

XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT - NƠON CHO HỆ THỐNG TỪ TRƯỜNG

DESIGN OF NEURAL SLIDING MODE CONTROL ALGORITHM FOR MAGNETIC LEVITATION SYSTEM

Nguyễn Hồ Sĩ Hùng¹, Lê Thành Bắc²

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; nguyenhosihung@gmail.com

²Đại học Đà Nẵng

Tóm tắt - Tàu đệm từ trường với đặc tính tốc độ cao, tiện lợi, giảm tiêu thụ năng lượng và ít khí thải là một giải pháp hữu hiệu để giảm ô nhiễm môi trường. Nghiên cứu hệ thống từ trường đẩy (HTTTĐ) là nền tảng để phát triển các hệ thống tàu đệm từ. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển trượt sử dụng mạng nơon (ĐKTSDMN) để điều khiển vị trí của đĩa từ trong HTTTĐ. Bộ ĐKTSDMN giúp bù đắp những ngoại lực không biết trước tất yếu sinh ra trong quá trình vận hành. Tiến hành xây dựng mô hình động học của HTTTĐ và đề xuất cơ chế điều khiển trượt (ĐKT) để tạo ra lực cân bằng với tổng ngoại lực phát sinh. ĐKT gây dao động làm tăng sai số vị trí trong điều khiển. Nhằm giảm bớt sai số này, các tác giả đề xuất sử dụng một khối nơon với hàm xuyên tâm để ước tính ngoại lực tác dụng lên HTTTĐ một cách liên tục. Hiệu quả của bộ ĐKTSDMN được đánh giá thông qua các kết quả mô phỏng và mô hình thực nghiệm.

Từ khóa - tàu đệm từ trường; hệ thống từ trường đẩy (HTTTĐ); điều khiển trượt sử dụng mạng nơon (ĐKTSDMN); điều khiển trượt (ĐKT); thuật toán điều khiển.

1. Đặt vấn đề

Tắc nghẽn giao thông là một vấn nạn lớn trên thế giới trong những năm gần đây, tình trạng này cũng đang xảy ra khá trầm trọng tại Việt Nam, gây ra lãng phí về nhiên liệu, thời gian, đặc biệt là ô nhiễm môi trường. Khắc phục vấn đề trên, một loại phương tiện giao thông mới cho phép vận chuyển khối lượng lớn được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong vài thập kỷ gần đây, đó là tàu đệm từ trường hay hệ thống từ trường đẩy. Tàu đệm từ trường thế hệ mới có các đặc tính nổi trội như tốc độ cao, tiện lợi, giảm sự tiêu hao nhiên liệu và ít gây ô nhiễm môi trường [1,2,3]. Tại Việt Nam, hệ thống tàu đệm từ đầu tiên đang được triển khai tại Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh. Vì vậy, việc triển khai các nghiên cứu về hệ thống tàu đệm từ, mà cụ thể là hệ thống từ trường đẩy đang rất cần thiết hiện nay. Mô hình hệ thống tàu đệm từ thiết kế bởi công ty ECP (Education Control Products) đang được nhiều nước sử dụng để nghiên cứu các thuật toán điều khiển cho hệ thống từ trường đẩy. Mô hình 730 của ECP mô tả một phần các đặc tính của tàu đệm từ trường, kết quả nghiên cứu trên hệ thống này sẽ cho phép ứng dụng trong thế giới thật [4].

Hệ thống từ trường đẩy được ứng dụng vào tàu đệm từ trường, ổ bi không ma sát, quạt từ trường [5]. Do đặc tính không ổn định của mạch vòng hở và đặc tính phi tuyến động học của hệ thống từ trường đẩy luôn tồn tại, gây khó khăn khi thiết kế thuật toán điều khiển vị trí của đối tượng. Trước đây, hệ động lực học cơ điện của hệ thống

Abstract - Magnetic levitation train with high speed, comfort, low energy consumption and low emission is a good solution to environmental pollution. A study of Magnetic levitation system (Maglev) which is presented in this paper is the foundation to develop magnetic levitation trains. The paper also presents research results of design of intelligent sliding mode algorithm using neural network (SMCAUNN) to control the position of a levitated magnet of a magnetic levitation system. The SMCAUNN compensates for the uncertain external force in operation. First, the dynamic model of the magnetic levitation system is derived and a sliding-mode approach is proposed to compensate for the uncertainties that occurred in the operation of magnetic levitation system. The sliding mode control (SMC) always creates chattering and increases position errors. In order to decrease the chattering and position errors, the authors propose a neural network using a radial basic function to estimate the uncertainties of the magnetic levitation system online. The effectiveness of SMCAUNN is verified by simulation and experimental results.

Key words - magnetic levitation train; magnetic levitation system (Maglev); Sliding mode control algorithm using neural network (SMCAUNN); Sliding mode control (SMC); control algorithm.

từ trường đẩy được xây dựng bằng một mô hình tuyến tính gồm các biến trạng thái là vị trí, gia tốc, tín hiệu dòng điện. Với các ứng dụng của kỹ thuật điều khiển phản hồi tuyến tính được trình bày trong rất nhiều nghiên cứu đã công bố, tuy nhiên với mô hình tuyến tính còn tồn tại nhiều hạn chế bất cập [6, 7, 8, 9].

