

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN CÂN BẰNG NHANH HỆ CON LẮC NGƯỢC DỰA TRÊN HIỆN TƯỢNG CỘNG HƯỞNG DAO ĐỘNG

PERFORMANCE EVALUATION OF THE BALANCED CONTROL METHOD OF AN INVERTED PENDULUM BASED ON OSCILLATING RESONANCE PHENOMENON

Bùi Đức Mạnh, Thái Bá Hòa, Võ Như Thành, Phạm Anh Đức*

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: ducpham@dut.udn.vn

(Nhận bài: 15/8/2022; Chấp nhận đăng: 22/10/2022)

Tóm tắt - Điều khiển học là lĩnh vực thu hút sự quan tâm lớn với nhiều cách tiếp cận và phương pháp thực hiện khác nhau tùy vào đặc tính của hệ thống. Trong lĩnh vực điều khiển học, các mô hình hoặc hệ thống mang đặc tính phi tuyến thường được các nhà nghiên cứu đặc biệt quan tâm. Hệ thống con lắc ngược chính là một trong những hệ thống điển hình để nghiên cứu với các phương pháp điều khiển mô hình phi tuyến. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu trình bày hai phương pháp điều khiển khác nhau cho hệ này. Đó là phương pháp điều khiển năng lượng để nâng ngược thanh lắc kết hợp với cân bằng thanh lắc sử dụng thuật toán toàn phương tuyến tính (LQR) và phương pháp điều khiển mờ cho cả quá trình nâng ngược và cân bằng thanh lắc. Kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB thể hiện rằng, phương pháp sử dụng bộ điều khiển mờ phù hợp hơn cho hệ phi tuyến và cải thiện thời gian đáp ứng của thanh lắc so với phương pháp còn lại.

Từ khóa - Hệ con lắc ngược; LQR; Điều khiển mờ; Điều khiển cân bằng; Cộng hưởng dao động.

1. Giới thiệu

Điều khiển học là lĩnh vực quan trọng trong kỹ thuật với nhiều cách tiếp cận và phương pháp thực hiện khác nhau tùy vào đặc tính của hệ thống. Điều khiển học chú trọng vào việc phân tích, thiết kế bộ điều khiển cho các hệ thống phức tạp, yêu cầu tính ổn định, độ chính xác cao. Các phương pháp điều khiển từ cổ điển đến hiện đại phát triển nhằm đáp ứng các vấn đề nêu trên. Mô hình điều khiển bao gồm hai loại là tuyến tính và phi tuyến. Đối với hệ tuyến tính thì có thể áp dụng các phương pháp điều khiển PID, toàn phương tuyến tính (LQR), hồi tiếp tuyến tính hóa (feedback linearization). Còn đối với hệ phi tuyến, các phương pháp như điều khiển mờ, điều khiển PID mờ, điều khiển LQR mờ, mạng neuron được áp dụng để có thể đáp ứng được hệ thống.

Trong lĩnh vực điều khiển học, các mô hình hoặc hệ thống mang đặc tính phi tuyến thường được các nhà nghiên cứu đặc biệt quan tâm. Thực tế, trong nhiều năm, hệ thống phi tuyến thường xuất hiện trong nhiều lĩnh vực khác nhau như điều khiển quá trình, y sinh, máy bay, hàng không vũ trụ, ... [1]. Hầu hết, các mô hình vật lý đó trong thực tế đều có tính biến đổi bất tuyến tính theo thời gian (tính phi tuyến) với đa dạng các lý do như ma sát, mài mòn, hoặc tác động bất chợt phi tuyến tính... [2]. Kéo theo đó là quá trình điều khiển và kiểm soát hệ trở nên khó khăn hơn. Nghiên cứu hệ phi tuyến có thể tăng hiệu năng của việc điều khiển khi tuyến tính hóa hệ thống, tăng tính ổn định và khả năng làm việc của hệ [3 - 4].

Abstract - Control theory is an interesting area that includes multiple approaches and different control techniques, depending on the system's characteristics. Nonlinear systems are more attractive to researchers and engineers in this field. In particular, the inverted pendulum is one of the basic systems that used to investigate with nonlinear control methods. In this paper, the authors introduce two different control methods. Those are energy control method for swinging up combined with balancing pendulum using Linear Quadratic Regulator and Fuzzy Logic Control one for not only swing-up but also balance pendulum. With simulation results in MATLAB, Fuzzy logic control is more suitable for nonlinear system, and it also improves the system's response time compared to the traditional controller.

Key words - Inverted pendulum; LQR; Fuzzy Logic Control; Balanced Control Method; Oscillating Resonance.

Hệ thống điều khiển con lắc ngược là một trong những hệ điển hình có tính phi tuyến cao [5-6]. Do đó, đây là mô hình hợp lý để cho các nhà nghiên cứu, kỹ sư sử dụng nghiên cứu các phương pháp điều khiển khác nhau. Vấn đề cần giải quyết là làm thế nào để có thể nâng ngược thanh lắc từ vị trí hướng thẳng đứng xuống dưới lên vị trí thẳng đứng lên trên và duy trì việc thăng bằng này. Nghiên cứu của K.J.Astrom đã đề xuất phương án điều khiển nâng ngược thanh lắc dựa trên phương trình năng lượng [7]. Luật điều khiển tác động vào hệ luôn làm cho hệ ổn định dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Tuy nhiên, tác giả chưa xem xét đến giới hạn của xe đẩy trong nghiên cứu này. Quá trình điều khiển để nâng ngược thanh lắc dựa trên phương pháp cân bằng năng lượng đã được trình bày trong nghiên cứu [8]. Trong quá trình cân bằng đó, các biến số vị trí xe, vận tốc xe, lực tác động vào hệ là các yếu tố cần quan tâm. Để biết được chính xác các yếu tố đó cũng như các tác động phi tuyến khác ở đầu vào, quá trình nhận dạng các tham số tác động đầu vào của hệ thống là quá trình cần thiết [2]. Bên cạnh đó, các phương pháp điều khiển thông minh thích nghi mờ, mạng neuron cũng được đề xuất [9-14]. Tuy nhiên, những nghiên cứu kết hợp các phương pháp và đánh giá hiệu quả của chúng vẫn còn ít tác giả tiếp cận [15-17].

