

PERFORMANCE EVALUATION OF THE QUASI SLIDING-BASED SLIDING MODE CONTROL IN THE MASS SPRING DAMPER SYSTEM

Pham Thanh Tung^{1*}, Nguyen Chi Ngon²

¹Vinh Long University of Technology and Education, ²Can Tho University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	20/5/2021	Sliding mode control (SMC) is an effective control method with the robust stability, quickly response even under conditions of disturbance and changing of object's parameters. However, the discontinuity of the signum function in the SMC law can cause the chattering in the control signal. Improving quality of the SMC has been interested and published by many researchers. However, the overall evaluation of the SMC's effectiveness and comparison with other modern control techniques is still limited. This paper presents testing results of the Quasi-sliding mode – based SMC and compares the effectiveness of that method with the back-stepping controller, multi-objective genetic algorithm tuned PID and traditional PID. That testing method is applied to control the position of the mass spring damper system. The simulation results in MATLAB/Simulink show that the testing method is efficient. The quality indicators achieved by the Quasi-sliding mode – based SMC are better than other control techniques. The position response of the mass spring damper system in simulation model converges to reach the reference without overshoot, the setting time is about 0.26 (s), and the steady-state error is eliminated.
Revised:	14/7/2021	
Published:	21/7/2021	
KEYWORDS		
Sliding mode control		
Chattering		
Mass spring damper		
Quasi – sliding mode		
MATLAB/Simulink		

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT QUASI TRONG ĐIỀU KHIỂN HỆ GIẢM XÓC – VẬT – Lò XO

Phạm Thanh Tùng^{1*}, Nguyễn Chí Ngôn²

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, ²Trường Đại học Cần Thơ

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	20/5/2021	Điều khiển trượt là một phương pháp điều khiển hiệu quả với khả năng đáp ứng nhanh và bền vững, ngay cả khi hệ thống bị nhiễu hoặc thông số của đối tượng thay đổi theo thời gian. Tuy nhiên, sự gián đoạn trong hàm dấu (signum) của luật trượt sẽ gây ra hiện tượng dao động với tần số cao (gọi là chattering) của tín hiệu điều khiển. Việc nghiên cứu cải thiện chất lượng bộ điều khiển trượt được nhiều nhà khoa học quan tâm, công bố. Tuy nhiên, đánh giá tổng thể hiệu quả của bộ điều khiển trượt và so sánh với một số kỹ thuật điều khiển hiện đại khác vẫn còn hạn chế. Bài báo này trình bày kết quả kiểm nghiệm kỹ thuật điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi và so sánh một số chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển này với kỹ thuật điều khiển cuốn chiếu, giải thuật di truyền đa mục tiêu điều chỉnh PID tuyến tính và điều khiển PID truyền thống. Phương pháp kiểm nghiệm được áp dụng trên mô hình hệ thống giảm xóc – vật – lò xo. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink chứng minh hiệu quả của phương pháp kiểm nghiệm. Các chỉ tiêu chất lượng đạt được của phương pháp kiểm nghiệm vượt trội hơn so với các kiểu điều khiển khác. Đáp ứng vị trí của hệ giảm xóc – vật – lò xo trong mô hình mô phỏng hội tụ về vị trí tham chiếu với thời gian xác lập khoảng 0,26 (s), sai số xác lập bị triệt tiêu và không xảy ra vọt lố.
Ngày hoàn thiện:	14/7/2021	
Ngày đăng:	21/7/2021	
TỪ KHÓA		
Điều khiển trượt		
Chattering		
Hệ giảm xóc - vật - lò xo		
Chế độ trượt Quasi		
MATLAB/Simulink		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4527>

* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

1. Giới thiệu

Điều khiển trượt là một trong các phương pháp điều khiển bền vững hệ thống [1]. Cấu trúc thay đổi của điều khiển trượt làm cho bộ điều khiển này có khả năng chuyển đổi giữa các luật điều khiển khác nhau [2]. Điều khiển trượt cung cấp sự ổn định bền vững cho các hệ thống thông qua điều khiển độ lợi cao với hoạt động chuyển mạch nhanh vô hạn. Sơ đồ điều khiển trượt thường không liên tục và ngõ vào điều khiển hồi tiếp cần chuyển mạch với tần số cao. Hoạt động chuyển mạch tốc độ cao gây ra hiện tượng dao động với tần số cao (được gọi là chattering). Hiện tượng này có thể kích thích động học bậc cao trong mô hình, dẫn đến sự bất ổn trong hệ thống [3].

