■ Ngày nộp bài: 29/6/2026 ■ Ngày sửa bài: 10/7/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 24/7/2026

Thiết kế bộ điều khiển bền vững giảm lắc dọc cho tàu biển bằng phương pháp điều khiển trượt với mặt trượt PID

Robust anti-pitching control for marine vessels using sliding mode control with PID-based sliding surface

>THS NGUYỄN ANH TUẤN*, TS NGUYỄN QUANG DUY, THS LÊ TUẤN SƠN
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: tuanna.hh@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một cách thức điều khiển giảm lắc dọc cho tàu biển bằng phương pháp điều khiển trượt sử dụng mặt trượt PID, nhằm nâng cao độ ổn định dọc thân tàu dưới tác động của ngoại cảnh. Lắc dọc quá mức ảnh hưởng đáng kể đến an toàn hàng hải, sức khỏe của thuyền viên và hành khách, độ an toàn của hàng hóa và hiệu quả khai thác tàu. Để giải quyết những thách thức này, một phương pháp điều khiển phi tuyến bền vững được phát triển bằng cách kết hợp khả năng khử nhiễu của điều khiển trượt với độ chính xác ở trạng thái xác lập và khả năng cải thiện đáp ứng quá độ của mặt trượt dựa trên bộ điều khiển PID. Mô hình toán học mô tả động lực học lắc dọc của tàu được xây dựng, bao gồm các tác động của nhiễu sóng bên ngoài và các đặc tính phi tuyến. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế nhằm bảo đảm sự hội tụ nhanh của góc lắc dọc và vận tốc góc lắc dọc, đồng thời duy trì tính bền vững trước các bất định tham số và nhiễu từ môi trường hoạt động. Tính ổn định của hệ thống điều khiển kín được phân tích dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Các mô phỏng số được thực hiện dưới nhiều điều kiện sóng khác nhau nhằm đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển trượt sử dụng mặt trượt PID có khả năng giảm đáng kể biên độ dao động dọc, triệt tiêu dao động và cải thiện chất lượng đáp ứng quá độ so với bộ điều khiển PID truyền thống. Bên cạnh đó, bộ điều khiển còn thể hiện tính bền vững cao và khả năng chống nhiễu mạnh trong các điều kiện khai thác có nhiều bất định.

Từ khóa: Điều khiển trượt; mặt trượt PID; giảm lắc dọc.

ABSTRACT

This paper presents an anti-pitching control strategy for marine vessels based on Sliding Mode Control (SMC) with a PID sliding surface to improve longitudinal motion stability under wave-induced disturbances. Excessive pitching motion significantly affects vessel safety, passenger comfort, cargo security and operational performance, particularly in rough sea conditions. To address these challenges, a robust nonlinear control approach is developed by combining the disturbance rejection capability of Sliding Mode Control with the steady-state accuracy and transient response improvement provided by a PID-based sliding surface. A mathematical model describing the pitching dynamics of the vessel is established, including external wave disturbances and hydrodynamic nonlinearities. The proposed controller is designed to ensure fast convergence of the pitching angle and angular velocity while maintaining robustness against parameter uncertainties and environmental disturbances. Stability of the closed-loop control system is analyzed using Lyapunov stability theory. Numerical simulations are carried out under various wave conditions to evaluate the effectiveness of the proposed method. Simulation results demonstrate that the proposed PID-based Sliding Mode Controller significantly reduces pitching amplitude, suppresses oscillations and improves transient performance compared with conventional PID and classical Sliding Mode Control methods. Furthermore, the controller exhibits strong robustness and high disturbance rejection capability under uncertain operating conditions.

Keywords: Sliding mode control (SMC); PID sliding surface; Anti-pitching control.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tàu biển hoạt động trong môi trường biển động thường xuyên chịu tác động của môi trường bên ngoài, làm phát sinh các chuyển động phi tuyến phức tạp trong sáu bậc tự do. Trong số các chuyển động này, chuyển động lắc dọc có ảnh hưởng đáng kể đến an toàn hàng hải, hiệu quả khai thác tàu, độ tin cậy kết cấu và sự thoải mái của hành khách. Vì vậy, điều khiển giảm lắc dọc đã trở thành một chủ đề nghiên cứu quan trọng trong lĩnh vực kỹ thuật hàng hải và các hệ thống ổn định chuyển động tàu biển.