Đối với tình hình nghiên cứu trong nước, các nghiên cứu tập trung vào các phương pháp điều khiển hệ thống thông qua việc tuyến tính hóa hệ xung quanh điểm cân bằng hướng lên. Nghiên cứu [18] đề xuất phương án điều khiển

¹ The University of Danang – University of Science and Technology (Duc-Manh Bui, Ba Hoa Thai, Thanh Vo Nhu, Anh-Duc Pham)

cân bằng thanh lắc sử dụng phương pháp LQR ứng với các thông số mô hình thực được nhận dạng bằng giải thuật di truyền. Các mô hình điều khiển với hai vòng phản hồi, vòng phản hồi thứ nhất để điều khiển giữ thanh lắc luôn hướng thẳng đứng lên trên, vòng phản hồi thứ hai để kiểm soát xe đẩy dao động trong vị trí giới hạn, đã được đề xuất trong [19]. Hơn nữa, mô hình thực nghiệm để điều khiển cân bằng con lắc ngược hệ phẳng sử dụng bộ điều khiển LQR kết hợp với PID cổ điển sử dụng bo mạch F28379D dựa trên nền tảng vi xử lý C2000 đã được trình bày trong [20]. Về cơ bản, đặc tính phi tuyến của hệ con lắc ngược dạng quay cũng đã được đề xuất trong [21] nhưng chỉ dừng lại ở việc xác định đặc tính về tần số dao động và hệ số tắt dần của thanh lắc dựa trên hệ dao động bậc hai.

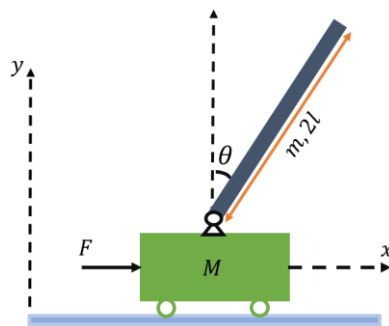
Ở nghiên cứu này, các tác giả tiến hành xây dựng phương pháp và đánh giá khả năng hoạt động của phương pháp điều khiển cân bằng nhanh hệ con lắc ngược dựa trên hiện tượng cộng hưởng dao động. Trước tiên, các thành phần hệ con lắc ngược và phương trình động lực học của hệ con lắc ngược kiểu trượt sẽ được giới thiệu. Tiếp sau đó, phương pháp điều khiển nâng ngược thanh lắc bằng cách điều khiển năng lượng và giữ thẳng bằng thanh lắc bằng phương pháp điều khiển truyền thông toàn phương tuyến tính (LQR) sẽ được trình bày. Thêm vào đó, phương pháp điều khiển sử dụng bộ điều khiển mờ cho việc nâng ngược và cân bằng thanh lắc sẽ được đề xuất. Phương pháp đề xuất này có xét đến tận dụng hiện tượng cộng hưởng dao động nhằm làm tăng tốc độ cân bằng và thời gian đáp ứng hệ thống. Cuối cùng, sự hiệu quả của của phương pháp đề xuất so với phương pháp cân bằng năng lượng truyền thống được đánh giá dựa trên kết quả của các mô hình mô phỏng.

2. Mô tả toán học và đặc tính phi tuyến hệ con lắc ngược

Một mô hình con lắc ngược thường được phân thành 2 loại gồm hệ quay và hệ trượt, với sự khác biệt giữa các hệ tại cơ cấu gây chuyển động ban đầu là khớp quay hoặc trượt. Các hệ mô hình con lắc ngược đều là những mô hình có hai bậc tự do nhưng chỉ có một khâu đầu tiên có thể điều khiển chuyển động, còn khâu thứ hai là một thanh lắc có chuyển động tự do quay quanh một điểm cố định. Tuy có đặc điểm chuyển động của khâu thứ nhất khác nhau là khớp quay hoặc khớp trượt, nhưng bài toán điều khiển hướng đến đối với các loại mô hình này đều tập trung vào việc điều khiển thanh lắc thuộc khâu thứ hai dựng đứng lên và giữ cân bằng (quá trình dựng ngược). Trong nghiên cứu này, các mô tả về nguyên lý và cấu tạo mô hình hệ thống được xác định dành cho hệ thống con lắc ngược hệ trượt.

Những thành phần cơ bản của hệ con lắc ngược được thể hiện ở Hình 1. Thanh lắc có chiều dài $2l$, khối lượng m . Thanh lắc này có thể quay quanh khớp quay gắn với xe đẩy có khối lượng M . Lực tác động F vào xe đẩy có nhiệm vụ tạo dao động qua lại để đưa thanh lắc từ vị trí hướng thẳng đứng xuống dưới lên phía trên và giữ thẳng bằng thanh lắc luôn ở vị trí hướng lên trên. Phương trình động lực học của hệ được xây dựng dựa trên phương trình Euler-Lagrange (1) [19-20]:

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + ml \cos \theta \ddot{\theta} - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta = F - c \dot{x} \\ ml \cos \theta \ddot{x} + (I + ml^2) \ddot{\theta} - mgl \sin \theta = -b \dot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

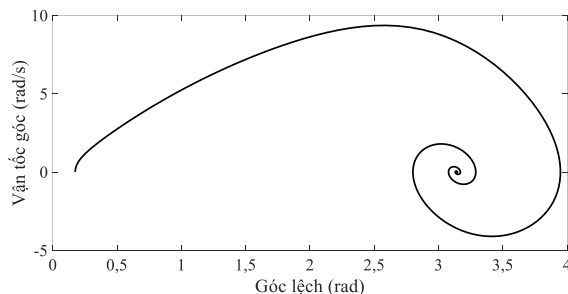


Hình 1. Sơ đồ nguyên lý mô hình con lắc ngược hệ trượt

Bảng 1. Các thông số cho mô hình mô phỏng

Thông số	Kí hiệu	Giá trị
Chiều dài thanh lắc	$2l$	0,6 (m)
Khối lượng thanh lắc	m	0,2 (kg)
Khối lượng xe đẩy	M	0,5 (kg)
Moment quán tính thanh lắc	I	0,006 (kg.m ²)
Giá tốc trọng trường	g	9,81 (m/s ²)
Hệ số ma sát xe trượt	c	0,6
Hệ số ma sát trong ổ trục quay thanh lắc	b	0,05