Để khắc phục hiện tượng dao động với tần số cao, nhiều nghiên cứu đã được triển khai, trong đó, ứng dụng chế độ trượt Quasi đã được thiết lập. Đây là giải pháp khắc phục những hạn chế của điều khiển trượt mà vẫn giữ được những ưu điểm vốn có của nó [4]. Mặc dù, việc nghiên cứu cải thiện chất lượng bộ điều khiển trượt được nhiều nhà khoa học quan tâm, công bố. Tuy nhiên, đánh giá tổng thể hiệu quả của bộ điều khiển trượt và so sánh với một số kỹ thuật điều khiển hiện đại khác vẫn còn hạn chế. Nghiên cứu này hướng đến việc kiểm chứng kỹ thuật điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi và so sánh một số chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển này với một kỹ thuật điều khiển thông dụng khác. Giải pháp kiểm nghiệm được triển khai trên hệ thống giảm xóc – vật – lò xo. Đây là hệ thống đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo khả năng phục vụ và an toàn của mô hình trong các ứng dụng tự động hóa và cơ điện tử [5].

Gần đây, hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được nhiều nhà khoa học quan tâm và nghiên cứu, chẳng hạn như: Đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển vi phân tỷ lệ (PD: Proportional-Derivative) và bộ điều khiển bậc hai tuyến tính (LQR: Linear Quadratic Regulator) để điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo đôi được nghiên cứu trong [5]. Trong [6] đã sử dụng phương pháp điều khiển cuộn chiều (backstepping) để điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo và được so sánh với bộ điều khiển vi tích phân tỷ lệ (PID: Proportional-Derivative-Integral). Trong [7], các tác giả đã nghiên cứu sự tạo ra entropy của một hệ thống cơ khí vật - lò xo - van điều tiết, theo định nghĩa toán tử phân số phù hợp. Trong [8], [9], hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được điều khiển bởi bộ điều khiển vi tích phân tỷ lệ. Giải thuật di truyền đa mục tiêu (MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm) và giải thuật tối ưu bầy đàn thích nghi (APSO: Adaptive Particle Swarm Optimization) được sử dụng trong nghiên cứu [10] để xác định các thông số tối ưu của bộ điều khiển PID tuyến tính và phi tuyến. Sử dụng bộ điều khiển P, PI, PD và logic PID để thiết kế và so sánh hiệu quả điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được nghiên cứu trong [11].

Nội dung của bài báo này được thực hiện như sau: Thứ nhất là thiết kế bộ điều khiển trượt với luật tiếp cận lũy thừa để điều khiển bám vị trí hệ thống giảm xóc – vật – lò xo; mô phỏng kết quả điều khiển với MATLAB/SIMULINK và đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển thông qua các chỉ tiêu chất lượng. Thứ hai là ứng dụng phương pháp điều khiển trượt với chế độ trượt Quasi để khắc phục hiện tượng dao động với tần số cao quanh quỹ đạo pha của mặt trượt. Thứ ba là tiến hành so sánh hiệu quả của bộ điều khiển được ứng dụng để kiểm nghiệm trong nghiên cứu này với các phương pháp điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo đã công bố.

Bài báo được tổ chức gồm 4 phần: Giới thiệu được trình bày ở phần 1; phần 2 trình bày phương pháp điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi; điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi được trình bày trong phần 3 và phần 4 là kết luận.

2. Điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi

Xét đối tượng được mô tả bởi [12]:

$$\ddot{x}(t) = f(x, t) + bu(t) + d(t) \quad (1)$$

Trong đó: $f(x, t)$, b đã biết, $d(t)$ là nhiễu chưa biết, $d(t) \leq D$

Mặt trượt được thiết kế như sau:

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (2)$$

Với $c > 0$ phải thỏa mãn điều kiện ổn định Hurwitz.

Sai số bám và đạo hàm của sai số như (3):

$$\begin{aligned} e(t) &= x_d(t) - x_1(t) \\ \dot{e}(t) &= \dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: $x_1(t) = x(t)$, $x_d(t)$ là tín hiệu mong muốn.

Từ (2), ta thấy rằng, nếu $s(t) = 0$ thì $ce(t) + \dot{e}(t) = 0$ và chúng ta có nghiệm là $e(t) = e(0)e^{-ct}$. Nghĩa là, khi $t \rightarrow \infty$ thì $e(t) \rightarrow 0$ với giá trị của c .

