

SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI ĐỂ LẬT VÀ ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH CON LẮC NGƯỢC BÁNH XE QUÁN TÍNH

USING THE ADAPTIVE SLIDE MODE CONTROL TO SWING UP AND STABILIZE INERTIAL WHEEL PENDULUM

Nguyễn Đức Chí Tâm¹, Đoàn Quang Vinh²

¹Công ty TNHH MTV Lọc Hóa Dầu Bình Sơn, tỉnh Quảng Ngãi; tamndc@gmail.com

²Đại học Đà Nẵng; dqvinh@ac.udn.vn

Tóm tắt - Con lắc ngược bánh xe quán tính là một mô hình điều khiển hay và có nhiều ứng dụng trong thực tế. Nhiều đề tài đã nghiên cứu về việc ổn định các biến trạng thái của con lắc. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt thích nghi giải quyết việc lật và ổn định con lắc ngược bánh xe quán tính. Việc ổn định bao gồm ổn định cả vị trí, vận tốc. Luật điều khiển được thiết kế để áp dụng hội tụ tất cả các biến trạng thái khi thông số của mô hình thay đổi lớn. Cuối cùng, để chứng minh sự hiệu quả của bộ điều khiển, các kết quả được mô phỏng trong điều kiện lý tưởng (không nhiễu), có nhiễu ngẫu nhiên, và thông số hệ thống thay đổi trong quá trình hoạt động dưới tác động của nhiễu.

Từ khóa - con lắc ngược bánh xe quán tính; ổn định; thông số thay đổi; điều khiển trượt; thích nghi.

1. Đặt vấn đề

Hệ thống có số đầu vào điều khiển ít hơn số bậc tự do của hệ được gọi là một hệ dưới tác động [1]. Bài toán điều khiển hệ thống dưới tác động là một chủ đề nghiên cứu được quan tâm nhiều bởi các nhà nghiên cứu (đặc biệt trong lĩnh vực robot, phương tiện di chuyển dưới nước, phương tiện hàng không...). Một ví dụ về hệ thống dưới tác động đó là xe-con lắc ngược. Nhiều ví dụ khác của hệ thống dưới tác động như cơ cấu robot dưới tác động, robot gymnast, cơ cấu trong bộ phận cất, hạ cánh của máy bay [2], con lắc bánh xe quán tính [3].

Các bộ điều khiển để điều khiển con lắc ngược bánh xe quán tính như bộ điều khiển mô men [4], bộ điều khiển tạo chu kỳ giới hạn cho con lắc [5], sử dụng hàm bão hòa [6], bộ điều khiển trượt thích nghi hai bậc tự do sử dụng hai rơ le để dao động tự kích thích [7] đã được nghiên cứu để ổn định con lắc ngược ở vị trí thẳng đứng, điều khiển con lắc ngược bánh xe quán tính bằng bộ điều khiển fuzzy thích nghi trên cơ sở điều khiển bám mặt phẳng quỹ đạo [14].

SMC (Slide mode control) là một bộ điều khiển bền vững với các các thông số hệ thống biết chắc và chịu tác động của nhiễu ngoài. Bộ điều khiển này cũng được nghiên cứu để điều khiển cho hệ thống dưới tác động trong [9], [10], [11], [13].

Trong [11], một bộ điều khiển SMC bậc 2 được phát triển để giải quyết vấn đề điều khiển bám cho một con lắc bánh xe quán tính. Các chuyển động khảo sát của con lắc là ở vị trí lên ở xung quanh điểm mất ổn định.

Trong [13], bộ điều khiển trượt thích nghi bậc 2 cũng được sử dụng để ổn định tổng thể con lắc ngược bánh xe quán tính trong điều kiện không nhiễu, thông số thay đổi.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển ổn định tổng thể cho con lắc bánh xe

Abstract - Inertial wheel pendulum is an interesting model of control and has many applications in practice. Many papers have discussed its stabilization of state variables. In this paper, the Adaptive Slide Mode Controller is proposed to solve the swing up and stabilization control problem of inertial wheel pendulum (IWP). The stabilization includes stabilizing angular position and velocity of the inertial wheel pendulum. The control law is designed to converge all the state variables of the inertial wheel pendulum when the model parameters vary greatly. The simulation results clearly reveal that the performance of the controller is good even in the presence of disturbance and when parameters vary with time.