Kết quả mô phỏng giản đồ pha góc thanh lắc và vận tốc góc thanh lắc được thể hiện trong Hình 2. Thông số mô hình mô phỏng được tổng hợp ở Bảng 1. Giả sử ban đầu thanh lắc có góc lệch 10 độ so với vị trí thẳng đứng hướng xuống dưới, dao động quanh vị trí thẳng đứng hướng xuống dưới. Cùng với đó, do lực ma sát tại ổ trục quay thanh lắc nên nó sẽ dừng dao động hẳn tại vị trí hướng thẳng đứng xuống dưới (π rad)). Như vậy, mô hình điều khiển con lắc ngược hướng đến việc đưa thanh lắc từ vị trí hướng xuống lên phía trên và tiến hành cân bằng thanh lắc, luôn giữ thanh lắc hướng lên phía trên.



Hình 2. Giản đồ pha góc thanh lắc

3. Phương án điều khiển con lắc ngược

3.1. Phương pháp điều khiển năng lượng và cân bằng thanh lắc dùng thuật toán LQR

Để có thể nâng ngược thanh lắc từ vị trí thẳng đứng xuống dưới lên vị trí phía trên, phương pháp điều khiển năng lượng thanh lắc được đề xuất vào năm 2000 bởi K.J. Astrom và K. Furuta được sử dụng [7]. Năng lượng thanh lắc được điều khiển thông qua lực tác dụng vào xe đẩy. Trước tiên, tổng năng lượng của thanh lắc được biểu diễn theo công thức (2) [7-8, 14]. Năng lượng này bao gồm động năng quay quanh trục cố định được gắn trên xe đẩy và thế năng của thanh lắc. Tiếp sau đó, quá trình tăng năng lượng thanh lắc

theo thời gian được xét đến. Quá trình này cần xét đến đạo hàm cấp một của hàm năng lượng dE/dt (3). Để năng lượng có thể tăng, dE/dt phải luôn không âm trong quá trình khảo sát [7]. Bên cạnh đó, năng lượng E trong lúc thanh lắc dao động phải luôn nhỏ hơn và tiệm cận với năng lượng E_{up} để quán tính của thanh lắc không quá lớn khi chuyển sang quá trình cân bằng [22]. Từ đó, luật điều khiển xe đẩy để tạo dao động cho thanh lắc được đưa ra.

Năng lượng của thanh lắc:

$$E = \frac{1}{2}(I + ml^2)\dot{\theta}^2 + mgl \cos \theta \quad (2)$$

Đạo hàm cấp một hàm năng lượng

$$\frac{dE}{dt} = (I + ml^2)\dot{\theta}\ddot{\theta} - mgl\dot{\theta}\sin\theta = -m\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta \quad (3)$$

Để năng lượng E có thể tăng trong quá trình dao động,

tức là $\frac{dE}{dt} \geq 0$ thì luật điều khiển cho xe đẩy được mô tả bởi (4) [7]:

$$\ddot{x} = k_{sw}(E - E_{up})\text{sign}(\dot{\theta}\cos\theta) \quad (4)$$

trong đó, $E_{up} = mgl$ là năng lượng của thanh lắc khi dừng thẳng đứng hướng lên, $k_{sw} > 0$ là hệ số tìm được dựa trên phương pháp thử sai tùy vào thông số của từng mô hình sao cho xe đẩy vẫn di chuyển trong vùng giới hạn cho phép.

Sau khi đã thiết kế được luật điều khiển cho xe đẩy để đưa thanh lắc từ vị trí thẳng đứng xuống dưới vào vùng xung quanh điểm cân bằng hướng lên, việc điều khiển cân bằng sử dụng bộ điều khiển toàn phương tuyến tính LQR được thực hiện. Trước tiên, các yếu tố phi tuyến của hệ con lắc này được loại bỏ bằng phương pháp tuyến tính hóa khi hệ xung quanh vị trí cân bằng hướng lên. Tiếp đến, hệ phương trình biến không gian trạng thái được thành lập. Bộ điều khiển LQR sẽ được xây dựng dựa trên hệ phương trình này. Bên cạnh đó, luật điều khiển $U = -K.X$ sẽ tác động lực vào xe đẩy để kiểm soát các biến trạng thái của hệ thống. Ma trận điều khiển K được tính toán sao cho hàm chi tiêu chất lượng J là nhỏ nhất:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (5)$$

với $X = [x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]$ là ma trận biến trạng thái, U là giá trị tác động đầu vào của hệ.

Ma trận trọng số Q và R được chọn theo phương pháp thử sai sao cho đảm bảo lực tác động vào hệ thống làm cho thanh lắc luôn giữ cân bằng hướng lên và xe đẩy ở vị trí ổn định. Trong đó, Q : ma trận xác định dương ($Q > 0$) là ma trận trọng số cho các biến trạng thái của hệ thống; R : ma trận bán xác định dương ($R \geq 0$) là ma trận trọng số cho biến đầu vào của hệ thống.