Thế (3) vào (2), ta được (4):

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= c\dot{e}(t) + \ddot{e}(t) = c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + (\ddot{x}_d(t) - \ddot{x}(t)) \\ &= c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + (\ddot{x}_d(t) - f(x, t) - bu(t) - d(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

Áp dụng luật tiếp cận lũy thừa, ta có (5):

$$\dot{s}(t) = -\eta \text{sign}(s(t)) - ks(t), \quad \eta > 0, k > 0 \quad (5)$$

Từ (4) và (5), ta có (6):

$$c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + (\ddot{x}_d(t) - f(x, t) - bu(t) - d(t)) = -\eta \text{sign}(s(t)) - ks(t) \quad (6)$$

Để đảm bảo $s(t)\dot{s}(t) < 0$, bộ điều khiển trượt được thiết kế như (7):

$$u(t) = \frac{1}{b} \left[c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + \ddot{x}_d(t) - f(x, t) - d(t) + \eta \text{sign}(s(t)) + ks(t) \right] \quad (7)$$

Để chứng minh tính ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (8):

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t) \quad (8)$$

Đạo hàm của $V(t)$ như sau: $\dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t)$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s(t) \left[c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + (\ddot{x}_d(t) - f(x, t) - bu(t) - d(t)) \right] \\ \dot{V}(t) &= s(t) \left[c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + \ddot{x}_d(t) - f(x, t) - bu(t) - d(t) \right] \\ &= s(t) \left[c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + \ddot{x}_d(t) - f(x, t) - b \left[\frac{1}{b} \left[c(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_1(t)) + \ddot{x}_d(t) - f(x, t) \right] - d(t) + \eta \text{sign}(s(t)) + ks(t) \right] - d(t) \right] \\ &= s(t) \left[-\eta \text{sign}(s(t)) - ks(t) \right] = -\eta |s(t)| - ks^2(t) < 0 \end{aligned}$$

Nếu $k > 0$, $V(t) \rightarrow 0$ với giá trị của k .

Trong luật điều khiển (7), thành phần chuyển mạch $\eta \text{sign}(s(t))$ được sử dụng để vượt qua $d(t)$. Tuy nhiên, giá trị lớn của η sẽ gây ra hiện tượng dao động với tần số cao (chattering) của tín hiệu điều khiển. Hiện tượng này gây ra các hiệu ứng không mong muốn như sau [13]:

- 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 ổn định.

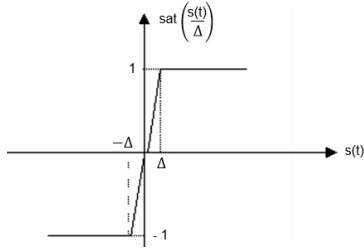
Để khắc phục hiện tượng chattering, nghiên cứu sử dụng phương pháp điều khiển trượt với chế độ trượt Quasi để kiểm nghiệm hiệu quả của phương pháp này và được thực hiện như sau [12]:

- Thay hàm *signum* bằng hàm bão hòa (*Saturation*)

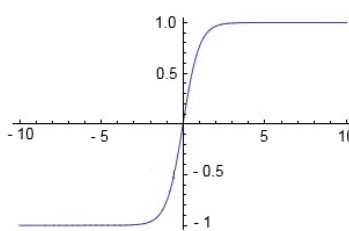
Phương trình toán học của hàm bão hòa được mô tả như (9):

$$\text{sat}(s(t)) = \begin{cases} 1 & s(t) > \Delta \\ \kappa s(t) & |s(t)| \leq \Delta \\ -1 & s(t) < -\Delta \end{cases} \quad \kappa = \frac{1}{\Delta} \quad (9)$$

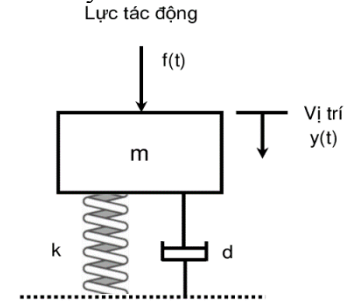
Trong đó: Δ được gọi là “lớp biên”. Tín hiệu hàm bão hòa được trình bày như Hình 1.



Hình 1. Tín hiệu hàm bão hòa



Hình 2. Tín hiệu hàm tanh



Hình 3. Mô hình hệ thống giảm xóc – vật – lò xo

- Thay hàm *signum* bằng hàm *relay*

$$\theta(s(t)) = \frac{s(t)}{|s(t)| + \delta} \quad (10)$$

Trong đó: δ là hằng số dương rất nhỏ

- Thay hàm *signum* bằng hàm *tanh*

Phương trình toán học của hàm *tanh* được mô tả như (11):

$$\tanh\left(\frac{s(t)}{\varepsilon}\right) = \frac{e^{\frac{s(t)}{\varepsilon}} - e^{-\frac{s(t)}{\varepsilon}}}{e^{\frac{s(t)}{\varepsilon}} + e^{-\frac{s(t)}{\varepsilon}}} \quad (11)$$

Với $\varepsilon > 0$, độ dốc của hàm *tanh* được xác định bởi giá trị của ε .

