của mô hình thực nghiệm được trình bày trong Bảng 2 và vị trí ban đầu của tàu là 0.02 (m).



Hình 7: Mô hình thực nghiệm hệ thống nâng của tàu đệm từ trường

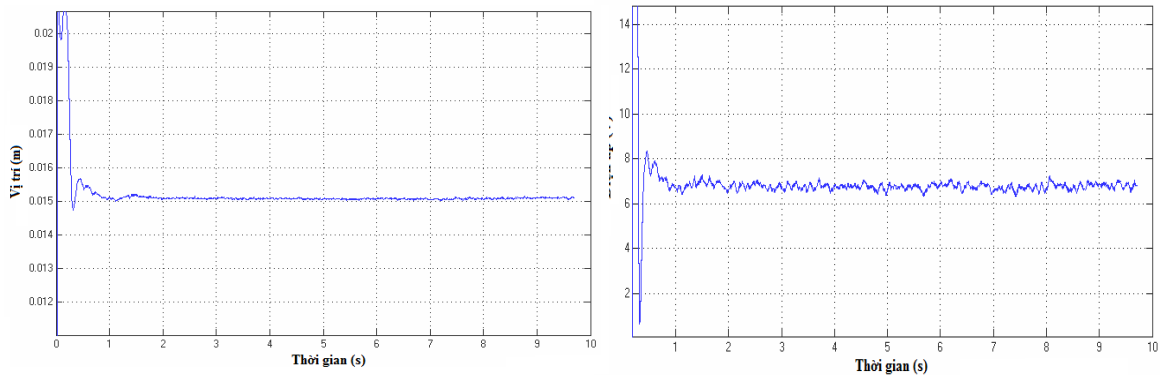
Bảng 2: Các thông số của mô hình thực nghiệm

Số vòng dây	$N = 1320$ (vòng)
Đường kính dây đồng	$\Phi = 0.45$ (mm)
Dòng điện tối đa qua nam châm	0.63 (A)
Điện trở cuộn dây nam châm	$R = 19.2$ (Ω)
Độ từ cảm cuộn dây	$L = 0.0614$ (H)
Khối lượng nam châm + Khung	$m = 0.52$ (kg)
Hằng số lực từ của hệ nam châm	$C = 0.012$ ($N.m^2.A^2$)
Kích thước nam châm	48 x 45 x 30 (mm)

4.3.2 Sử dụng bộ điều khiển trượt với tín hiệu đặt $x_{1d} = 0.015$ (m)

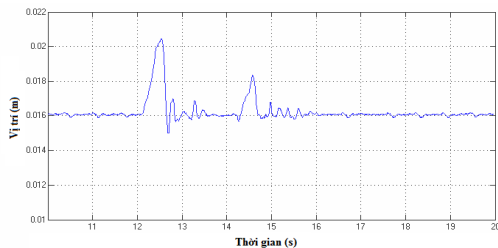
Các thông số của bộ điều khiển trượt với hàm tanh(S) được dùng trong mô hình như sau: $\alpha = 5000$, $a_1 = 199$, $a_2 = 9900$. Kết quả đáp ứng của mô hình được trình bày ở Hình 8.

Từ Hình 8 ta thấy, hệ thống nâng tàu nhanh chóng đưa tàu về vị trí mong muốn (0.015 m) và giữ ổn định ở vị trí này và điện áp cấp cho cuộn dây nam châm điện cũng luôn ổn định.



Hình 8: Đáp ứng của mô hình thực sử dụng SMC với hàm tanh(S)

4.3.3 Sử dụng bộ điều khiển trượt với tín hiệu đặt $x_{1d} = 0.016$ (m) và có ảnh hưởng của nhiễu



Hình 9: Đáp ứng của mô hình khi có nhiễu

Nhiễu ở thí nghiệm này được tạo ra nhằm kiểm tra tính ổn định của tàu. Khi tàu đang ở vị trí cân bằng (0.016 m) thì tác động một xung ngoại lực theo hướng nâng của tàu. Lúc này tàu sẽ bị dao động và nhanh chóng trở về vị trí cân bằng. Điều