Các hệ số Q và R lần lượt là:

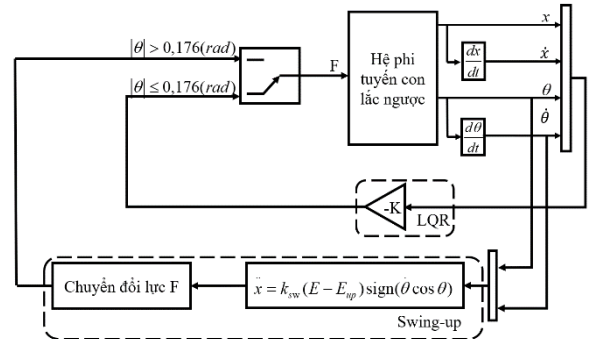
$$Q = \begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 150 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = 0,035$$

Từ đó, dựa vào lệnh `lqr` trong phần mềm MATLAB để thực hiện tính toán xác định ma trận hệ số phản hồi của quá trình điều khiển dạng ngược con lắc:

$$K = [-58,55 \quad -49,49 \quad 185,03 \quad 28,03]$$

Sơ đồ khối hệ điều khiển con lắc ngược với phương pháp điều khiển năng lượng và LQR được mô tả cụ thể trong Hình 3. Ban đầu, thanh lắc hướng thẳng đứng ở góc π (rad). Tín hiệu $[\theta, \dot{\theta}]$ sẽ được đưa vào vùng điều khiển “dạng ngược thanh lắc” (Swing-up) để bắt đầu quá trình tạo dao động đưa thanh lắc hướng dần lên phía trên. Dựa vào 2 tín hiệu $[\theta, \dot{\theta}]$ gia tốc của xe đẩy sẽ được tính toán dựa trên phương trình (4). Từ đó, lực tác động F cũng sẽ được tính toán để tác động cho xe đẩy dịch chuyển. Khi giá trị tuyệt đối góc lắc nhỏ hơn 0,176 (rad), các tín hiệu hiệu $[x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]$ sẽ được đưa vào bộ điều khiển LQR và tính toán để chuyển đổi thành tín hiệu tác động vào hệ thống để giữ thăng bằng thanh lắc.



Hình 3. Sơ đồ điều khiển nâng ngược và cân bằng thanh lắc sử dụng phương pháp truyền thống

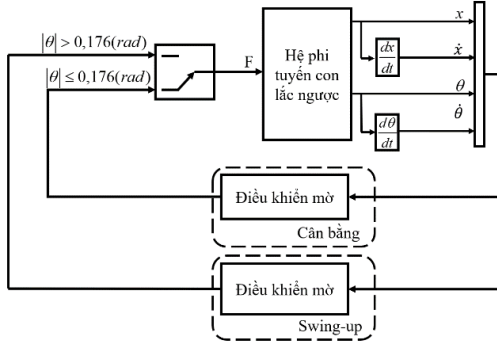
3.2. Phương pháp điều khiển dùng bộ điều khiển mờ

Để có thể giảm thời gian đưa thanh lắc vào vùng xung quanh điểm cân bằng hướng lên, cùng với đó là phù hợp hơn cho quá trình điều khiển thanh lắc trong vùng phi tuyến, chiến lược “dạng ngược thanh lắc” (Swing-up) dùng bộ điều khiển mờ (Fuzzy logic control) được đề xuất. Bên cạnh đó, nghiên cứu này cũng kết hợp thêm một bộ điều khiển mờ để thực hiện quá trình cân bằng thanh lắc [23]. Đối với phương pháp này, yêu cầu về phương trình toán học và một số thông số khó ước lượng của mô hình là không cần thiết [13-14], nhưng nó yêu cầu người điều khiển phải hiểu rõ về cách vận hành của hệ để có thể xây dựng được các quy tắc điều khiển.

Trước khi thiết kế bộ điều khiển mờ cho hệ thống, tính ổn định của hệ thống cần được xét đến. Xét hệ thống dao động xung quanh điểm cân bằng hướng lên x_e với hàm Lyapunov được chọn theo biến trạng thái của góc thanh lắc [24]. Khi đó, hàm Lyapunov V thỏa mãn $V(x_e) = 0, V > 0, \dot{V} \leq 0$. Như vậy hệ thống ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov [25].

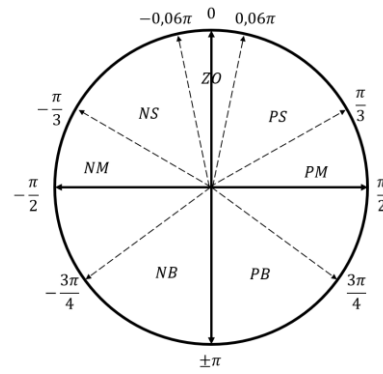
Sơ đồ khối quy trình điều khiển dùng bộ điều khiển mờ hệ con lắc ngược được thể hiện chi tiết ở Hình 4. Trước hết, các biến trạng thái $[x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]$ sẽ làm đầu vào cho bộ điều khiển mờ Swing-up. Đầu ra của bộ điều khiển mờ này là lực tác động F vào xe đẩy sao cho có thể nâng ngược thanh lắc từ vị trí hướng thẳng đứng xuống dưới lên phía trên. Khi thanh lắc vào vùng dao động xung quanh điểm cân

bằng hướng lên ($|\theta| \leq 0,176 (rad)$) thì bộ điều khiển mờ cân bằng sẽ được thực hiện để giữ thanh lắc luôn hướng thẳng đứng lên phía trên và đưa xe đẩy về vị trí 0(m).

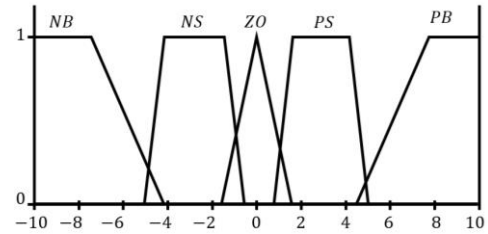


Hình 4. Sơ đồ điều khiển nâng ngược và cân bằng thanh lắc sử dụng bộ điều khiển mờ