Tín hiệu hàm *tanh* được trình bày như Hình 2.

3. Điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi

3.1. Mô hình toán học của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo

Mô hình hệ thống giảm xóc – vật – lò xo gồm vật có khối lượng m ; hệ số giảm xóc d và lò xo với độ cứng k được trình bày như Hình 3 [14]:

Tổng các lực theo mọi phương bằng 0, ta có (12):

$$\sum F_y = 0 \quad (12)$$

$$f(t) - m\ddot{y}(t) - ky(t) - d\dot{y}(t) = 0 \quad (13)$$

$$\Rightarrow f(t) = m\ddot{y}(t) + d\dot{y}(t) + ky(t)$$

$$\Leftrightarrow \ddot{y}(t) + \frac{d}{m} \dot{y}(t) + \frac{k}{m} y(t) = \frac{1}{m} f(t) \quad (14)$$

Với: m là khối lượng của vật (kg); d là hệ số giảm xóc (Ns/m) và k là độ cứng lò xo (N/m).

Đặt biến trạng thái theo các qui tắc [6], ta được (15), (16) và (17):

$$x_1(t) = y(t) \quad (15)$$

$$x_2(t) = \dot{x}_1(t) = \dot{y}(t) \quad (16)$$

$$\Rightarrow \dot{x}_2(t) = \ddot{x}_1(t) = \ddot{y}(t) \quad (17)$$

Từ (17) và (14), ta được (18):

$$\dot{x}_2(t) = \ddot{y}(t) = \frac{1}{m} f(t) - \frac{d}{m} \dot{y}(t) - \frac{k}{m} y(t) \quad (18)$$

Không gian trạng thái của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo như (19) và (20):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{d}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u(t) \quad (19)$$

$$y(t) = x_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + 0u(t) \quad (20)$$

Trong đó: $f(t) = u(t)$ là tín hiệu ngõ vào; $y(t)$ là tín hiệu ngõ ra – vị trí của vật.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi cho hệ thống

Trong phần này, nghiên cứu sẽ thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi cho hệ thống giảm xóc – vật – lò xo. Bộ điều khiển trượt bao gồm luật điều khiển đẳng trị và điều khiển chuyển mạch như (21):

$$u_{SMC}(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (21)$$

Trong đó: $u_{eq}(t)$ là luật điều khiển đẳng trị và $u_{sw}(t)$ là luật điều khiển chuyển mạch.

Mặt trượt được mô tả như (22):

$$s(t) = \dot{e}(t) + ce(t) \quad (22)$$

Với $c > 0$ là thông số hiệu quả đảm bảo hệ thống ổn định.

Sai số và đạo hàm sai số như (23) và (24):

$$e(t) = y_d(t) - y(t) \quad (23)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{y}_d(t) - \dot{y}(t) \quad (24)$$

Trong đó: $y_d(t)$ là vị trí tham chiếu và $y(t)$ là vị trí thực tế của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo.

Lấy đạo hàm của (22), ta được (25):

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + c\dot{e}(t) = c\dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) - \ddot{y}(t) \quad (25)$$

Thế (14) vào (25), ta được (26):

$$\dot{s}(t) = c\dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + \frac{k}{m} x_1(t) + \frac{d}{m} x_2(t) - \frac{1}{m} f(t) \quad (26)$$

Trên mặt trượt: $s(t) = 0 \rightarrow \dot{s}(t) = 0$

Luật điều khiển đẳng trị được tìm như (27):

$$\begin{aligned}\dot{s}(t) &= c\dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + \frac{k}{m}x_1(t) + \frac{d}{m}x_2(t) - \frac{1}{m}f(t) = 0 \\ u_{eq}(t) &= mc\dot{e}(t) + m\ddot{y}_d(t) + kx_1(t) + dx_2(t)\end{aligned}\quad (27)$$

Luật điều khiển chuyển mạch lũy thừa được mô tả như (28):

$$u_{sw}(t) = \eta \text{sign}(s(t)) + \beta s(t) \quad (28)$$

Trong đó: $\eta > 0; \beta > 0$. Giá trị của η càng lớn thì quỹ đạo sẽ hội tụ đến mặt trượt nhanh hơn.