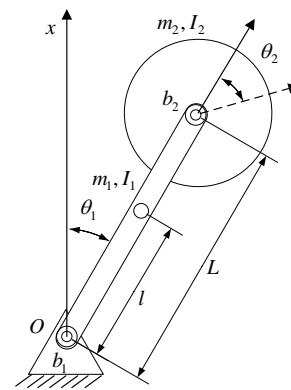
Key words - inertial wheel pendulum; stability; parameter variation; slide mode control; adaptive.

quán tính. Không chỉ hội tụ các trạng thái của con lắc, mà còn hội tụ được trạng thái của bánh xe quán tính về vị trí không trong điều kiện không nhiễu, có nhiễu và thông số hệ thống thay đổi trong quá trình điều khiển dưới tác động của nhiễu.

2. Kết quả nghiên cứu

2.1. Mô hình hóa con lắc ngược bánh xe quán tính

Ta sử dụng mô hình con lắc ngược bánh xe quán tính như Hình 1 để thiết lập các phương trình động lực học:



Hình 1. Mô hình con lắc ngược bánh xe quán tính

Hệ phương trình của hệ thống được thiết lập có dạng như sau:

$$\begin{cases} (m_{11} + m_{22})\ddot{q}_1 + m_{22}\ddot{q}_2 - m_3 \sin q_1 = 0 \\ m_{22}\ddot{q}_1 + m_{22}\ddot{q}_2 = u \end{cases} \quad (1)$$

Đây là hệ phương trình vi phân cấp 2. Trong đó:

$$m_{11} = I_1 + m_1 l^2 + m_2 L^2; m_{22} = I_2; m_3 = m_1 l + m_2 L$$

Với: m_1, m_2 là khối lượng của con lắc và bánh xe quán tính

l là khoảng cách giữa trọng tâm con lắc với tâm quay gắn với giá cố định.

L là chiều dài của con lắc.

I_1, I_2 lần lượt là mô men quán tính của con lắc và bánh xe quán tính so với tâm quay của các khâu.

u là mô men đặt vào động cơ để làm quay bánh xe quán tính.

q_1, q_2 tương ứng là vị trí góc của thân con lắc so với phương thẳng đứng và của bánh xe quán tính so với thân con lắc. Tương tự, dq_1, dq_2 là vận tốc góc của các khâu.

Nhìn vào hệ thống (1), ta nhận thấy đây là hệ thống mà có số tín hiệu điều khiển nhỏ hơn số biến điều khiển. Hệ thống này được gọi là hệ dưới tác động. Tức là hệ thống có số bậc tự do nhiều hơn số tín hiệu điều khiển. Hệ thống (1) là hệ thống phi tuyến dưới tác động. Để điều khiển hệ thống này, các bộ điều khiển phức tạp hơn nhiều và hệ thống cũng rất dễ bị mất ổn định do nhiễu hoặc sự thay đổi của các thông số phần cứng của hệ.

Do góc lệch khỏi vị trí cân bằng nhỏ ($< 10^0$), do đó $\sin q_1 \approx q_1$. Vì vậy phương trình (1) trở thành:

$$\begin{cases} (m_{11} + m_{22})\ddot{q}_1 + m_{22}\ddot{q}_2 - m_3q_1 = 0 \\ m_{22}\ddot{q}_1 + m_{22}\ddot{q}_2 = u \end{cases} \quad (2)$$

Ta có hàm truyền của đối tượng điều khiển:

$$G(s) = \frac{1}{(m_3 - m_1s^2)} \quad (3)$$

Với hệ thống này, rõ ràng ta thấy đối tượng sẽ không ổn định (đa thức đặc trưng có hai hệ số khác dấu), tức nếu không sử dụng bộ điều khiển, hệ thống sẽ không ổn định. Do vậy, ta sẽ tiến hành thiết kế bộ điều khiển ổn định cho hệ thống.

2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi điều khiển lát và ổn định con lắc ngược bánh xe quán tính

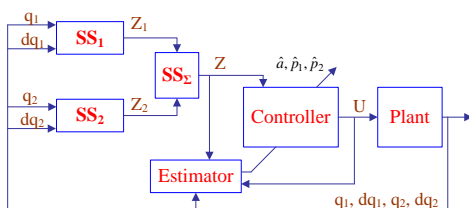
Trong phần này, ta tiến hành nghiên cứu bộ điều khiển để lật đứng thanh quán tính, đồng thời ổn định vị trí thanh quán tính và bánh xe quán tính.