Do quá trình “dừng ngược thanh lắc” dựa trên phương trình năng lượng, nên tín hiệu $[\theta, \dot{\theta}]$ quyết định đặc tính động lực học của hệ. Hình 5 thể hiện biến ngôn ngữ của góc thanh lắc θ . Đối với biến vận tốc thay đổi góc thanh lắc $\dot{\theta}$, khi thanh lắc quay cùng chiều kim đồng hồ thì vận tốc góc là dương ($\dot{\theta} > 0$) và ngược lại; Hình 7 thể hiện hàm thành viên (membership function) của biến vận tốc góc thanh lắc $\dot{\theta}$. Trong đó, NB - negative big, NM - negative medium, NS - negative small, ZO - zero, PS - positive small, PM - positive medium, PB - positive big. Bên cạnh đó, các giá trị vị trí xe đẩy và vận tốc xe đẩy $[x, \dot{x}]$ cũng phải được thêm vào để kiểm soát hành trình của xe trong vùng giới hạn. Quy tắc thành lập luật điều khiển mờ được trình bày ở Bảng 2. Chiến lược thành lập luật điều khiển này cũng dựa trên nguyên tắc nâng ngược thanh lắc bằng cách tăng năng lượng của thanh lắc được đề xuất ở [13-14]. Tức là khi góc thanh lắc θ và vận tốc góc $\dot{\theta}$ cùng dấu thì tiến hành tác động lực vào xe đẩy. Và trong trường hợp góc thanh lắc θ nằm trong vùng NM hoặc PM thì lực tác động vào xe đẩy là 0. Ngoài ra, để tăng tốc độ đáp ứng hệ thống với phương pháp điều khiển mờ đề xuất, các tính toán và lựa chọn tác động lực theo từng vùng hoạt động của thanh lắc được xác định dựa theo hiện tượng cộng hưởng dao động. Các tác động đó sẽ có xu hướng khuếch đại hiện tượng lắc lư, tận dụng quán tính trong chuyển động thanh lắc và tăng tốc quá trình dừng ngược để nhanh chóng đưa thanh lắc đến vị trí ổn định hướng lên. Vì vậy, bên cạnh chiến lược đã nêu phía trên, khi thanh lắc đi vào vùng $[\theta, \dot{\theta}]$ tương ứng là $[NB, PB]$ hoặc $[PB, NB]$ thì quán tính thanh lắc vẫn còn lớn do thanh lắc vừa qua vị trí cân bằng dưới $\pi(rad)$. Lúc này, tận dụng hiện tượng cộng hưởng dao động của thanh lắc mà tác động lực vào xe đẩy. Khi thanh lắc ở vùng $[NB, PB]$ thì lực tác động vào xe đẩy cùng chiều với lực tác động vào xe đẩy trong trường hợp $[\theta, \dot{\theta}]$ là $[PB, PB]$. Tương tự, khi thanh lắc ở vùng $[PB, NB]$ thì lực tác động vào xe đẩy là cùng chiều với lực tác động trong trường hợp $[\theta, \dot{\theta}]$ là $[NB, NB]$ để cho thanh lắc nhanh hướng lên phía trên. Cùng với đó, khi thanh lắc ở vị trí $[\theta, \dot{\theta}]$ là $[NS, PS]$ hoặc $[NS, ZO]$ thì cũng tác động lực vào xe đẩy sao cho đưa nhanh thanh lắc vào vùng gần điểm cân bằng hướng lên để bắt đầu chuyển sang trạng thái cân bằng thanh lắc.



Hình 5. Giản đồ biến ngôn ngữ góc thanh lắc (θ)



Hình 6. Hàm thành viên của biến vận tốc góc thanh lắc ($\dot{\theta}$)

Bảng 2. Quy tắc thành lập luật điều khiển mờ

$\theta/\dot{\theta}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB		NB		ZO		NB
NS	NS		NS		ZO		ZO
ZO	ZO	ZO	NS	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO		NS		PS		PS
PB	PB		ZO		PB		PB

4. Kết quả

4.1. So sánh và đánh giá phương pháp điều khiển năng lượng và phương pháp điều khiển mờ

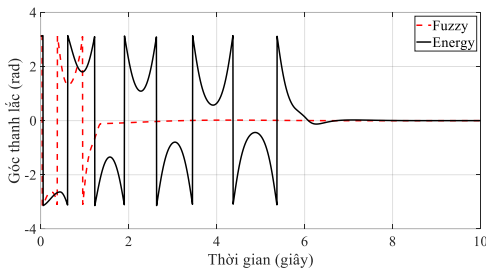
Kết quả mô phỏng quá trình nâng ngược và cân bằng thanh lắc sử dụng hai phương pháp được trình bày ở trên được thể hiện ở Hình 7 - Hình 10 Các kết quả trên được thực hiện tương ứng với các thông số được nêu ở Bảng 1. Ban đầu quá trình “dừng ngược thanh lắc” từ vị trí hướng thẳng đứng xuống dưới lên phía trên sẽ được thực hiện. Đối với phương pháp truyền thống, quá trình swing-up này tốn gần 6(s). Trong khi đó, phương pháp dùng bộ điều khiển mờ có xét đến việc tận dụng hiện tượng cộng hưởng chỉ mất khoảng 1,8(s) để đưa thanh lắc vào vùng xung quanh vị trí cân bằng $|\theta| \leq 0,176 (rad)$. Tiếp đó, quá trình cân bằng sẽ được thực hiện. Để góc thanh lắc đạt được trạng thái xác lập, phương pháp điều khiển mờ chỉ mất khoảng 2,5(s), trong khi phương pháp điều khiển truyền thống phải mất khoảng 7(s). Tuy nhiên, đối với phương pháp điều khiển mờ, khi thanh lắc chuyển sang trạng thái cân bằng thì xe đẩy đang ở vị trí 0,5 (m). Lúc này bộ điều khiển mờ cân bằng phải có nhiệm vụ đưa xe đẩy về vị trí 0(m) (vùng trung tâm thanh trượt) nhưng vẫn phải giữ được thanh lắc thẳng bằng ở vị trí hướng thẳng đứng lên trên. Do vậy, thời gian đáp ứng để xe đẩy về vị trí 0(m) là khoảng 6(s) kể từ lúc thanh lắc được cân bằng.