Trong những năm gần đây, các hệ thống giảm lắc dọc hiện đại thường sử dụng vây ổn định điều khiển được, vây chữ T (T-foils), tấm chặn dòng và các cơ cấu cánh tà kết hợp với các thuật toán điều khiển tự động tiên tiến. Tuy nhiên, đặc tính động lực học phi tuyến của tàu biển cùng với các nhiễu sóng không xác định và sự biến thiên tham số khiến bài toán điều khiển trở nên hết sức phức tạp.

Các bộ điều khiển tỷ lệ - tích phân - vi phân (PID) truyền thống được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống ổn định tàu biển nhờ cấu trúc đơn giản và yêu cầu tính toán thấp. Tuy nhiên, các bộ điều khiển PID thông thường thường có tính bền vững hạn chế và khả năng chống nhiễu chưa cao khi làm việc trong môi trường hàng hải có tính phi tuyến mạnh [1]. Để nâng cao chất lượng điều khiển, nhiều phương pháp điều khiển tiên tiến đã được nghiên cứu như điều khiển thích nghi, điều khiển dựa trên mạng nơ-ron, điều khiển mờ, điều khiển dự báo mô hình (MPC), điều khiển dựa trên bộ quan sát nhiễu và các kỹ thuật điều khiển phi tuyến bền vững [2, 3].

Trong số các phương pháp điều khiển bền vững hiện đại, điều khiển trượt (SMC) đã thu hút được sự quan tâm đáng kể nhờ khả năng chống chịu mạnh mẽ trước các bất định của mô hình, nhiễu bên ngoài và động lực học phi tuyến [4, 5]. Đặc biệt, các phương pháp điều khiển trượt tận cùng (Terminal Sliding Mode) và chế độ trượt thời gian cố định (Fixed-Time Sliding Mode) đã chứng minh được khả năng hội tụ vượt trội và khả năng khử nhiễu hiệu quả đối với các hệ phi tuyến hàng hải [6, 7]. Mặc dù có nhiều ưu điểm, các phương pháp SMC truyền thống thường gặp phải hiện tượng chattering do tín hiệu điều khiển chuyển mạch không liên tục gây ra.

Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, bài báo đề xuất một phương pháp điều khiển giảm lắc dọc cho tàu biển dựa trên điều khiển trượt với mặt trượt PID. Một mô hình toán học phi tuyến mô tả động lực học lắc dọc của tàu dưới tác động của nhiễu sóng bên ngoài được xây dựng. Cấu trúc điều khiển đề xuất kết hợp tính bền vững của điều khiển trượt với khả năng cải thiện đáp ứng quá độ và đáp ứng xác lập của mặt trượt PID. Lý thuyết ổn định Lyapunov được sử dụng để bảo đảm tính ổn định tiệm cận của hệ kín. Các mô phỏng số dưới nhiều điều kiện nhiễu khác nhau được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả và độ bền vững của bộ điều khiển đề xuất.

2. MÔ HÌNH TÁCH CHUYỂN ĐỘNG LÊN XUỐNG (HEAVE) VÀ LẮC DỌC (PITCH) CỦA TÀU

Do tuyến hình tàu nhiều thân có tính đối xứng qua mặt phẳng dọc tâm tàu nên không tồn tại sự liên kết động lực học giữa các thành phần chuyển động theo phương ngang và phương dọc. Vì vậy, lực hồi phục và mô-men hồi phục được tạo ra bởi hệ thống vây chữ T (T-foil) và cánh tà (flap) có thể được khai thác hiệu quả để chống lại các nhiễu do sóng biển gây ra, từ đó làm giảm biên độ của cả chuyển động lên xuống và lắc dọc.

Giả thiết tàu hoạt động trong vùng nước sâu với hướng tàu không đổi và tốc độ ổn định. Trong các điều kiện này, phần thân tàu ngập nước có thể được xem là thân thon, đồng thời ảnh hưởng của gió và dòng chảy được bỏ qua. Khi đó, động lực học chuyển động thẳng đứng của thân tàu dưới tác động kích thích của sóng có thể được mô tả bằng mô hình chuyển động liên kết giữa chuyển động lên xuống và lắc dọc như sau [8]:

$$F_{T-foil}+F_{flap}+F_{wave} = (m+a_{33})\ddot{x}_3+b_{33}\dot{x}_3+c_{33}x_3+a_{35}\ddot{x}_5+b_{35}\dot{x}_5+c_{35}x_5 \quad (1)$$

$$M_{T-foil}+M_{flap}+M_{wave} = (I_{55}+a_{55})\ddot{x}_5+b_{55}\dot{x}_5+c_{55}x_5+a_{53}\ddot{x}_3+b_{53}\dot{x}_3+c_{53}x_3 \quad (2)$$