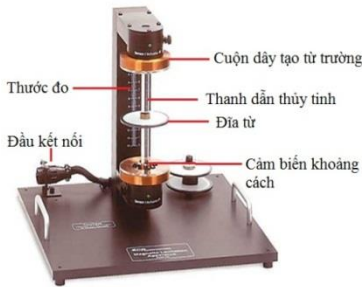
Cơ chế điều khiển trượt (ĐKT) là một trong những phương pháp hiệu quả để điều khiển hệ thống phi tuyến vì phương pháp này có thể điều khiển các hệ thống động lực học có đặc tính thay đổi trong quá trình vận hành. Để xây dựng khối ĐKT phải lựa chọn mặt phẳng trượt. Mặt phẳng trượt là một vòng lặp kín và được mô tả thành các biến trạng thái. Bước tiếp theo là xây dựng một luật điều khiển để hệ quỹ đạo trạng thái buộc phải di chuyển đến mặt phẳng trượt và duy trì trên đó. Hệ quỹ đạo trạng thái trong thời điểm trước khi chạm tới mặt phẳng trượt gọi là giai đoạn tiến đến mặt phẳng. Khi hệ quỹ đạo trạng thái đến mặt phẳng trượt, nó duy trì trên đó và trượt dọc theo mặt phẳng gốc. Sự ổn định của thuật toán ĐKT phụ thuộc bởi nhiều của hệ thống và nhiễu bên ngoài [10, 11, 12]. Thuật toán ĐKT đã thể hiện nhiều ưu điểm trong điều khiển các hệ phi tuyến, tuy nhiên, với hệ từ trường đẩy, khi đối tượng di chuyển về mặt phẳng cân bằng thì luôn xuất hiện dao động lớn trong quá trình vận hành. Để khắc phục hạn chế trên, nhiều thuật toán đã được nêu ra, trong đó mạng nơon là một trong các giải pháp được đề cập.

Điều khiển nơon là phương pháp điều khiển thông minh cho phép xấp xỉ hóa các hệ thống phi tuyến phức tạp

[13]. Dựa vào các cơ chế tác động và kết cấu sinh học vô não người, một mạng noron sử dụng hàm xuyên tâm mô phỏng cách tiếp nhận và xử lý tín hiệu tương tự vô não được thiết lập [14]. Với mạng noron sử dụng hàm xuyên tâm có khả năng hội tụ nhanh hơn mạng nhiều lớp truyền thẳng, vì chỉ có trọng số liên kết giữa lớp ẩn và lớp đầu ra của mạng được điều chỉnh trong suốt quá trình học để giảm khối lượng tính toán. Trong nghiên cứu này, để không mất tính tổng quát, hệ thống từ trường đẩy được các tác giả trình bày như một mô hình động học phi tuyến, trong đó có nhiều của hệ thống và nhiều bên ngoài. Phương pháp ĐKT được đề xuất để điều khiển vị trí của đối tượng đi theo một quỹ đạo tham chiếu theo thời gian. Để giảm dao động, tăng sự ổn định cho hệ thống, các tác giả đưa vào một khối noron sử dụng hàm xuyên tâm để ước tính những biến đổi do tác động từ môi trường và các tham số của hệ thống.

2. Động lực học của hệ thống từ trường đẩy

Cấu trúc vật lý của mô hình hệ từ trường đẩy điển hình được biểu diễn trong Hình 1. Khối chấp hành gồm cuộn dây điều khiển tạo ra từ trường; một nam châm vĩnh cửu có thể di chuyển dọc theo thanh thủy tinh và nó cũng chính là đối tượng điều khiển; hai cảm biến laser ở phía trên và phía dưới trong khối chấp hành để đo khoảng cách của đối tượng.



Hình 1. Cơ cấu động lực của hệ thống từ trường đẩy

Các lực tác dụng lên đĩa từ gồm: lực từ của cuộn dây, trọng lực đĩa từ và lực ma sát. Áp dụng định luật Newton 2 về chuyển động, phương trình hệ thống động lực học được biểu diễn như sau:

$$F_m - mg - c\dot{y}_1 - F_L = m\ddot{y}_1 \quad (1)$$

Trong đó: y_1 là khoảng cách giữa cuộn dây và đĩa từ, m là khối lượng của đĩa từ, F_m là lực từ, c là lực ma sát và g là hệ số trọng trường, F_L là ngoại lực tác động lên hệ thống. Lực từ được tính:

$$F_m = \frac{U}{a(y_1+b)^N} \quad (2)$$

Trong đó: U là tín hiệu điều khiển. N , a , b được xác định bằng phương pháp thực nghiệm (thông thường $3 < N < 4.5$) [4].

3. Đề xuất thuật toán điều khiển

Thay (2) vào (1), ta được:

$$\ddot{y}_1 = -\frac{c}{m}\dot{y}_1 - \frac{u}{ma(y_1+b)^N} - g - \frac{F_L}{m} \quad (3)$$

Trạng thái không gian của hệ thống là ma trận $Y = [y_1, \dot{y}_1]^T$. Phương trình động lực học cơ cấu từ trường là:

$$\ddot{y}_1 = f(Y; t) + G(Y; t)U(t) + d(Y; t) \quad (4)$$

$$\text{Trong đó: } Y = [y_1, \dot{y}_1]^T; G(Y; t) = \frac{1}{ma(y_1+b)^N}$$

$$d(Y; t) = -g - \frac{F_L}{m}; f(Y; t) = -\frac{c}{m}\dot{y}_1$$

$U(t)$ là tín hiệu điều khiển.

Hệ thống được xem như tích hợp bởi 2 thành phần: thành phần danh định và thành phần bất định, phương trình động lực học được viết lại:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1(t) &= [f_n(Y; t) + \Delta f] + [G_n(Y; t) + \Delta G]U(t) \\ &\quad + [d_n(Y; t) + \Delta d] \\ &= f_n(Y; t) + G_n(Y; t)U(t) + d_n(Y; t) + L(Y; t) \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó: $f_n(Y; t)$ là giá trị danh định của $f(Y; t)$, $G_n(Y; t)$ là giá trị danh định của $G(Y; t)$, $d_n(Y; t)$ là giá trị danh định của $d(Y; t)$. Còn Δf , ΔG , và Δd là giá trị thay đổi theo thời gian; $L(Y; t)$ là tổng các giá trị thay đổi, được định nghĩa như sau:

$$L(Y; t) = \Delta f + \Delta GU(t) + \Delta d \quad (6)$$

Giả sử rằng biên độ của dao động được biết trước:

$$L(Y; t) < \delta \quad (7)$$

Với δ là hệ số dương (biên ổn định).