Từ kết quả mô phỏng và so sánh trong Bảng 3, có thể thấy phương pháp điều khiển mờ có kết hợp đặc tính cộng

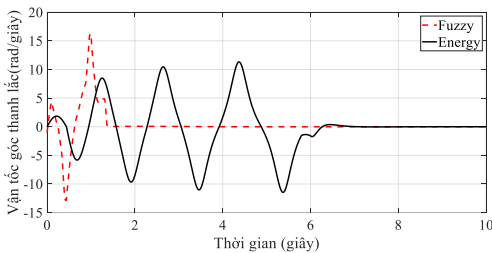
hường dao động đạt được tính ổn định và thời gian đáp ứng tốt hơn so với phương pháp điều khiển cân bằng năng lượng truyền thống. Các góc thanh lắc ở cả 2 phương pháp đều có xu hướng nhanh đi chuyển dụng ngược con lắc (qua lại quanh vị trí trục đứng trong vùng $\pm\pi$), nhưng phương pháp điều khiển mờ kết hợp đặc tính cộng hưởng dao động giúp hệ thống đạt được ổn định nhanh gần gấp 3 lần so với phương pháp năng lượng truyền thống. Để đạt được điều đó vận tốc góc của thanh lắc trong phương pháp điều khiển mờ kết hợp đặc tính cộng hưởng dao động cần đạt được gấp 1,5 lần so với biên số cùng loại của góc lắc trong phương pháp truyền thống. Bên cạnh đó, bộ phận kích hoạt chuyển động của thanh lắc, vận tốc của xe đẩy, cũng đạt được vận tốc gần gấp 2 lần và có khả năng đáp ứng nhanh với yêu cầu điều chỉnh chuyển động mong muốn của hệ thống đó trong vùng làm việc. Đây là yếu tố quan trọng trong việc lựa chọn động cơ cũng như các cấu kiện truyền động phù hợp trong các hệ thống thực nghiệm của phương pháp điều khiển mờ đã đề xuất trong nghiên cứu này.

Bảng 3. So sánh kết quả hoạt động hai phương pháp

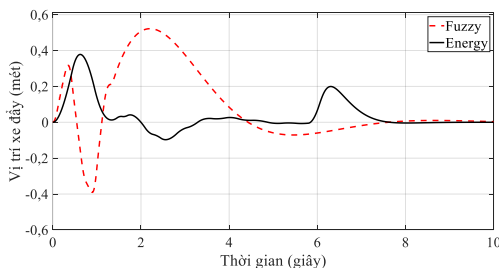
	PP. cân bằng năng lượng truyền thống	PP. điều khiển mờ kết hợp cộng hưởng dao động
Thời gian đáp ứng	7 (giây)	2,5 (giây)
Vận tốc thanh lắc tối đa đạt được	11 (rad/giây)	16 (rad/giây)
Vùng làm việc xe đẩy	-0,2 ÷ 0,4 mét	-0,4 ÷ 0,6 mét
Vận tốc xe đẩy tối đa đạt được	± 1 mét/giây	± 2,5 mét/giây



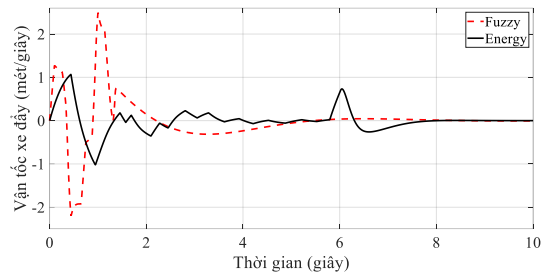
Hình 7. Kết quả mô phỏng góc lệch thanh lắc



Hình 8. Kết quả mô phỏng vận tốc góc thanh lắc



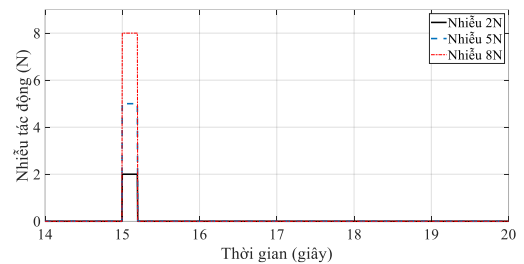
Hình 9. Kết quả mô phỏng vị trí của xe đẩy



Hình 10. Kết quả mô phỏng vận tốc xe đẩy

4.2. Đáp ứng của bộ điều khiển mờ trong trường hợp hệ thống bị nhiễu tác động

Sau khi hệ thống ổn định, tức là thanh lắc hướng thẳng đứng lên phía trên và xe đẩy ở vị trí 0 mét, tại giây thứ 15 tiến hành tác động một nhiễu vào xe đẩy. Nhiễu này với độ lớn lần lượt là 2 (N), 5 (N), 8 (N) xảy ra trong thời gian rất ngắn. Nhiễu tác động này làm cho thanh lắc lệch ra khỏi vị trí cân bằng. Khi đó bộ điều khiển phải có nhiệm vụ giữ cho thanh lắc luôn thẳng bằng không được rơi xuống phía dưới và phải đưa xe đẩy về vị trí 0 (m).