Hệ thống (1) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a \sin x_1 - b_1u \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -a \sin x_1 + b_2u \end{cases} \quad (4)$$

Phương trình (4) có thể tách thành 2 hệ thống con. Chúng ta sẽ thiết kế bộ điều khiển theo cấu trúc điều khiển song song hai hệ thống con này để ép các biến trạng thái hội tụ về giá trị không.

Cấu trúc của một hệ thống đề nghị được mô tả trong hình dưới đây.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển IPW

Chúng ta chọn các mặt trượt như sau:

$$z_1 = c_1x_1 + x_2 \quad (5)$$

$$z_2 = c_2x_3 + x_4 \quad (6)$$

Trong đó: C_1, C_2 là các hằng số dương.

Khi $z_1 = 0$, các trị riêng của (5) là $-1/c_1$, vì vậy x_1, x_2 là ổn định tiệm cận về không. Tương tự, x_3, x_4 cũng sẽ hội tụ về không khi $z_2 = 0$.

Vi phân của z_1, z_2 trong phương trình (5) và (6) được viết như sau:

$$\dot{z}_1 = c_1x_2 + a \sin x_1 - b_1u \quad (7)$$

$$\dot{z}_2 = c_2x_4 - a \sin x_1 + b_2u \quad (8)$$

Mặt trượt tổng hợp được chọn như sau:

$$z = \lambda z_1 + z_2 \quad (9)$$

Trong đó λ là một hằng số dương.

Vi phân của z theo (7) và (8) được viết như sau:

$$\begin{aligned} \dot{z} = \lambda \dot{z}_1 + \dot{z}_2 = \lambda (c_1x_2 + a \sin x_1 - b_1u) \\ + c_2x_4 - a \sin x_1 + b_2u \end{aligned} \quad (10)$$

Nếu các thông số của mô hình điều khiển là biết trước, hàm Lyapunov V được chọn như sau:

$$V = \frac{1}{2}z^2 \quad (11)$$

Luật điều khiển được chọn như sau:

$$u = \frac{kz + \lambda c_1x_2 + c_2x_4 + (\lambda - 1)a \sin x_1}{\lambda b_1 - b_2} \quad (12)$$

Thay (12) vào (10) chúng ta có được:

$$\Rightarrow \dot{V} = z\dot{z} = -kz^2 \leq 0 \quad (13)$$

Rõ ràng, hệ thống (13) là ổn định, biến trạng thái z hội tụ đến không, do đó z_1, z_2 cũng hội tụ đến không.

Trong trường hợp các thông số của mô hình điều khiển là không đo được chính xác, hàm Lyapunov được chọn để không những làm hội tụ các sai số hệ thống, mà còn phải ước lượng được các thông số của mô hình điều khiển. Chúng ta chọn như sau:

$$V = \frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{2\gamma_a}\tilde{a}^2 + \frac{|b_1|}{2\gamma_{b1}}\tilde{p}_1^2 + \frac{|b_2|}{2\gamma_{b2}}\tilde{p}_2^2 \quad (14)$$

Trong đó $\gamma_a, \gamma_{b1}, \gamma_{b2}$ là các hằng số dương, $\tilde{a} = a - \hat{a}$, \hat{a} là ước lượng của a , $b_i = \frac{1}{p_i}$, $\tilde{p}_i = p_i - \hat{p}_i$, \hat{p}_i là các ước lượng của $p_i, (i = \{1; 2\})$.

$$\text{Chú ý rằng: } b_iu = b_i\hat{p}_i\bar{u} = \bar{u} - b_i\tilde{p}_i\bar{u} \quad (15)$$

Kết hợp phương trình (4) và (15), ta viết lại phương trình hệ thống như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a \sin x_1 - b_1\bar{u}\hat{p}_1 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = a \sin x_1 + b_2\bar{u}\hat{p}_2 \end{cases} \quad (16)$$