3.1. Điều khiển trượt

Thiết kế một khối điều khiển trượt bao gồm ba bước. Đầu tiên là định nghĩa sai số vị trí của hệ thống $e = y_1 - y_m$ (sai lệch giữa vị trí mong muốn và vị trí thực). Mặt phẳng trượt được định nghĩa:

$$S(t) = \dot{e}(t) + \lambda_1 e(t) + \lambda_2 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (8)$$

Trong đó: λ_1 và λ_2 là những hằng số dương. Đạo hàm $S(t)$ theo thời gian và thay (5) vào ta có:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= \ddot{e}(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t) \\ &= \ddot{y}_1(t) - \ddot{y}_m(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t) \\ &= f_n(Y; t) + G_n(Y; t)U(t) + d_n(Y; t) \\ &\quad + L(Y; t) - \ddot{y}_m(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t) \end{aligned} \quad (9)$$

Bằng cách chọn giá trị λ_1 và λ_2 một cách hợp lý, đặc tính của hệ thống động lực như thời gian quá độ, độ quá điều chỉnh, sai số vị trí sẽ nhỏ và thay đổi theo hệ thống truyền động bậc 2. Điều quan trọng là tìm một luật điều khiển để trạng thái y_1 duy trì trên mặt trượt $S(t)=0$ trong thời gian dài. Tiệm cận ổn định của hệ thống được đảm bảo khi các luật điều khiển sau đây được thỏa mãn cho các hệ thống từ trường đẩy; Luật điều khiển được cho bởi:

$$\begin{aligned} U_{SMC}(t) &= G_n(Y; t)^{-1} [-f_n(Y; t) - d_n(Y; t) + \ddot{y}_m(t) \\ &\quad - \lambda_1 \dot{e}(t) - \lambda_2 e(t) - \delta \text{sgn}(S(t))] \end{aligned} \quad (10)$$

Trong đó: Sign là hàm dấu;

$$\begin{aligned} U_{eq}(t) &= G_n(Y; t)^{-1} [-f_n(Y; t) - d_n(Y; t) + \ddot{y}_m(t) \\ &\quad - \lambda_1 \dot{e}(t) - \lambda_2 e(t)]: \text{lực điều khiển cân bằng} \end{aligned}$$

$U_c(t) = G_n(Y; t)^{-1} [-\delta \text{sgn}(S(t))]$: lực điều khiển thích nghi. Tiêu chuẩn Lyapunov được định nghĩa:

$$V = \frac{1}{2} S^2$$

Đạo hàm V theo thời gian, ta được:

$$\dot{V} = S(t)\dot{S}(t) = S(t)\{f_n(Y;t) + G_n(Y;t)U(t) + d_n(Y;t) + L(Y;t) - \ddot{y}_m(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t)\}$$

Thay luật điều khiển từ (10) vào ta có:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= S(t)\{f_n(Y;t) + G_n(Y;t)G_n(Y;t)^{-1}[-f_n(Y;t) - d_n(Y;t) + \ddot{y}_m(t) - \lambda_1 \dot{e}(t) - \lambda_2 e(t) - \delta \operatorname{sgn}(S(t))]\} \\ &+ d_n(Y;t) + L(Y;t) - \ddot{y}_m(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t) \\ &= S(t)\{L(Y;t) - \delta \operatorname{sgn}(S(t))\}\end{aligned}\quad (11)$$

Giá trị của đạo hàm được tính:

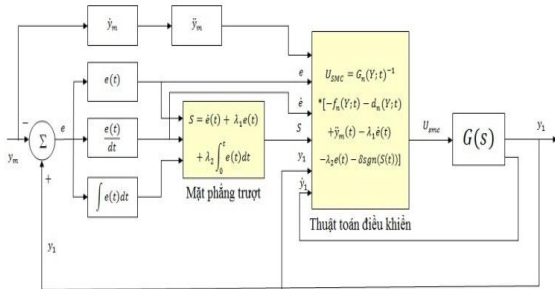
$$\begin{aligned}\text{a)} S(t) < 0 &\rightarrow \operatorname{sgn}(S(t)) = -1 \rightarrow L(Y;t) - \delta \operatorname{sgn}(S(t)) > 0 \\ \dot{V} &= S(t)\{L(Y;t) - \delta \operatorname{sgn}(S(t))\} < 0.\end{aligned}$$

$$\text{b)} S(t) = 0 \rightarrow \dot{V} = 0$$

$$\begin{aligned}\text{c)} S(t) > 0 &\rightarrow \operatorname{sgn}(S(t)) = +1 \rightarrow L(Y;t) - \delta \operatorname{sgn}(S(t)) < 0 \\ \dot{V} &= S(t)\{L(Y;t) - \delta \operatorname{sgn}(S(t))\} < 0\end{aligned}$$

từ (a), (b), (c) $\rightarrow$ cho thấy $\dot{V} \leq 0$

Như vậy, luật điều khiển được thiết kế hoàn toàn thỏa mãn tiêu chuẩn ổn định. Khối điều khiển trượt được mô phỏng như Hình 2.



Hình 2. Khối điều khiển trượt

Một hệ số δ lớn thường được yêu cầu để giảm thời gian chuyển động về mặt phẳng trượt từ vị trí ban đầu. Tuy nhiên δ quá lớn sẽ gây ra dao động (chattering) trong quá trình vận hành. Vì vậy, chọn giá trị δ thích hợp là rất quan trọng để hạn chế hệ thống dao động và thỏa mãn các yêu cầu ổn định.