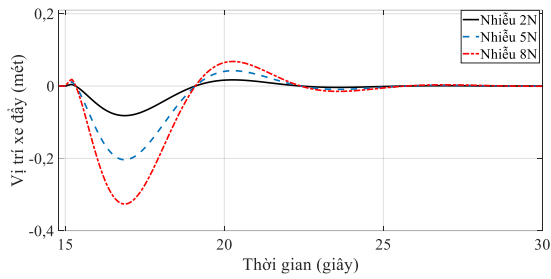


Hình 11. Nhiễu tác động vào hệ thống

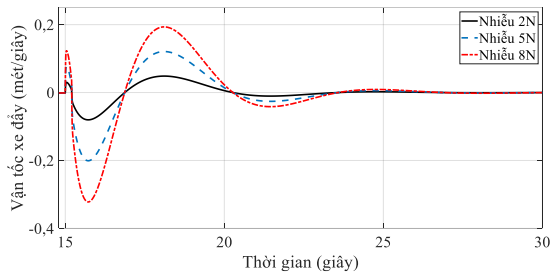
Hình 11 mô tả xung nhiễu tác động vào hệ thống. Hình 12 (a-d) mô tả kết quả mô phỏng đáp ứng của hệ thống dùng bộ điều khiển fuzzy khi có nhiễu tác động. Dựa vào kết quả, có thể thấy rằng, thanh lắc lệch ra khỏi vị trí cân bằng với biên độ lớn nhất là 0,1 (rad) tương ứng với nhiễu tác động là 8 (N). Khi đó bộ điều khiển sẽ điều khiển xe đẩy di chuyển để giữ được thẳng bằng thanh lắc ở vị trí 0 (rad) và đưa xe đẩy về vị trí 0 (m). Hành trình xe đẩy di chuyển lớn nhất là 0,4 (m). Hành trình này vẫn còn nằm trong vùng giới hạn cho phép. Thêm vào đó, có thể thấy rằng các giao điểm của đồ thị so với trục $y = 0$ là trùng nhau do bản chất của hệ thống là như nhau khi có nhiễu tác động. Như vậy, thời gian đáp ứng của hệ thống là giống nhau trong trường hợp có nhiễu.

4.3. Đáp ứng của bộ điều khiển mờ trong trường hợp thông số đầu vào của hệ thay đổi

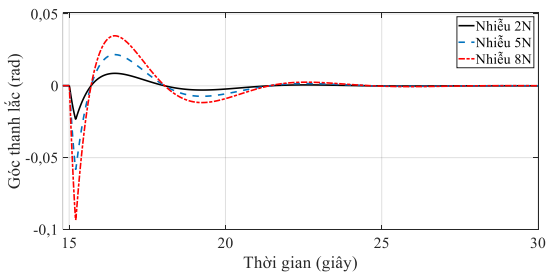
Hình 13 (a-d) thể hiện kết quả mô phỏng hệ thống dùng bộ điều khiển mờ khi thông số đầu vào của hệ thống là thay đổi. Đường nét liền (màu đen) là kết quả của hệ thống khi thông số đầu vào khối lượng thanh lắc m thay đổi. Đường nét đứt (màu đỏ) là kết quả của hệ thống khi thông số đầu vào l thay đổi. Từ kết quả có thể thấy rằng bộ điều khiển có thể đáp ứng được hệ thống khi thông số đầu vào của hệ thống thay đổi nhỏ (10%). Bên cạnh việc cải thiện được thời gian đáp ứng của thanh lắc, quãng đường di chuyển của xe đẩy trong trường hợp l thay đổi dao động từ $-0,4 (m) \div 0,7 (m)$. Cho nên, quá trình thực tế sẽ làm tổng hành trình xe đẩy khoảng 1,2 (m), điều này là chấp nhận được cho hệ con lắc ngược.



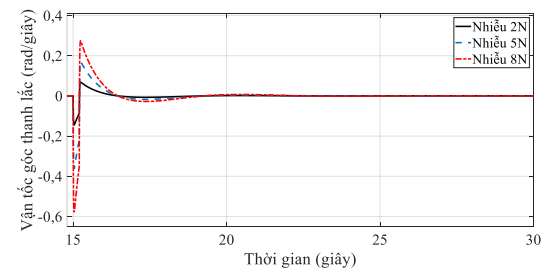
a. Vị trí xe đẩy



b. Vận tốc xe đẩy

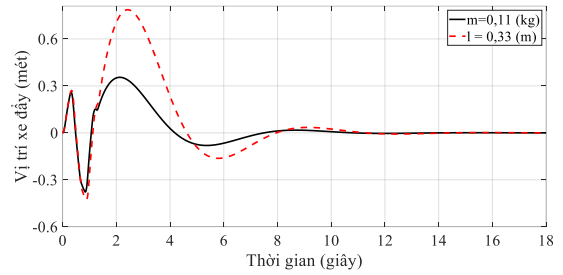


c. Góc thanh lắc

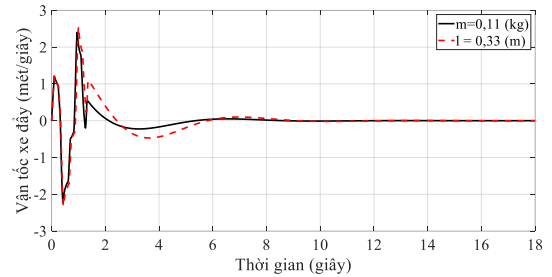


d. Vận tốc góc thanh lắc

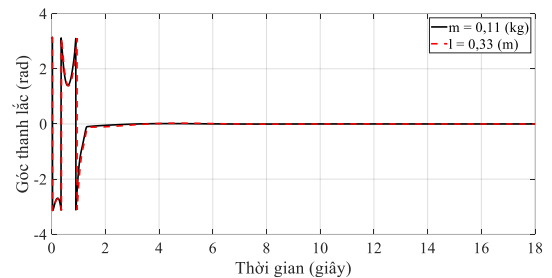
Hình 12(a-d). Kết quả mô phỏng góc thanh lắc khi hệ thống bị nhiễu tác động



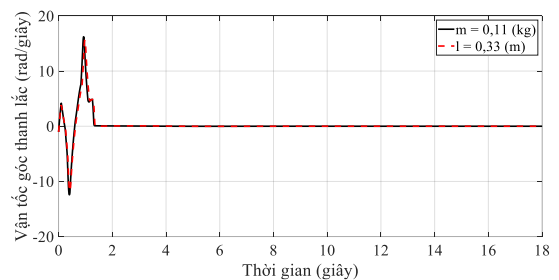
a. Vị trí xe đẩy



b. Vận tốc xe đẩy



c. Góc thanh lắc



d. Vận tốc góc thanh lắc

Hình 13(a-d). Kết quả mô phỏng hệ thống khi thông số đầu vào thay đổi

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã mô tả hai phương pháp điều khiển cân bằng khác nhau đối với hệ thống con lắc ngược kiểu trượt. Cấu trúc và các bước thực hiện phương pháp cân bằng truyền thống bao gồm phương pháp điều khiển năng lượng và cân bằng LQR, cùng với phương pháp điều khiển mờ đã được thiết lập. Trong đó, phương pháp điều khiển mờ được đề xuất đã tận dụng hiện tượng cộng hưởng dao động nhằm làm tăng tốc độ cân bằng và thời gian đáp ứng hệ thống.