Vị phân của V được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= z\dot{z} + \frac{1}{\gamma_a} \ddot{a}\dot{a} + \frac{|b_1|}{\gamma_{b1}} \dot{p}_1 \dot{p}_1 + \frac{|b_2|}{\gamma_{b2}} \dot{p}_2 \dot{p}_2 \\ &= z \left[\lambda c_1 x_2 + c_2 x_4 + \hat{a} \lambda \sin x_1 - \hat{a} \sin x_1 + (1-\lambda)\bar{u} \right] \\ &\quad + \ddot{a} \left((\lambda-1)z \sin x_1 - \frac{1}{\gamma_a} \dot{a} \right) + b_1 \dot{p}_1 \left(\lambda z \bar{u} - \frac{1}{\gamma_{b1} \text{sign}(b_1)} \dot{p}_1 \right) \\ &\quad - b_2 \dot{p}_2 \left(z \bar{u} + \frac{1}{\gamma_{b2} \text{sign}(b_2)} \dot{p}_2 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Để $\dot{V} \leq 0$, luật điều khiển và các luật cập nhật thông số được chọn như sau:

$$\bar{u} = \frac{kz + \lambda c_1 x_2 + c_2 x_4 + (\lambda-1)\hat{a} \sin x_1}{\lambda-1} \quad (18)$$

$$\dot{\hat{a}} = \gamma_a z (\lambda-1) \sin x_1 \quad (19)$$

$$\dot{\hat{p}}_1 = \lambda \gamma_{b1} z \bar{u} \text{sign}(b_1) \quad (20)$$

$$\dot{\hat{p}}_2 = -\gamma_{b2} z \bar{u} \text{sign}(b_2) \quad (21)$$

Khi hệ thống có các thông số là không biết trước, với các bộ điều khiển có phản hồi sử dụng các phương pháp ước lượng thông số thường bị hiện tượng trôi các thông số này. Do đó làm cho hệ thống khó ổn định được trong thời gian dài. Vì vậy việc bổ sung thêm các bộ hiệu chỉnh là cần thiết để duy trì ổn định của hệ thống. Do đó chúng tôi sử dụng một hàm chuyển mạch như [12] trong luật thích nghi để hỗ trợ làm giảm bớt hiện tượng trên. Luật thích nghi hiệu chỉnh được viết như sau:

$$\delta_{as} = \begin{cases} 0 & \text{if } |\hat{a}| < M_{a0} \\ \delta_{a0} \left(\frac{|\hat{a}|}{M_{a0}} - 1 \right) & \text{if } M_{a0} \leq |\hat{a}| < 2M_{a0} \\ \delta_{a0} & \text{if } |\hat{a}| > 2M_{a0} \end{cases} \quad (22)$$

$$\delta_{p1s} = \begin{cases} 0 & \text{if } |\hat{p}_1| < M_{p10} \\ \delta_{p10} \left(\frac{|\hat{p}_1|}{M_{p10}} - 1 \right) & \text{if } M_{p10} \leq |\hat{p}_1| < 2M_{p10} \\ \delta_{p10} & \text{if } |\hat{p}_1| > 2M_{p10} \end{cases} \quad (23)$$

$$\delta_{p2s} = \begin{cases} 0 & \text{if } |\hat{p}_2| < M_{p20} \\ \delta_{p20} \left(\frac{|\hat{p}_2|}{M_{p20}} - 1 \right) & \text{if } M_{p20} \leq |\hat{p}_2| < 2M_{p20} \\ \delta_{p20} & \text{if } |\hat{p}_2| > 2M_{p20} \end{cases} \quad (24)$$

Trong đó: $M_{a0} > 0, M_{p10} > 0, M_{p20} > 0, \delta_{a0} > 0, \delta_{p10} > 0, \delta_{p20} > 0$ là các hằng số được định nghĩa trong bộ điều chỉnh δ . Các tham số này được chọn đủ lớn để: $M_{a0} > |\hat{a}|, M_{p10} > |\hat{p}_1|, M_{p20} > |\hat{p}_2|$.

Cũng theo [12], với các lựa chọn trên $\delta_{as}, \delta_{p1s}, \delta_{p2s}$ vẫn đảm bảo lời giải của bài toán và vấn đề ổn định của hệ thống không bị ảnh hưởng.