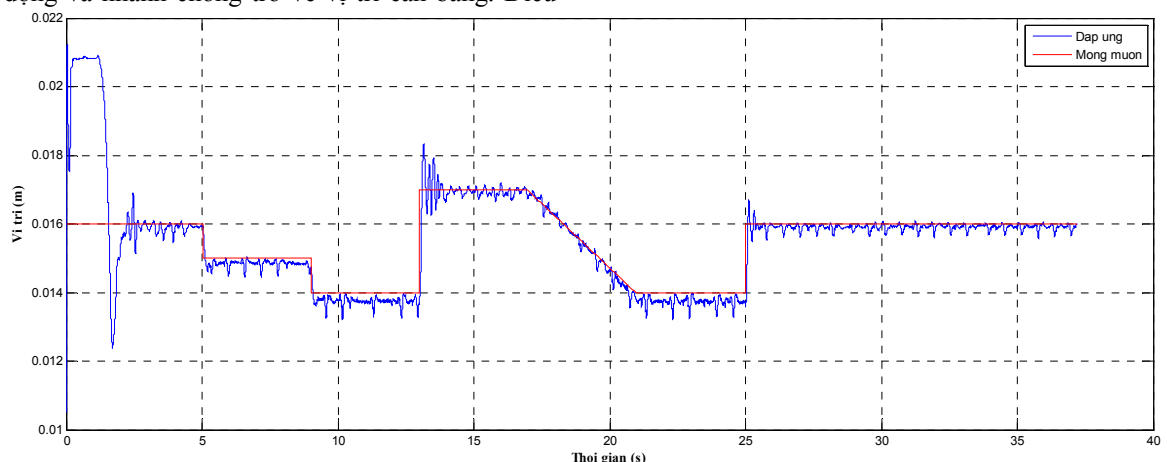
này cho thấy hệ thống có tính ổn định cao, xem Hình 9.

4.3.4 Sử dụng bộ điều khiển trượt với tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian

Mô hình không chỉ đáp ứng tốt với giá trị mong muốn bất kỳ cố định hoặc có tác động của nhiễu mà hệ thống còn đáp ứng tốt khi tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian, xem kết quả đáp ứng ở Hình 10.

Khi tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian, đáp ứng của hệ thống bám theo tín hiệu đặt. So với kết quả mô phỏng (Hình 6), ta thấy kết quả thực nghiệm khá tốt mặc dù vẫn có xuất hiện sai số.

Nhận xét: Thông qua kết quả mô phỏng và mô hình thực nghiệm ta thấy bộ điều khiển trượt được thiết kế làm việc thật sự hiệu quả.



Hình 10: Đáp ứng của mô hình khi tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian

5 KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT

5.1 Kết luận

Công nghệ tàu đệm từ trường đã và đang được các quốc gia trên thế đặc biệt quan tâm nghiên cứu

để cải tiến hoặc làm chủ công nghệ. Trong bài viết này, hệ thống nâng của tàu đệm từ trường theo công nghệ EMS đã được mô hình hóa và điều khiển được vị trí cân bằng mong muốn của tàu. Bộ điều khiển trượt được thiết kế không chỉ đáp ứng

tốt với các vị trí cân bằng mong muốn cố định hay thay đổi theo thời gian mà hệ thống còn ổn định khi có nhiễu tác động.

5.2 Đề xuất

– Xét đến đặc tính động học của tàu trong trường hợp tổng quát (tàu gồm nhiều toa, tác động của môi trường bên ngoài,...).

– Tiếp tục nghiên cứu và chế tạo hệ thống dẫn hướng và đẩy tới để mô hình tàu được hoàn chỉnh hơn và có thể sớm áp dụng vào thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Al-Muthairi, N.F. and Zribi, M., 2004. Sliding mode control of a magnetic levitation system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2004(2): 93–107.
2. Barie, W. and Chiasson, J., 1996. Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation. *International Journal of systems science*, 27(11): 1153–1163.
3. Boudali, H., Williams, R.D. and Giras, T.C., 2003. A Simulink simulation framework of a MagLev model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 217(3): 227–236.
4. Dai, H., 2005. *Dynamic behavior of maglev vehicle/guideway system with control*. Case Western Reserve University.
5. Hypiúsová, M. and Osuský, J., 2010. PID Controller Design for Magnetic Levitation Model. *In: International Conference February*. p. 13.
6. Kharaajoo, M.J. and Rashidi, F., 2009. High performance variable structure control of a magnetic levitation system.
7. Ko, W. et al., 2009. Dynamics and controls of a Maglev vehicle. *In: Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009. IEEE International Symposium on*. pp. 2190–2195.
8. Lee, H., Kim, K. and Lee, J., 2006. Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(7): 1917–1925.
9. Mahmoud, N.I., 2003. *A backstepping design of a control system for a magnetic levitation system*. Linköping.
10. Nghĩa, D.H., 2007. *Điều khiển hệ thống đa biến*, ĐHQG TP. HCM.