Kết hợp (27) và (28), ta có luật điều khiển trượt được mô tả như (29):

$$u_{SMC}(t) = mc\dot{e}(t) + m\ddot{y}_d(t) + kx_1(t) + dx_2(t) + \eta \text{sign}(s(t)) + \beta s(t) \quad (29)$$

Để chứng minh tính ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (30)

$$V(t) = \frac{1}{2}s^2(t) \quad (30)$$

Đạo hàm của $V(t)$ như sau:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= s(t)\dot{s}(t) \\ &= s(t)\left(c\dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + \frac{k}{m}x_1(t) + \frac{d}{m}x_2(t) - \frac{1}{m}\left(m\lambda\dot{e}(t) + m\ddot{y}_d(t) + kx_1(t) + dx_2(t) + \eta \text{sign}(s(t)) + \beta s(t)\right)\right) \\ &= s(t)(-\eta \text{sign}(s(t)) - \beta s(t)) = -\eta|s(t)| - \beta s(t) < 0\end{aligned}$$

Luật điều khiển trượt (29) đảm bảo vị trí thực tế của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo bám theo vị trí tham chiếu. Tuy nhiên, luật điều khiển (29) sẽ gây ra hiện tượng dao động với tần số cao ở tín hiệu điều khiển quanh quỹ đạo pha. Để khắc phục hiện tượng này, nghiên cứu sử dụng phương pháp điều khiển trượt với chế độ trượt Quasi và kiểm nghiệm hiệu quả của phương pháp này trong điều khiển vị trí hệ thống giảm xóc – vật – lò xo, cụ thể như sau:

- Thay hàm *signum* bằng hàm bão hòa

Luật điều khiển trượt với hàm bão hòa như (31):

$$u_{SMC}(t) = mc\dot{e}(t) + m\ddot{y}_d(t) + kx_1(t) + dx_2(t) + \eta \text{sat}(s(t)) + \beta s(t) \quad (31)$$

- Thay hàm *signum* bằng hàm *relay*

Luật điều khiển trượt với hàm *relay* như (32):

$$u_{SMC}(t) = mc\dot{e}(t) + m\ddot{y}_d(t) + kx_1(t) + dx_2(t) + \eta \frac{s(t)}{|s(t)| + \delta} + \beta s(t) \quad (32)$$

- Thay hàm *signum* bằng hàm *tanh*

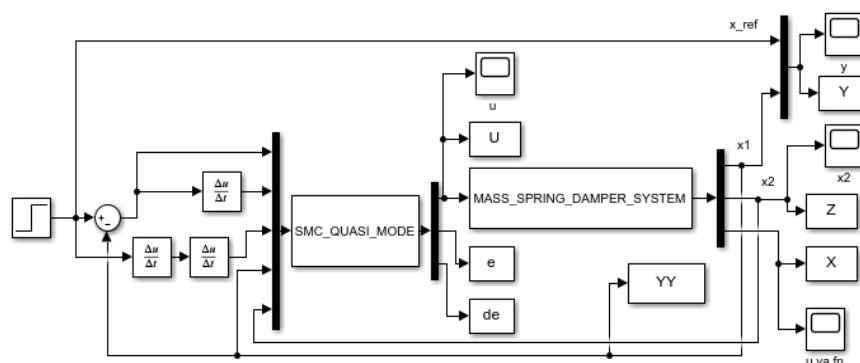
Luật điều khiển trượt với hàm *tanh* như (33):

$$u_{SMC}(t) = mc\dot{e}(t) + m\ddot{y}_d(t) + kx_1(t) + dx_2(t) + \eta \tanh\left(\frac{s(t)}{\varepsilon}\right) + \beta s(t) \quad (33)$$

Luật điều khiển (31), (32) và (33) đảm bảo điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với sai số bám hội tụ về 0, giảm đáng kể hiện tượng dao động với tần số cao quanh quỹ đạo pha của mặt trượt.

3.3. Kết quả mô phỏng

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo dựa vào chế độ trượt Quasi được trình bày như Hình 4:



Hình 4. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo dựa vào chế độ trượt Quasi

Các thông số của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được trình bày như Bảng 1:

Bảng 1. Các thông số của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo

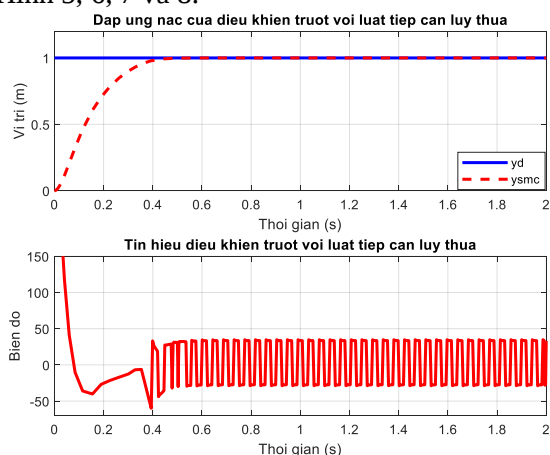
Thông số	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
m	Khối lượng của vật	2	kg
k	Độ cứng lò xo	3	N/m
d	Hệ số giảm xóc	5	Ns/m