3.2. Điều khiển trượt sử dụng mạng nơron

Phương trình động lực học (4) được biến đổi lại:

$$\ddot{y}_1(t) = H(t) + G_n(Y;t)U(t) \quad (12)$$

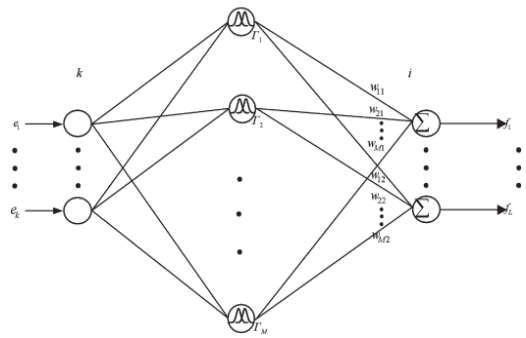
Trong đó: $H(t)=f_n(Y;t)+d_n(Y;t)+L(Y;t)$, $U(t)=U_s(t)+U_c(t)$ là luật điều khiển được chỉnh sửa. Luật điều khiển đó gồm 2 thành phần: Khối điều khiển trượt $U_s(t)$ và khối điều khiển thích nghi $U_c(t)$.

Thay (12) vào (9), đạo hàm theo thời gian của $S(t)$ được viết lại như sau:

$$\begin{aligned}\dot{S}(t) &= f_n(Y;t) + G_n(Y;t)(U_s(t) + U_c(t)) + d_n(Y;t) \\ &+ L(Y;t) - \ddot{y}_m(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t) \\ &= f_n(Y;t) + G_n(Y;t)U_s(t) + d_n(Y;t) + L(Y;t) \\ &- \ddot{y}_m(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t) + G_n(Y;t)U_c(t)\end{aligned}\quad (13)$$

Trong đó: $U_c(t)$ là khối điều khiển thích nghi; $U_s(t)$ là khối điều khiển trượt. Ta đặt:

$$\begin{aligned}K &= f_n(Y;t) + d_n(Y;t) + L(Y;t) \\ P &= -\ddot{y}_m(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_2 e(t)\end{aligned}\quad (14)$$



Hình 3. Cấu trúc của mạng hàm xuyên tâm

Phương trình (13) trở thành:

$$\dot{S}(t) = G_n(Y;t)U_s(t) + K + P + G_n(Y;t)U_c(t) \quad (15)$$

Một hàm tiên đoán của mạng hàm xuyên tâm bao gồm 2 đầu vào và 2 đầu ra được áp dụng để ước tính những sai số của hệ thống động lực. Thiết kế mạng hàm xuyên tâm với M là ma trận cảm nhận được trình bày trên Hình 3. Một hàm Gaussian được chọn làm hàm cảm nhận với tín hiệu vào giả định là $\psi = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_k]^T$. Sử dụng phương pháp tổng các hệ số trọng lượng để tính các giá trị đầu ra cho mạng hàm xuyên tâm. Tín hiệu ra của mạng hàm xuyên tâm trở thành:

$$f_i = \sum_{j=1}^M w_{ji} f_j(\psi), \quad i = 1, 2, \dots, L$$

$$f_j(\psi) = \exp \left[-\frac{1}{2} (\psi - M_j)^T \Omega^{-1} (\psi - M_j) \right],$$

$$j = 1, 2, \dots, M \quad (16)$$

Với M và L là số nút ẩn và số nút đầu ra tương ứng; w_{ji} là hệ số trọng lượng liên kết giữa lớp ẩn và lớp đầu ra; $M_j = [m_{j1} \ m_{j2} \ \dots \ m_{jL}]^T$ là vector trung bình; $\Omega_j = \text{diag} [s_{j1}^2 \ s_{j2}^2 \ \dots \ s_{jL}^2]^T$ là ma trận hiệp phương sai. Giá trị vào của mạng hàm xuyên tâm là sai số vị trí và đạo hàm sai số vị trí, tức là $k=2$ và $[e_1 \ e_2]^T = [\dot{e} \ \ddot{e}]^T$. $M=9$ là có 9 nút trong lớp ẩn. $L=2$ có nghĩa là vector đầu ra của mạng hàm xuyên tâm với $[f_1 \ f_2] = [\hat{R} \ \hat{P}]$. Để dễ dàng tính toán, giá trị đầu ra của mạng hàm xuyên tâm được viết là:

$$\hat{R}(e|\hat{E}) = \hat{E}^T \Gamma \quad (17)$$

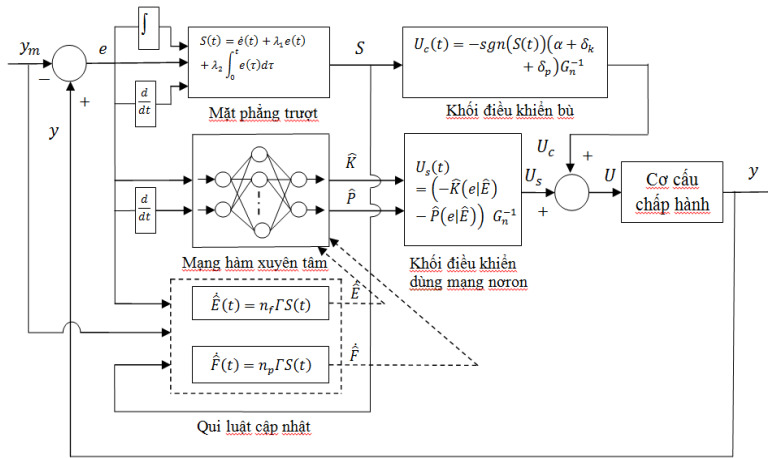
$$\hat{P}(e|\hat{E}) = \hat{F}^T \Gamma \quad (18)$$