Luật cập nhật thông số mới của hệ thống được viết lại như sau:

$$\dot{\hat{a}} = \gamma_a z (\lambda-1) \sin x_1 - \gamma_a \delta_{as} \hat{a} \quad (25)$$

$$\dot{\hat{p}}_1 = \lambda \gamma_{b1} z \bar{u} \text{sign}(b_1) - \gamma_{b1} \delta_{p1s} \hat{p}_1 \quad (26)$$

$$\dot{\hat{p}}_2 = -\gamma_{b2} z \bar{u} \text{sign}(b_2) + \gamma_{b2} \delta_{p2s} \hat{p}_2 \quad (27)$$

Kết quả điều khiển:

Các thông số của mô hình điều khiển được chọn trước như sau: $L = 0.2 \text{ m}; l = 0.1 \text{ m}; m_1 = 2 \text{ Kg}; m_2 = 0.8 \text{ Kg}; I_1 = 0.008 \text{ Kgm}^2; I_2 = 0.05 \text{ Kgm}^2$. Giá trị ban đầu của bộ ước lượng được chọn như sau: $\hat{a}(0) = 1, \hat{b}_1(0) = 1, \hat{b}_2(0) = 1$. Giá trị ban đầu của các biến trạng thái: $q_1(0) = \pi/3 \text{ (rad)}, q_2(0) = -\pi/2 \text{ (rad)}, \dot{q}_1 = \pi/12 \text{ (rad/s)}, \dot{q}_2 = \pi/6 \text{ (rad/s)}$. Các thông số của bộ điều khiển được chọn như sau: $c_1 = c_2 = 0.1, \gamma_a = 1, \gamma_{1b} = 1, \gamma_{2b} = 1, \lambda = 0.5$. Các thông số của bộ hiệu chỉnh δ được chọn như sau: $\delta_{a0} = \delta_{p10} = \delta_{p20} = 1, M_{a0} = 60, M_{p10} = 10, M_{p20} = 10$.

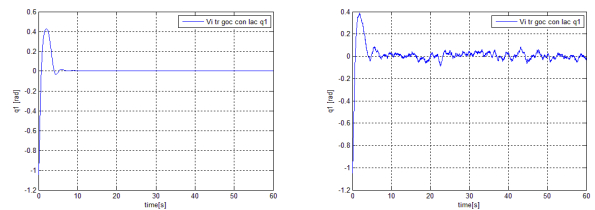
Con lắc ngược bánh xe quán tính trong quá trình hoạt động chịu sự tác động của nhiễu. Nhiễu có thể là nhiễu do môi trường bên ngoài (tác động lực vào con lắc, bánh xe) hoặc nhiễu do sự bỏ qua các yếu tố nội tại của đối tượng điều khiển khi thành lập mô hình toán học (sự không đồng nhất của thanh quán tính, bánh xe; ma sát giữa trục quay và bánh xe)... Do đó, ta kiểm tra kết quả hoạt động của bộ điều khiển lật và ổn định con lắc ngược bánh xe quán tính trong trường hợp không nhiễu và trong trường hợp có nhiễu ngẫu nhiên tác động (tất cả các dạng nhiễu đều sẽ tác động trực tiếp đến vận tốc góc của thanh quán tính, do đó để đơn giản ta quy đổi về đơn vị vận tốc góc với biên độ nhiễu nằm trong khoảng $[-0.5; 0.5] \text{ (rad/s)}$.

3. Kết luận

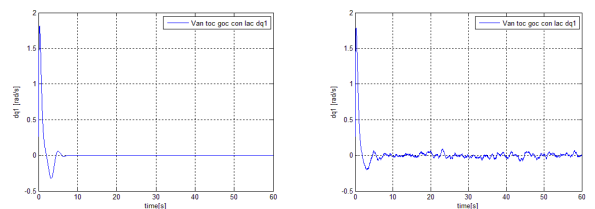
Trong Hình 3 và 4, các sai số hội tụ về giá trị không nhanh, chỉ khoảng 10s. Nhưng góc và vận tốc góc của bánh xe quán tính thì hội tụ chậm hơn khoảng hơn 50s trong các Hình 5 và 6. Trong các Hình từ 9 đến 11, các mặt trượt cũng hội tụ nhanh về giá trị không.