Các thông số của bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi được trình bày như Bảng 2:

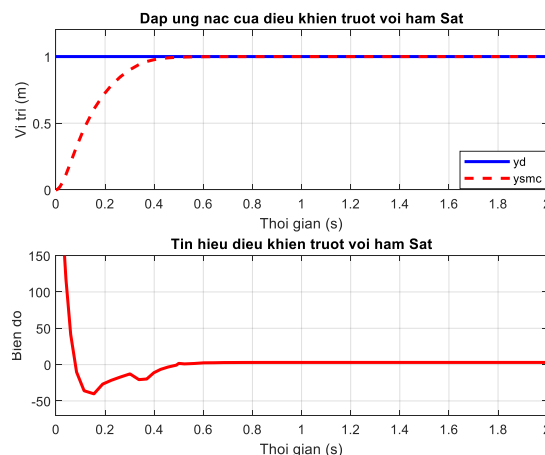
Bảng 2. Các thông số của bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi

Thông số	c	η	β	ε	δ	Δ
Giá trị	12	0,5	3	0,2	0,25	0,75

Đáp ứng nấc và tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với luật tiếp cận lũy thừa thừa được trình bày như Hình 5. Quan sát đáp ứng trên Hình 5 ta thấy rằng, vị trí thực tế của hệ thống bám theo vị trí tham chiếu với thời gian tăng là $0,263 \pm 0,001$ (s), thời gian xác lập là $0,3969 \pm 0,0001$ (s), độ vọt lố là $0,0109 \pm 0,0001$ (%) và sai số xác lập hội tụ về 0. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với luật tiếp cận lũy thừa được trình bày trong Bảng 3. Tuy nhiên, tín hiệu điều khiển trượt trong trường hợp này xuất hiện dao động với tần số cao (được gọi là chattering). Để kiểm nghiệm giải pháp khắc phục hiện tượng này, nghiên cứu tiến hành điều khiển trượt với chế độ trượt Quasi và đạt được kết quả như Hình 5, 6, 7 và 8:



Hình 5. Đáp ứng nấc và tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với luật tiếp cận lũy thừa

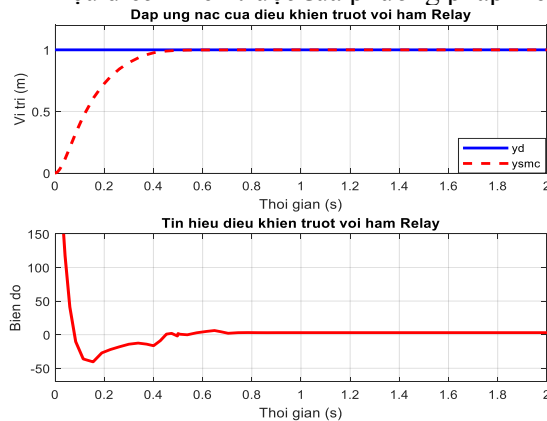
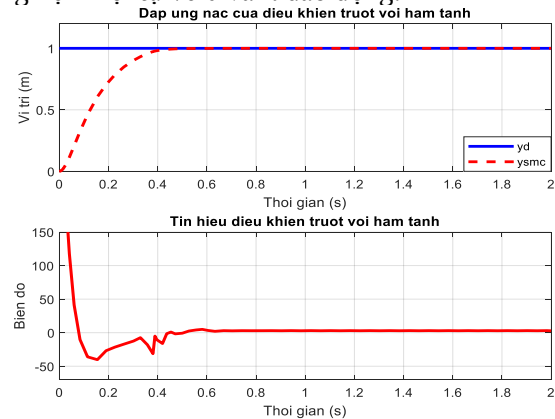


Hình 6. Đáp ứng nấc và tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với hàm bão hòa

Bảng 3. Các chỉ tiêu chất lượng bộ điều khiển trượt với luật tiếp cận lũy thừa

Chỉ tiêu chất lượng	Giá trị	Đơn vị
Độ vọt lố	$0,0109 \pm 0,0001$	%
Thời gian tăng	$0,2630 \pm 0,001$	s
Thời gian xác lập	$0,3969 \pm 0,0001$	s
Sai số xác lập	0	m