Trong đó: $\Gamma = [\Gamma_1 \ \Gamma_2 \ \dots \ \Gamma_M]^T$, $\hat{E} = [w_{11} \ w_{21} \ \dots \ w_{M1}]^T$ và $\hat{F} = [w_{12} \ w_{22} \ \dots \ w_{M2}]^T$: là 2 vector trọng lượng, được thiết lập bằng thuật toán điều khiển (sẽ giới thiệu sau đây). Theo lý thuyết trong môi trường xấp xỉ, sẽ tồn tại một khối tính toán tối ưu của mạng hàm xuyên tâm như phương trình (17) và (18) thỏa mãn:

$$K = K^*(e|E^*) + \varepsilon_k \quad (19)$$

$$P = P^*(e|F^*) + \varepsilon_p \quad (20)$$

Trong đó: E^* và F^* là vector trọng lượng tối ưu để đạt được hàm xấp xỉ tối ưu; ε_k và ε_p là sai số vị trí nhỏ nhất. Mỗi giá trị tuyệt đối của ε_k và ε_p được giả định là nhỏ hơn một hằng số dương δ_k và δ_p ($|\varepsilon_k| < \delta_k$ and $|\varepsilon_p| < \delta_p$). Vector trọng lượng tối ưu E^* and F^* được giả sử rằng là hằng số suốt thời gian ước tính.



Hình 4. Lược đồ điều khiển của điều khiển trượt sử dụng mạng nơron

Lược đồ của khối điều khiển hệ thống ĐKTSDMN được trình bày trong Hình 4. Hệ thống ĐKTSDMN đề xuất được thiết kế theo lý thuyết nêu trên nhằm tăng độ ổn định và bền vững cho hệ thống.

Trên cơ sở lý thuyết đã nêu trên và phương trình hệ thống động lực học (12), với luật điều khiển của hệ thống:

$$U_s(t) = (-\hat{K}(e|\hat{E}) - \hat{P}(e|\hat{F})) G_n^{-1} \quad (21)$$

$$U_c(t) = -\text{sgn}(S(t))(\alpha + \delta_k + \delta_p) G_n^{-1} \quad (22)$$

Luật cập nhật thích nghi để huấn luyện mạng:

$$\dot{\hat{E}}(t) = n_f \Gamma S(t) \quad (23)$$

$$\dot{\hat{F}}(t) = n_p \Gamma S(t) \quad (24)$$

Ổn định của hệ thống sẽ được chứng minh theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Hàm Lyapunov được định nghĩa:

$$V_n(S(t), \tilde{E}, \tilde{F}) = \frac{1}{2} S^2(t) + \frac{1}{2\eta_f} \tilde{E}^T \tilde{E} + \frac{1}{2\eta_p} \tilde{F}^T \tilde{F} \quad (25)$$

Trong đó: $\tilde{E} = E^* - \hat{E}$ và $\tilde{F} = F^* - \hat{F}$. Lấy đạo hàm theo thời gian của hàm Lyapunov và căn cứ (15), (21) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_n(S(t), \tilde{E}, \tilde{F}) &= S(t)\dot{S}(t) - \frac{1}{\eta_f} \tilde{E}^T \dot{\tilde{E}} - \frac{1}{\eta_p} \tilde{F}^T \dot{\tilde{F}} \\ &= S(t)[G_n(Y; t)U_s(t) + K + P \\ &\quad + G_n(Y; t)U_c(t)] - \frac{1}{\eta_f} \tilde{E}^T \dot{\tilde{E}} - \frac{1}{\eta_p} \tilde{F}^T \dot{\tilde{F}} \\ &= S(t)[\{K^* - \hat{K}(e|E)\} + \{P^* - \hat{P}(e|E)\}] \\ &\quad - \frac{1}{\eta_f} \tilde{E}^T \dot{\tilde{E}} - \frac{1}{\eta_p} \tilde{F}^T \dot{\tilde{F}} + S(t)[\varepsilon_k + \varepsilon_p + G_n(X; t)U_c(t)] \\ &= S(t)[\tilde{E}^T \Gamma + \tilde{F}^T \Gamma] - \frac{1}{\eta_f} \tilde{E}^T \dot{\tilde{E}} - \frac{1}{\eta_p} \tilde{F}^T \dot{\tilde{F}} \\ &\quad + S(t)[\varepsilon_k + \varepsilon_p] + S(t)G_n(X; t)U_c(t) \\ &= \tilde{E}^T \left[\Gamma S(t) - \frac{1}{\eta_f} \dot{\tilde{E}} \right] + \tilde{F}^T \left[\Gamma S(t) - \frac{1}{\eta_p} \dot{\tilde{F}} \right] \\ &\quad + S(t)[\varepsilon_k + \varepsilon_p] + S(t)G_n(X; t)U_c(t) \quad (26) \end{aligned}$$

Thay (22), (23), (24) vào (26), có:

$$\dot{V}_n(S(t), \tilde{E}, \tilde{F}) = S(t)[\varepsilon_k + \varepsilon_p] - S(t)\text{sgn}(S(t))(\alpha + \delta_k + \delta_p)$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{V}_n(S(t), \tilde{E}, \tilde{F}) &\leq |S(t)|[|\varepsilon_k| + |\varepsilon_p|] - |S(t)|(\alpha + \delta_k + \delta_p) \\ &= -\alpha|S(t)| + |S(t)|[|\varepsilon_k| + |\varepsilon_p|] + |S(t)|(-\delta_k - \delta_p) \\ &= |S(t)|[(|\varepsilon_k| - \delta_k) + (|\varepsilon_p| - \delta_p)] - \alpha|S(t)| \\ &\leq -\alpha|S(t)| \leq 0 \end{aligned}$$

Suy ra $\dot{V}_n(S(t), \tilde{E}, \tilde{F}) \leq 0 \rightarrow$ Điều này chứng tỏ hệ thống luôn ở trạng thái ổn định theo Lyapunov.

4. Kết quả mô phỏng, chạy thực nghiệm và đánh giá

Thông số của mô hình từ trường đẩy 730 được xác định theo kỹ thuật điều chỉnh đường cong (curve-fitting) dựa trên các dữ liệu thí nghiệm. Khối lượng đĩa từ là $m=0.121$ kg và các thông số được chọn là $a=1.65$, $b=6.2$, $c=2.69$, $N=4$. Thí nghiệm với bộ ĐKT, các thông số được chọn là $\lambda_1=10$; $\lambda_2=30$; $\delta=10$. Thí nghiệm ĐKTSDMN, các thông số được chọn là $\lambda_1=10$; $\lambda_2=30$, $\delta_p=1$, $\delta_k=1$, $n_f=5$, $n_p=5$, $\alpha=3$.