Trường hợp không nhiễu

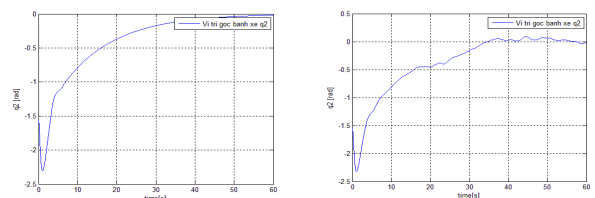
Trường hợp có nhiễu



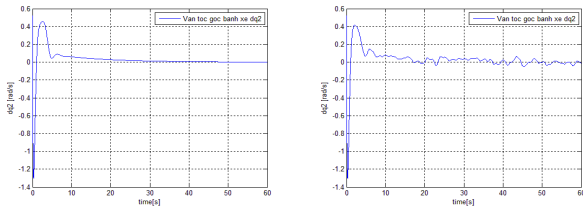
Hình 3. Vị trí góc con lắc



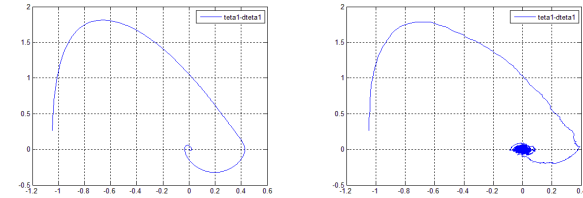
Hình 4. Vận tốc góc con lắc



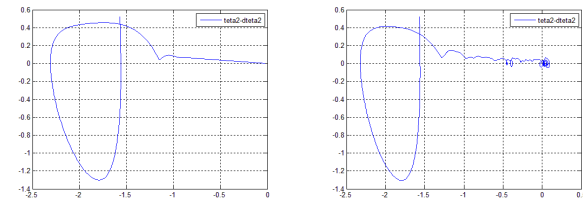
Hình 5. Vị trí góc bánh xe quán tính



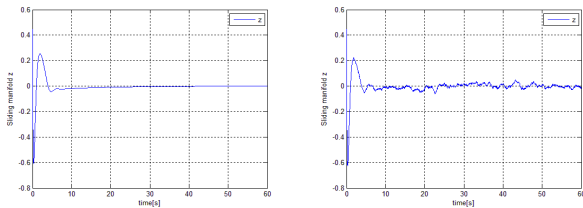
Hình 6. Vận tốc góc bánh xe quán tính



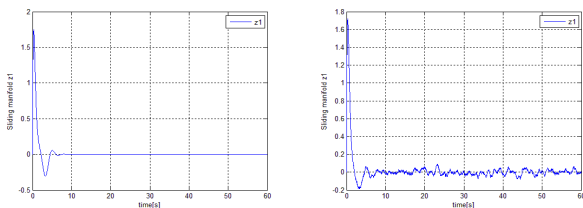
Hình 7. Biểu đồ pha vị trí góc – vận tốc góc của con lắc



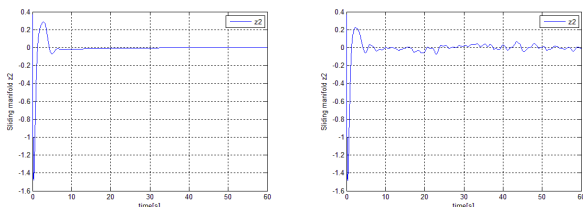
Hình 8. Biểu đồ pha vị trí góc – vận tốc góc của bánh xe quán tính



Hình 9. Mặt trượt z



Hình 10. Mặt trượt z_1

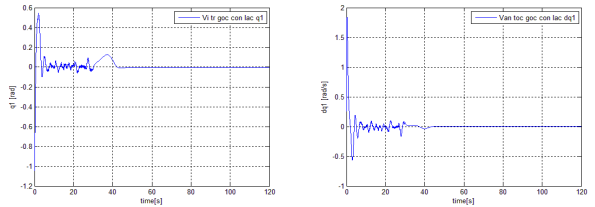


Hình 11. Mặt trượt z_2

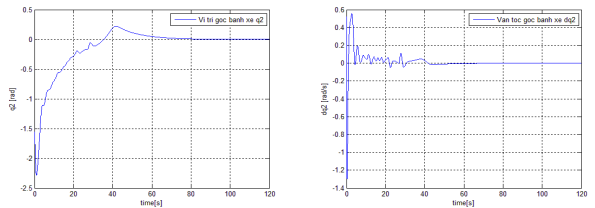
Các đáp ứng q_1 và q_2 vẫn ổn định mặc dù có nhiễu ngoài tác động.