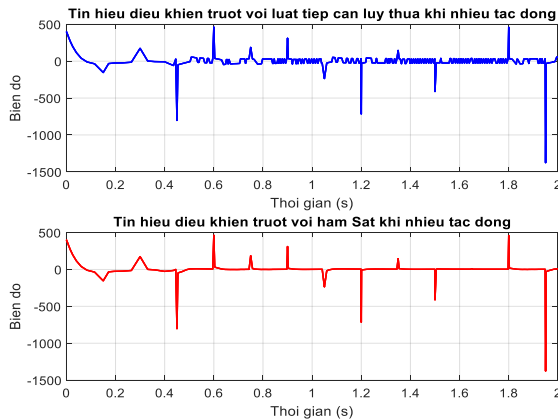
Đáp ứng nấc và tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với hàm bão hòa, hàm relay và hàm tanh được trình bày như Hình 6, Hình 7 và Hình 8 tương ứng. Vị trí thực tế của hệ thống bám theo vị trí tham chiếu với thời gian tăng là $0,2629 \pm 0,0001$ (s), thời gian xác lập là $0,4104 \pm 0,0001$ (s), không có độ vọt lố và sai số xác lập tiến về 0 với hàm bão hòa; $0,2666 \pm 0,0001$ (s), $0,4123 \pm 0,0001$ (s), không có độ vọt lố và sai số xác lập tiến về 0 với hàm relay và $0,263 \pm 0,0001$ (s), $0,395 \pm 0,001$ (s), không có độ vọt lố và triệt tiêu sai số xác lập với hàm tanh. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển trượt với chế độ trượt Quasi hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được so sánh với bộ điều khiển cuộn chiếu [6], giải thuật di truyền đa mục tiêu điều chỉnh PID tuyến tính [10] và bộ điều khiển PID [11] trình bày trong Bảng 4. Quan sát Bảng 4 ta thấy rằng, các chỉ tiêu chất lượng của phương pháp kiểm nghiệm vượt trội hơn so với [6], [10] và [11]. Tín hiệu điều khiển trượt của phương pháp kiểm nghiệm hội tụ về 0 và ít dao động.

**Hình 7.** Đáp ứng nấc và tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với hàm relay**Hình 8.** Đáp ứng nấc và tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với hàm tanh**Bảng 4.** Bảng so sánh các chỉ tiêu chất lượng của chế độ trượt Quasi với [6], [10] và [11]

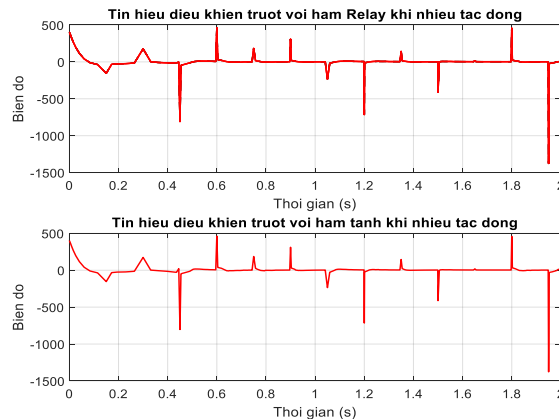
Chỉ tiêu chất lượng	Chế độ trượt Quasi			Điều khiển cuộn chiếu [6]	Giải thuật di truyền đa mục tiêu điều chỉnh PID tuyến tính [10]	Điều khiển PID [11]
	Hàm bão hòa	Hàm relay	Hàm tanh			
Độ vọt lố (%)	0	0	0	-	0,7628	9,15
Thời gian tăng (s)	$0,2629 \pm 0,0001$	$0,2666 \pm 0,0001$	$0,2630 \pm 0,001$	0,286488	-	1,25
Thời gian xác lập (s)	$0,4104 \pm 0,0001$	$0,4123 \pm 0,0001$	$0,3950 \pm 0,001$	0,5382	0,4012	4,18
Sai số xác lập (m)	0	0	0	0	0,0021	0

Tín hiệu điều khiển của chế độ trượt Quasi khi có nhiễu (nhiều trắng) với công suất 0,001 (w) tác động ở ngõ ra của hệ thống được trình bày như Hình 9 và 10.

Qua kết quả mô phỏng được trình bày ở Hình 6, 7, 8 đã chứng minh hiệu quả của bộ điều khiển trượt với chế độ trượt Quasi trong ứng dụng điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo. Hiện tượng dao động với tần số cao đã được khắc phục và hội tụ về 0. Tính bền vững của bộ điều khiển đề xuất được kiểm chứng với nhiễu trắng thể hiện ở Hình 9 và 10.