Kết quả mô phỏng đã cho thấy, các phương pháp điều khiển được giới thiệu đều có thể đáp ứng được tính phi tuyến của mô hình hệ thống con lắc ngược. Tuy nhiên, phương pháp điều khiển mờ đã cải thiện được thời gian đáp ứng trong quá trình dựng ngược và cân bằng thanh lắc tốt

hơn so với phương pháp truyền thống; 2 giây so với 7 giây. Ngoài ra, việc dựng ngược và ổn định cân bằng nhanh thanh lắc cũng kéo theo hành trình xe đẩy phải lớn hơn so với phương pháp truyền thống nhưng không đáng kể. Ngoài ra, khi có sự tác động của nhiễu hay có sự biến đổi của thông số đầu vào, bộ điều khiển mờ được thiết kế trong hệ thống này đã được đánh giá kịp thời với các tác động này. Các kết quả trên là tiền đề để thực hiện mô hình thực nghiệm trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M.K. Shukla, et al., "Control and synchronization of a fractional order hyperchaotic system via backstepping and active backstepping approach", *Mathematical Techniques of Fractional Order Systems*. Elsevier, 2018, pp. 559-595.
- [2] H.N. Le, et al., "System identifications of a 2DOF pendulum

- controlled by QUBE-servo and its unwanted oscillation factors", *Archive of Mechanical Engineering* 2020, pp. 435-450.
- [3] J. Iqbal, et al., "Nonlinear control systems-A brief overview of historical and recent advances", *Nonlinear Engineering*, 6(4), 2017, pp. 301-312.
- [4] A.D. Pham, H.J. Ahn, "Evaluation of Input Shaping Methods for the Nonlinear Vibration System Using a Furuta Pendulum", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(11), 2020, pp. 827-833.
- [5] O. Boubaker, "The inverted pendulum benchmark in nonlinear control theory: a survey", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(5), 2013, 233.
- [6] L. B. Prasad, B. Tyagi and H. O. Gupta, "Modelling and Simulation for Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System Using PID Controller and LQR", *2012 Sixth Asia Modelling Symposium*, 2012, pp. 138-143.
- [7] K.J. Åström, K. Furuta, "Swinging up a pendulum by energy control", *Automatica*, 36(2), 2000, pp. 287-295.
- [8] D. Chatterjee, et.al., "Swing-up and stabilization of a cart-pendulum system under restricted cart track length", *Systems & control letters*, 47(4), 2002, pp. 355-364.
- [9] T. Yamakawa, "Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system", *Fuzzy sets and Systems*, 32(2), 1989, pp. 161-180.
- [10] C. W. Anderson, "Learning to control an inverted pendulum using neural networks", in *IEEE Control Systems Magazine*, 9(3), 1989, pp. 31-37.
- [11] V. Williams and K. Matsuoka, "Learning to balance the inverted pendulum using neural networks", *1991 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 1991, pp. 214-219.
- [12] M.I. El-Hawwary, et.al., "Adaptive fuzzy control of the inverted pendulum problem", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(6), 2006, pp. 1135-1144.
- [13] N. Muskinja, B. Tovornik. "Swinging up and stabilization of a real inverted pendulum", *IEEE transactions on industrial electronics*, 53(2), 2006, pp. 631-639.
- [14] E. Susanto, et.al., "Fuzzy swing up control and optimal state feedback stabilization for self-erecting inverted pendulum", *IEEE Access*, 8 2020, pp. 6496-6504.
- [15] M. I. H. Nour, J. Ooi and K. Y. Chan, "Fuzzy logic control vs. conventional PID control of an inverted pendulum robot", *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, 2007, pp. 209-214.
- [16] A.n.K. Nasir, M.A. Ahmad, M.F. Rahmat, "Performance comparison between LQR and PID controllers for an inverted pendulum system", *AIP conference proceedings*, 1052(1), 2008.
- [17] W. Li, H. Ding and K. Cheng, "An investigation on the design and performance assessment of double-PID and LQR controllers for the inverted pendulum", *Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control*, 2012, pp. 190-196.
- [18] V. D. H. Nguyen, et.al., "Identifying parameters for cart and pole system", *Journal of Technical Education Science – HCM City University of Technology and Education*, 36, pp. 12–17.
- [19] Cao Xuân Cường, Trần Đình Khôi Quốc, "Điều khiển Mô hình Con lắc ngược sử dụng bộ điều khiển LQR với Hai vòng phản hồi", *Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Số 5(126), 2018, quyển 1, tr 16-20.
- [20] Thái Bá Hòa, Tôn Nữ Huyền Trang, Phạm Anh Đức, Lê Hoài Nam, "Phân tích thực nghiệm quá trình tự cân bằng LQR của hệ thống con lắc ngược hệ trượt điều khiển bởi vi xử lý C2000", *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Số 20(7), 2022, tr. 25-28.
- [21] Phạm Anh Đức, Trần Quang Khải, Đỗ Lê Hưng Toàn, Tôn Nữ Huyền Trang, "Động lực học Và các đặc tính Dao động của hệ Con lắc Furuta". *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Số 18(5), 2020, quyển 1, tr 29-32.
- [22] A. Bradshaw, S. Jindi, "Swing-up control of inverted pendulum systems", *Robotica* 14(4), 1996, pp. 397-405.
- [23] Chen Wei Ji, Fang Lei and Lei Kam Kin, "Fuzzy logic controller for an inverted pendulum system," 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems (Cat. No.97TH8335), 1997, pp. 185-189.
- [24] Nguyễn Văn Khanh, et al, "Điều khiển cân bằng con lắc ngược sử dụng bộ điều khiển cuộn chiều", *Tạp chí khoa học trường Đại học Cần Thơ*, 2014, tr 18-25.
- [25] Karl Johan Astrom, Richard M. Murray, "Feedback System: An Introduction for Scientists and Engineers", Princeton University Press, 2008.