Để kiểm tra ảnh hưởng của sự thay đổi thông số của mô hình điều khiển như: khối lượng, mô men quán tính và trọng tâm con lắc, ta sẽ thay đổi khối lượng của con lắc bằng cách

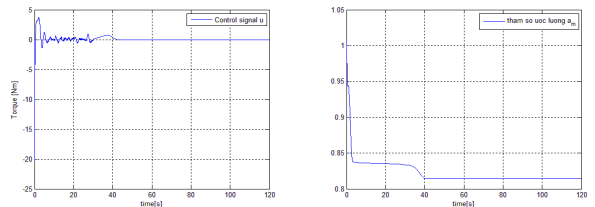
thêm tải trọng trên thân con lắc. Khi đó khối lượng, mô men quán tính và trọng tâm của con lắc sẽ thay đổi theo. Giả thiết rằng, khối lượng của tải trọng được thêm vào tăng thêm 35%, trọng tâm của con lắc được đưa lên cao hơn trọng tâm cũ 40mm. Thời gian bắt đầu của sự thay đổi này là sau 35s. Các Hình từ 12 đến 17 thể hiện các đáp ứng của hệ thống.



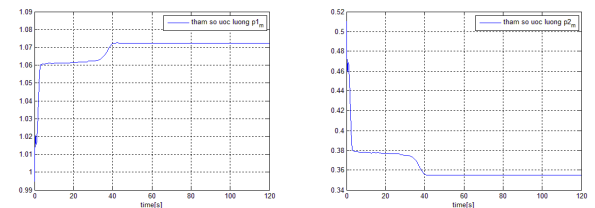
Hình 12. Vị trí góc và vận tốc góc con lắc



Hình 13. Vị trí góc và vận tốc góc bánh xe quán tính



Hình 14. Tín hiệu điều khiển **Hình 15.** Tham số ước lượng a_m



Hình 16. Tham số ước lượng p_{1m} **Hình 17.** Tham số ước lượng p_{2m}

Ta thấy rằng dưới sự thay đổi của các tham số hệ thống, các đáp ứng của hệ vẫn ổn định mặc dù bị dao động.

Từ Hình 15 đến 17 là các đáp ứng của các thông số ước lượng tương ứng với sự thay đổi của các thông số hệ thống. Các giá trị ước lượng này cũng bị thay đổi theo các thông số hệ thống và ổn định dần về các hằng số.

Đối chiếu với một số kết quả nghiên cứu trước, ta có nhận xét như sau (xét đến chỉ tiêu thời gian quá độ và sự dao động của vị trí góc thanh quán tính, sau đó mới tính đến vận tốc góc của thanh quán tính và bánh xe quán tính):

So với kết quả nghiên cứu trong [5] (sử dụng các hàm bão hòa lồng nhau để điều khiển ổn định hệ thống), thời gian đáp ứng của bộ điều khiển trượt thích nghi nhanh hơn (khoảng 5s so với gần 30s), vận tốc góc của con lắc và bánh xe quán tính cũng ổn định hơn.

So với kết quả nghiên cứu trong [8] khi sử dụng các

thuật toán tối ưu để tìm các tham số điều khiển cho bộ điều khiển PID, ta thấy rằng q_1 được nghiên cứu trong [8] có thời gian đáp ứng tốt hơn bộ điều khiển trượt trong trường hợp không nhiễu (khoảng 4s so với gần 5s), tuy nhiên trong trường hợp có nhiễu và có sự thay đổi tham số hệ thống, các đáp ứng trong [8] bị dao động với biên độ khoảng 0.5rad và xảy ra trong suốt quá trình điều khiển, trong khi với bộ điều khiển trượt thì sự dao động chỉ diễn ra trong thời gian đầu và với biên độ 0.1rad và sau đó thì hoàn toàn không dao động. Ưu điểm này là sự vượt trội của bộ thích nghi được tích hợp với bộ điều khiển trượt.

Trong [13] cũng sử dụng bộ điều khiển trượt thích nghi để điều khiển con lắc bánh xe quán tính, tuy nhiên việc nghiên cứu chỉ mới dừng lại trong việc thiết kế bộ điều khiển trong trường hợp điều khiển không nhiễu. Đáp ứng của hệ thống trong trường hợp này tương đương với kết quả chúng tôi đã nghiên cứu. Mặc khác, bộ điều khiển trượt thích nghi được trình bày trong bài báo này không chỉ ổn định tổng thể trong trường hợp lý tưởng (không nhiễu), mà còn ổn định tổng thể các biến trạng thái trong điều kiện có nhiễu và thông số con lắc thay đổi trong quá trình hoạt động (vẫn trong trường hợp có nhiễu xảy ra trong quá trình điều khiển).