Hình 9. Tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với luật tiếp cận lũy thừa và hàm bão hòa khi có nhiễu (nhiều trắng) với công suất 0,001 (w) tác động



Hình 10. Tín hiệu điều khiển trượt hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với hàm relay và hàm tanh khi có nhiễu (nhiều trắng) với công suất 0,001 (w) tác động

4. Kết luận

Trong bài báo này, bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi được thiết kế và kiểm nghiệm tính hiệu quả trong điều khiển vị trí hệ thống giảm xóc – vật – lò xo. Các kết quả mô phỏng đạt được trong MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả của phương pháp kiểm nghiệm, đáp ứng vị trí thực tế của hệ thống bám theo vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn. Các chỉ tiêu chất lượng đạt được của phương pháp kiểm nghiệm tốt hơn bộ điều khiển cuộn chiếu, giải thuật di truyền đa mục tiêu điều chỉnh PID tuyến tính, bộ điều khiển PID và tín hiệu điều khiển đã khắc phục hiệu quả hiện tượng dao động với tần số cao. Các bộ điều khiển kết hợp sẽ được nghiên cứu, phát triển và ứng dụng để điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo đạt các chỉ tiêu chất lượng tốt hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] G. Debbache and N. Goléo, "Neural network based adaptive sliding mode control of uncertain nonlinear systems," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 119-128, 2012.
- [2] Aghabalaie Baghaei, Keyvan and Ghaffarzadeh, Hosein and Hadigheh, S.Ali and Dias-da-Costa, D., "Chattering-Free Sliding Mode Control with a Fuzzy Model for Structural Applications," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 69, pp. 307 - 315, 2019.
- [3] J.-L. Chang, "On Chattering-Free Dynamic Sliding Mode Controller Design," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2012, pp. 1-8, 2012.
- [4] F. E. Hoyos, A. Rincón, J. A. Taborda, N. Toro, and F. Angulo, "Adaptive Quasi-Sliding Mode Control for Permanent Magnet DC Motor," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2013, pp. 1-13, 2013, Art. no. 693685.
- [5] A. A. Okubanjo, O. K. Oyetola, O. O. Ade-Ikuesan, O. O. Olaluwoye, and P. O. Alao, "Performance Evaluation of PD and LQR Controller for Coupled Mass Spring Damper System," *Futo Journal Series (FUTOJNLS)*, vol. 4, no. 1, pp. 199-210, 2018.
- [6] M. F. Badr, E. H. Karam, and N. M. Mjeed, "Control design of damper mass spring system based on backstepping controller scheme," *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 11, pp. 1-8, 2020.
- [7] J. M. Cruz-Duarte, J. J. Rosales-García, and C. R. Correa-Cely, "Entropy Generation in a Mass-Spring-Damper System Using a Conformable Model," *Symmetry*, vol. 12, no. 3, pp. 1-11, 2020.
- [8] P. S. Contreras Ortiz, B. R. N. Dutan, L. G. T. Jaramillo, R. S. Ávila-Campoverde, M. A. C. Aleman, J. C. Montesdeoca-Contreras, and J. A. Morales-Garcia, "Linearization of Mass Spring Damper System for Applying Linear Control PID Techniques," *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pp. 1-5, 2014, doi: 10.1109/ROPEC.2014.7036300.

-
- [9] S. Armaghan, A. Moridi, and A. K. Sedigh, "Design of a Switching PID Controller for a Magnetically Actuated Mass Spring Damper," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. III, pp. 1-4, 2011.
 - [10] S. K. Valluru and M. Singh, "Metaheuristic Tuning of Linear and Nonlinear PID Controllers to Nonlinear Mass Spring Damper System," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, no. 10, pp. 2320-2328, 2017.
 - [11] K. Ravindra, K. Yogesh, and G. Ankit, "Comparative Analysis of P, PI, PD, PID Controller for Mass Spring Damper System using Matlab Simulink," *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, Special Issue – ICRTET, pp. 668-672, 2018.
 - [12] J. Liu, *Sliding mode control using MATLAB*. Elsevier Inc, 2017.
 - [13] H. N. Duong, *Multivariable system control*. Publishing House of Vietnam National University Ho Chi Minh City, 2011.
 - [14] E. K. Orhororo, M. E. Onogbotsere, and A. E. Ikpe, "Simulation of a mass spring damper model in phase variable," *ELK Asia Pacific Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 2, no. 2, pp. 1-16, 2016.