Mô phỏng và thí nghiệm kiểm chứng hiệu quả của thuật toán đề xuất được thực hiện trong hai trường hợp:

Trường hợp 1: Khi khối lượng đĩa nam châm $m=0.121$ kg.

Trường hợp 2: Khi khối lượng đĩa được tăng thêm lên 0.03 kg. Tổng khối lượng đĩa từ là $m=0.151$ kg.

Điều kiện ban đầu của thí nghiệm là vị trí đầu đĩa nam châm (y) cách gốc 20 mm trong tất cả các thí nghiệm. Biên độ của các quỹ đạo tham chiếu có độ dao động là 10mm. Sai số vị trí đo đặc của hệ thống được tính bằng phương pháp tổng bình phương sai số vị trí (TBPSSVT):

$$\text{TBPSSVT} = \sum_{k=1}^n (\text{SSVT}(kT))^2 \quad (27)$$

Trong đó: $t=kT$ là thời gian lấy từ 0 đến 4s; thời gian lấy mẫu $T=0.002652$ s.

Đơn vị sử dụng để đo vị trí và sai số vị trí theo dõi trong kết quả thí nghiệm là Counts (10000 counts = 1cm). Đơn vị được sử dụng để tính TBPSSVT là mm^2 ($10^6 \text{ counts}^2 = 1 \text{ mm}^2$).

Chất lượng điều khiển của hệ thống được đánh giá qua các tiêu chí: Độ sai lệch vị trí điều khiển; Dao động trong quá trình vận hành; Thời gian quá độ (t_{qd}) và độ quá điều chỉnh (POT) tính theo công thức:

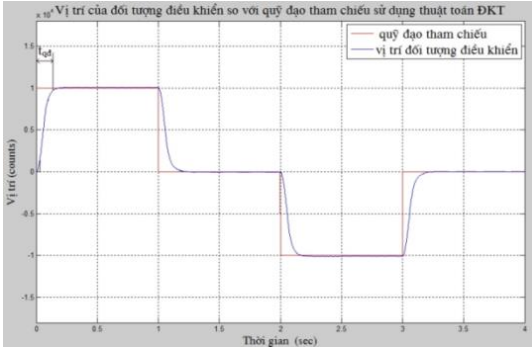
$$\text{POT} = \frac{C_{\max} - C_{xl}}{C_{xl}} \times 100\%$$

Trong đó: $C_{\max}$ - giá trị phản hồi cực đại; C_{xl} - giá trị phản hồi xác lập. Để thể hiện rõ sự khác nhau về thời gian quá độ (t_{qd}), độ quá điều chỉnh của mỗi thuật toán, ta sẽ thực hiện các mô phỏng và thí nghiệm với tín hiệu vào là tín hiệu bước. Để đánh giá sự khác nhau về sai số vị trí, độ dao động của mỗi thuật toán, ta sẽ thực hiện các mô phỏng và thí nghiệm với tín hiệu vào là tín hiệu sin.

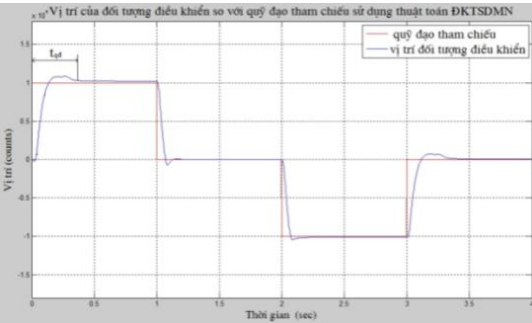
4.1. Kết quả mô phỏng bằng Matlab

4.1.1. So sánh về thời gian quá độ (t_{qd}), độ quá điều chỉnh (POT)

Các mô phỏng được thực hiện với tín hiệu điều khiển là tín hiệu bước. Kết quả mô phỏng như Hình 5, 6.



Hình 5. Kết quả mô phỏng khi sử dụng thuật toán ĐKT với tín hiệu điều khiển là tín hiệu bước



Hình 6. Kết quả mô phỏng khi sử dụng thuật toán ĐKTSDMN với tín hiệu điều khiển là tín hiệu bước

Bảng 1. Thời gian quá độ và độ quá điều chỉnh khi sử dụng lần lượt 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN

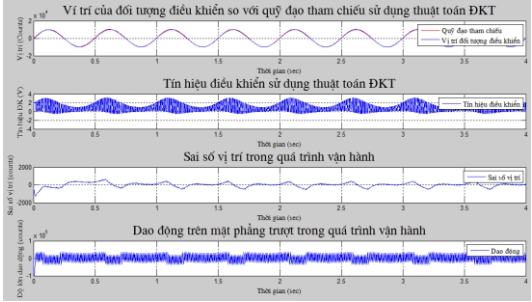
Thuật toán	Các thông số trong thời gian quá độ	
	t_{qd} (s)	POT (%)
ĐKT	0,1414	0,9835
ĐKTSDMN	0,3660	8,5072

4.1.2. So sánh về sai lệch vị trí và độ dao động trong mô phỏng Matlab

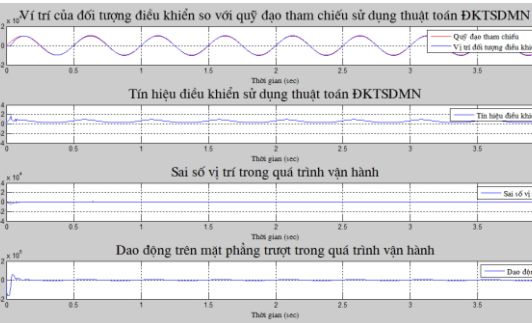
Các mô phỏng được thực hiện với tín hiệu điều khiển là tín hiệu sin. Kết quả mô phỏng đưa ra ở Hình 7, 8 và Bảng 2.