Qua một số kết quả so sánh, ta có thể thấy bộ điều khiển trượt thích nghi là một sự đề nghị tốt để điều khiển con lắc ngược bánh xe quán tính trong trường hợp có nhiễu và trong trường hợp thông số hệ thống thay đổi.

Con lắc ngược bánh xe quán tính là một mô hình điều khiển khá thú vị, có nhiều ứng dụng trong cuộc sống. Trong giới hạn bài báo này, chúng tôi vẫn chưa giải quyết được hết các bài toán đặt ra đối với đối tượng điều khiển này, do đó các hướng phát triển tiếp theo có thể là:

- Nghiên cứu kỹ hơn về mô hình toán học của con lắc ngược bánh xe quán tính. Khi thành lập mô hình toán học, cần thêm vào các thông số như lực ma sát với môi trường, sự không đồng nhất của thanh quán tính và bánh xe quán tính...

- Nghiên cứu thiết kế để điều khiển đối tượng điều khiển này bằng các bộ điều khiển khác như PID mờ, mờ thích nghi, thích nghi cuốn chiếu hoặc kết hợp các bộ điều khiển lại với nhau.

- Nghiên cứu thực nghiệm điều khiển con lắc ngược

bánh xe quán tính để có được các số liệu thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] I. Fantoni and R. Lozano, *Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems*. Springer, New York, NY, 2001.
- [2] G. Poulain, A. Chemori and N. Marchand, *Minimum energy oriented global stabilizing control of the PVTOL aircraft*, Int. J. Control 80, 430–442, 2007.
- [3] Mark W. Spong, Peter Corke, Rogelio Lozano, *Nonlinear control of the Reaction Wheel Pendulum*, Automatica 37 (2001) 1845–1851.
- [4] Victor Santibanez, Rafael Kelly, Jesus Sandoval, *Control of the inertial wheel pendulum by bounded torques*, Proceeding of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, pp 8266–8270, Seville, Spain, December 12–15, 2005.
- [5] Sébastien Andary, Ahmed Chemori and Sébastien Krut, *Control of the Underactuated Inertia Wheel Inverted Pendulum for Stable Limit Cycle Generation*, Advanced Robotics 23, pp 1999–2014, Japan, 2009.
- [6] Rafael Iriarte, Luis T. Aguilar, Leonid Fridman, *Second order sliding mode tracking controller for inertia wheel pendulum*, Journal of the Franklin Institute, Volume 350, Issue 1, Pages 92–106, 2013.
- [7] Luis T. Aguilar, Igor Boiko, Leonid Fridman, and Leonid Freidovich, *Inducing Oscillations in an Inertia Wheel Pendulum via Two-Relays Controller: Theory and Experiments*, American Control Conference, pp 65–70, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, June 10–12, 2009.
- [8] Ricardo Martinez-Soto, Antonio Rodriguez, Oscar Castillo, and Luis T. Aguilar, *Gain optimization for inertial wheel pendulum stabilization using particle swarm optimization and genetic algorithms*, International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 8, Number 6, 2012.
- [9] Dianwei Qian, Jianqiang Yi, Dongbin Zhao, *Hierarchical sliding mode control for a class of SIMO under-actuated system*, Control and Cybernetics, vol.37, No.1, 2008.
- [10] Rong Xu, Ümit Özgüner, *Slidingmode control of a class of underactuated systems*, Automatica 44 pp233–241, 2008.
- [11] Rafael Iriarte, Luis T. Aguilar, Leonid Fridman, *Second order sliding mode tracking controller for inertia wheel pendulum*, Journal of the Franklin Institute 350, pp92–106, 2013.
- [12] P. A. Ioannou, J. Sun, *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1996).
- [13] Phạm Văn Anh, “Nghiên cứu ổn định tổng thể con lắc bánh xe quán tính trên cơ sở bộ điều khiển trượt thích nghi”, Tạp chí Khoa học công nghệ số 6, Trường ĐH Phạm Văn Đồng, pp25–29, 2015.
- [14] Ming Yue, Cong An, Yu Du, Jianzhong Sun, *Indirect adaptive fuzzy control for a onholonomic/underactuated wheeled inverted pendulum vehicle based on a data-driven trajectory planner*, Control Engineering and Applications V290, pp 158–177, 2016.

(BBT nhận bài: 07/05/2016, phản biện xong: 12/06/2016)