Trong đó: m là khối lượng tàu; I_{yy} là mô-men quán tính của tàu quanh trục tung y; a_{33} và a_{55} lần lượt là khối lượng gia tăng và mô-men quán tính gia tăng trong các chuyển động lên xuống và lắc dọc; b_{33} và b_{55} là các hệ số cản thủy động lực học tương ứng với chuyển động lên xuống và lắc dọc; c_{33} và c_{55} là các hệ số lực hồi phục và mô-men hồi phục; a_{35} và a_{53} là các hệ số khối lượng gia tăng liên kết giữa chuyển động lên xuống và lắc dọc; b_{35} và b_{53} là các hệ số cản liên kết giữa hai bậc tự do; c_{35} và c_{53} là các hệ số hồi phục thủy tĩnh liên kết giữa chuyển động lên xuống và lắc dọc.

Các biến x và θ là độ dịch chuyển lên xuống của tàu và góc lắc dọc. Các đạo hàm bậc nhất và bậc hai theo thời gian $\dot{x},\dot{\theta}$ và $\ddot{x},\ddot{\theta}$ biểu diễn vận tốc và gia tốc.

Các tín hiệu điều khiển $F_{T\text{-}foil}$ và M_{flap} là lực nâng sinh ra bởi vây chữ T và mô-men điều khiển được tạo ra bởi hệ thống cánh tà. F_{wave} và M_{wave} là lực kích thích từ sóng và mô-men kích thích từ sóng tác dụng lên tàu.

Để thuận tiện cho việc thiết kế hệ thống điều khiển, các phương trình động học liên kết giữa chuyển động lên xuống và lắc dọc có thể được chuyển đổi sang dạng biểu diễn không gian trạng thái như sau:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \ddot{x}_5\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_5\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-A_0^{-1}B_0 & -A_0^{-1}C_0\\ I_{2\times2} & O_{2\times2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \dot{x}_5\\ x_3\\ x_5\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-A_0^{-1}\\ O_{2\times2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}F_{T-foil}+F_{flap}\\ M_{T-foil}+M_{flap}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-A_0^{-1}\\ O_{2\times2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}F_{wave}\\ M_{wave}\end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_0=\begin{bmatrix}m+a_{33} & a_{35}\\ a_{53} & I_{55}+a_{55}\end{bmatrix},\ B_0=\begin{bmatrix}b_{33} & b_{35}\\ b_{53} & b_{55}\end{bmatrix};\ C_0=\begin{bmatrix}c_{33} & c_{35}\\ c_{53} & c_{55}\end{bmatrix}$$

$$A=\begin{bmatrix}-A_0^{-1}B_0 & -A_0^{-1}C_0\\ I_{2\times2} & O_{2\times2}\end{bmatrix}$$

$$B=\begin{bmatrix}-A_0^{-1}\\ O_{2\times2}\end{bmatrix}\ u_1=\begin{bmatrix}F_{T-foil}+F_{flap}\\ M_{T-foil}+M_{flap}\end{bmatrix}v=\begin{bmatrix}F_{wave}\\ M_{wave}\end{bmatrix}$$

$$M_{T-foil}=F_{T-foil}l_{T-foil}$$

$$M_{flap}=F_{flap}l_{flap}$$

$$F_{flap}=\frac{1}{2}C_{L1}\rho V^2S\alpha_1,F_{T-flap}=\frac{1}{2}\rho A\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}V^2\alpha_2$$

Trong đó: ρ là khối lượng riêng của nước biển; A và S lần lượt là diện tích hiệu dụng của vây chữ T và cánh tà; C_L và C_{L1} là các cánh tay đòn tương ứng của lực nâng do vây chữ T và cánh tà tạo ra; V là vận tốc tương đối của dòng chất lỏng tác dụng lên hệ thống phần phụ; α_1; α_2 và α_{flap} là góc tấn của vây chữ T và góc tấn của cánh tà; $L_{T\text{-}foil}$ là chiều dài cánh tay đòn hiệu dụng của hệ thống vây chữ T.