Bảng 2. Sai số vị trí khi sử dụng lần lượt 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN trong mô phỏng Matlab

Thuật toán sử dụng	Tổng bình phương sai số vị trí [mm ²]	
	ĐKT	ĐKTSDMN
Quỹ đạo tham chiếu		
Quỹ đạo hình sin	142	37,3



Hình 7. Kết quả mô phỏng khi sử dụng thuật toán ĐKT



Hình 8. Kết quả mô phỏng khi sử dụng thuật toán ĐKTSDMN

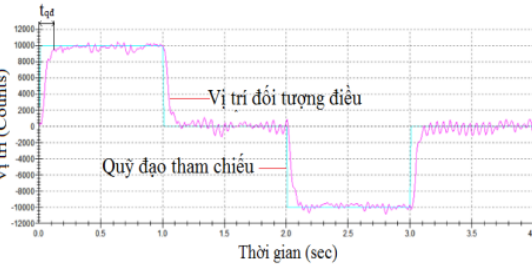
4.2. Kết quả thực nghiệm trên mô hình 730 ECP

4.2.1. So sánh về thời gian quá độ (t_{qd}), độ quá điều chỉnh (POT)

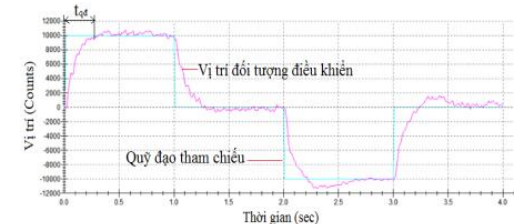
Các kết quả chạy thực nghiệm trên mô hình 730 với tín hiệu điều khiển là tín hiệu bước tương ứng 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN đưa ra ở Hình 9,10 và Bảng 3.

Bảng 3. Thời gian quá độ và độ quá điều chỉnh khi tiến hành thực nghiệm sử dụng 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN

Thuật toán	Các thông số trong thời gian quá độ	
	t_{qd} (s)	POT (%)
ĐKT	0,105	3,46
ĐKTSDMN	0,263	14,57



Hình 9. Kết quả thực nghiệm khi sử dụng thuật toán ĐKT với tín hiệu điều khiển là tín hiệu bước

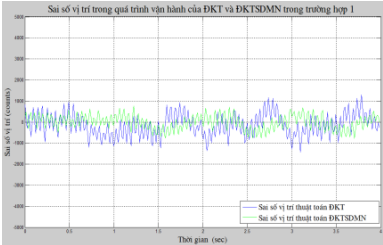


Hình 10. Kết quả thực nghiệm khi sử dụng thuật toán ĐKTSDMN với tín hiệu điều khiển là tín hiệu bước

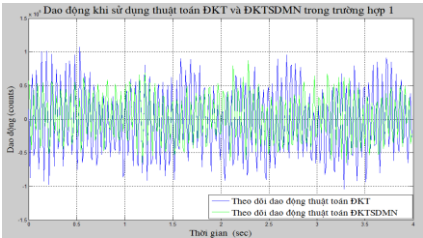
4.2.2. So sánh về sai lệch vị trí và độ dao động trong 2 trường hợp

a. Kết quả thực nghiệm trong trường hợp 1

Các mô phỏng được thực hiện với tín hiệu điều khiển là tín hiệu sin, khối lượng đĩa từ $m=0.121$ kg. Kết quả chạy mô hình thực nghiệm đưa ra trên các Hình 11, 12 và Bảng 4 sau:



Hình 11. Sai số vị trí xảy ra trong quá trình vận hành hệ thống với 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN



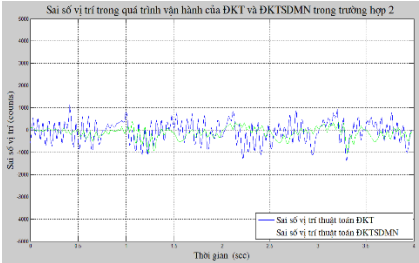
Hình 12. Dao động xảy ra trong quá trình vận hành hệ thống với 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN

Bảng 4. Sai số vị trí được tính bằng phương pháp tổng bình phương sai số vị trí trong trường hợp 1

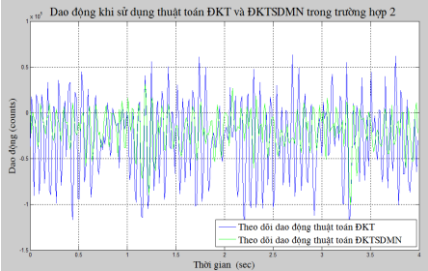
Thuật toán sử dụng	Tổng bình phương sai số vị trí [mm ²]	
	ĐKT	ĐKTSDMN
Quỹ đạo tham chiếu		
Quỹ đạo hình sin	10x10 ²	5.5x10 ²

b. Kết quả thực nghiệm trong trường hợp 2

Thực hiện với tín hiệu điều khiển là tín hiệu sin, khối lượng đĩa từ $m=0,151$ kg. Kết quả thực nghiệm đưa ra trên các Hình 13, 14 và Bảng 5.



Hình 13. Sai số vị trí xảy ra trong quá trình vận hành của 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN



Hình 14. Dao động xảy ra trong quá trình vận hành của 2 thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN

Bảng 5. Sai số vị trí trong trường hợp 2 lần lượt với hai thuật toán ĐKT, ĐKTSDMN

Thuật toán sử dụng	Tổng bình phương sai số vị trí [mm ²]	
	ĐKT	ĐKTSDMN
Quỹ đạo tham chiếu		
Quỹ đạo hình sin	14x10 ²	6x10 ²

4.3. Đánh giá kết quả và thảo luận

4.3.1. Kết quả từ mô phỏng Matlab

Các kết quả mô phỏng ở Hình 5, 6 và Bảng 1 cho thấy thuật toán ĐKT có thời gian quá độ và độ quá điều chỉnh nhỏ hơn bộ ĐKTSDMN. Nguyên nhân chủ yếu làm tăng thời gian quá độ và độ quá điều chỉnh của thuật toán ĐKTSDMN là do cấu tạo mạng noron có nhiều nút nên khối lượng tính toán lớn. Đây là hạn chế cơ bản của mạng noron. Tuy nhiên, cấu trúc mạng noron lại cho phép tính toán chính xác và nó có khả năng học, vì vậy sẽ giảm được sai số vị trí và dao động trong quá trình vận hành.

Các kết quả mô phỏng trong Hình 7, 8 và Bảng 2 chỉ ra rằng: Sai số vị trí giảm đáng kể khi sử dụng thuật toán ĐKTSDMN; Dao động trong quá trình vận hành của thuật toán ĐKTSDMN nhỏ hơn nhiều so với thuật toán ĐKT.

4.3.2. Kết quả từ thực nghiệm trên hệ thống 730

Các kết quả thực nghiệm có được trên Hình 9, 10, Bảng 3 và Bảng 4 là hoàn toàn trùng khớp với lý thuyết ổn định đã được chứng minh ở trên và các kết quả mô phỏng trên các Hình 5-8. Các kết quả nhận được trên cho thấy:

- Hệ thống sẽ tiến về ổn định khi sử dụng thuật toán ĐKT và ĐKTSDMN như lý thuyết đã chứng minh.
- Sai số vị trí giảm đáng kể khi sử dụng thuật toán ĐKTSDMN.
- Dao động trong quá trình vận hành của thuật toán ĐKTSDMN nhỏ hơn rất nhiều so với thuật toán ĐKT.

Ngoài ra, điểm nổi trội của thuật toán ĐKTSDMN đó là khả năng tự học và thích ứng cao. Điều này thể hiện rõ qua kết quả hai trường hợp thực nghiệm thể hiện trong Hình 11, 12, 13, 14, Bảng 4 và 5. Khi khối lượng đối tượng tăng lên thì tổng bình phương sai số vị trí với ĐKTSDMN tăng lên không đáng kể. Ngược lại, tổng bình phương sai số vị trí với ĐKT tăng nhanh.

Như vậy, ta có thể thấy do khả năng tự học và thích ứng cao của mạng noron nên khi sử dụng thuật toán ĐKTSDMN đã tăng chất lượng điều khiển của hệ thống từ trường đẩy.

5. Kết luận

Trên cơ sở hai thuật toán ĐKT và ĐKTSDMN được xây dựng, các tác giả tiến hành chạy mô phỏng và kiểm tra trên mô hình thực nghiệm từ trường đẩy 730, các kết quả được thảo luận và đánh giá so sánh mức độ hiệu quả của các thuật toán điều khiển. Kết quả nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của thuật toán ĐKT và ĐKTSDMN khi điều khiển vị trí của đĩa từ. Với thuật toán ĐKT đã thể hiện sự thích nghi mạnh mẽ khi hệ thống có nhiễu. Tuy nhiên, với ĐKT luôn tạo dao động lớn trong quá trình vận hành, gây ảnh hưởng lớn đến sự ổn định của hệ thống. Thuật toán mới đề xuất ĐKTSDMN ngoài việc duy trì

được những ưu điểm của thuật toán ĐKT, đồng thời cho phép giảm sai số vị trí và tránh được dao động trong quá trình vận hành.

Kết quả mô phỏng và chạy trên mô hình thực nghiệm đã khẳng định những ưu điểm một cách rõ ràng của thuật toán ĐKTSDMN. Kết quả nghiên cứu này sẽ là tiền đề cho việc thiết kế cải tiến các bộ điều khiển cho hệ thống từ trường đẩy trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vipin Jain, Ashlesh Sharma, Lakshminarayanan Subramanian, "Road traffic congestion in the developing world", *Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Computing for Development*, no 11, 2012.
- [2] Hien Nguyen, Frank Montgomery, Paul Timms, "Should motorcycle be blamed for traffic congestion in Vietnam cities, "In CODATU XIII conference, Ho Chi Minh City, 2008.
- [3] Monika Yadav, Nivritti Mehta, Aman Gupta, Akshay Chaudhary & D. V. Mahindru", Review of Magnetic Levitation (MAGLEV): A Technology to Propel Vehicles with Magnets", *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical & Mechanics*, Vol 13, 2013.
- [4] T. R. Parks, "Manual For Model 730 Magnetic Levitation System", California 1999.
- [5] Hamid Yaghoubi, "Practical Application of Magnetic Levitation Technology", *Iran Maglec Technology*, 2012.
- [6] D. L. Trumper, S. M. Olson, and P. K. Subrahmanyam, "Linearizing control of magnetic suspension systems", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 427–438, Jul. 1997.
- [7] E. Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 4, pp. 831–838, Aug. 2001.
- [8] W. G. Hurley and W. H. Wolfle, "Electromagnetic design of a magnetic suspension system", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 40, no. 2, pp. 124–130, May 1997.
- [9] J. Joo and J. H. Seo, "Design and analysis of the nonlinear feedback linearizing control for an electromagnetic suspension system", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 135–144, Jan. 1997.
- [10] Z. J. Yang and M. Tateishi, "Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system", *Automatica*, vol. 37, no. 7, pp. 1125–1131, Jul. 2001.
- [11] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [12] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 1, pp. 23–36, Feb. 1993.
- [13] J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [14] J. S. R. Jang and C. T. Sun, "Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems", *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 4, no. 1, pp. 156–159, Jan. 1993.

(BBT nhận bài: 23/05/2015, phản biện xong: 13/09/2015)