Để đơn giản hóa việc thiết kế bộ điều khiển đa biến cho mô hình chuyển động liên kết bốn chiều trong (3), hệ thống được tách thành hai phân hệ độc lập tương ứng với chuyển động lên xuống và chuyển động lắc dọc. Ký hiệu x và $\dot{x}$ lần lượt là độ dịch chuyển lên xuống và vận tốc lên xuống; θ và $\dot{\theta}$ lần lượt là góc lắc dọc và vận tốc góc lắc dọc. Khi đó, phân hệ chuyển động lên xuống sau khi tách được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m+a_{33}}(-b_{33}x_2 - c_{33}x_1) \\ + \frac{1}{m+a_{33}}(-a_{35}\dot{x}_{22} - b_{35}x_{22} - c_{35}x_{11} + F_{wave}) + \Delta f_1 + \frac{1}{m+a_{33}}F \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: $f_1 = \frac{1}{m+a_{33}}(-a_{35}\dot{x}_{22} - b_{35}x_{22} - c_{35}x_{11} + F_{wave})$ biểu thị ảnh hưởng liên kết của động lực học lắc dọc lên chuyển động lên xuống và được xem như một thành phần bất định trong phân hệ chuyển động lên xuống sau khi tách. Δf_1 là nhiễu bất định tham số của mô hình chuyển động lên xuống. $F = F_{T-foil} + F_{flap}$ là tín hiệu điều khiển được tạo bởi hệ thống vây chữ T và cánh tà; $\frac{1}{m+a_{33}}$ là hệ số khuếch đại điều khiển hiệu dụng của động lực học chuyển động lên xuống.

3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN VÀ PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH

3.1. Thiết kế bộ điều khiển trượt

Mô hình động lực học chuyển động lên xuống sau khi tách có thể được biểu diễn dưới dạng tổng quát có xét đến các yếu tố bất định của hệ thống như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = h(t,x) + bu(t) + H(x,t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó: x_1 là tín hiệu đầu ra đo được của hệ thống; u là tín hiệu điều khiển; b là hệ số khuếch đại điều khiển tương ứng; $h(t,x) = \frac{1}{m+a_{33}}(-b_{33}x_2 - c_{33}x_1)$ biểu diễn động lực học giả định của hệ thống; $H(x,t) = f_1 + \Delta f_1$ là thành phần bất định tổng hợp, bao gồm các bất định tham số bên trong hệ thống và các nhiễu tác động từ môi trường bên ngoài.

Tương tự, động lực học chuyển động lắc dọc sau khi tách kênh cũng có thể được biểu diễn dưới dạng tương tự và không được trình bày chi tiết ở đây nhằm đảm bảo tính ngắn gọn.

Mục tiêu của phương pháp điều khiển giảm lắc dọc đối với tàu nhiều thân là đồng thời triệt giảm chuyển động lên xuống và lắc dọc, đồng thời duy trì tính bền vững trước các biến thiên tham số và nhiễu sóng từ môi trường.

Mặt trượt được lựa chọn như sau:

$$s(t) = \dot{e}(t) + ce(t) \qquad c \in R^+ \quad (6)$$

Trong đó: $e(t) = y(t) - l(t)$ là sai số bám (tracking error); $l(t)$ là tín hiệu đầu ra mong muốn; $y(t)$ là đầu ra thực tế của hệ thống; c là hằng số thiết kế dương. Trong nghiên cứu này, đầu ra mong muốn được chọn là l(t)=0. Do đó, sai số bám trở thành $e(t) = y(t) = x_1$. Vì vậy, mặt trượt trong (6) có thể được viết lại như sau:

$$s(t) = \dot{x}_1(t) + cx_1(t) \qquad c \in R^+ \quad (7)$$

Lấy đạo hàm theo thời gian của (7), ta được:

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_2(t) + c\dot{x}_1(t) \quad (8)$$

Thay (5) vào (8), thu được:

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_2(t) + c\dot{x}_1(t) = h(x,t) + bu + cx_2(x,t) + H(x,t) \quad (9)$$

Luật điều khiển tổng thể được lựa chọn như sau [9]:

$$u_{tt} = u_{eq} + u_{sw} \quad (10)$$

Trong đó: u_{eq} là thành phần điều khiển tương đương; u_{sw} là thành phần điều khiển chuyển mạch. Theo (9), thành phần điều khiển tương đương được xác định dưới các điều kiện ṡ(t)=0 và H(t,x)=0 để duy trì quỹ đạo hệ thống trên mặt trượt. Thành phần điều khiển chuyển mạch được xác định như sau:

$$u_{eq} = (-h(t,x) - cx_2(t)) / b \quad (11)$$

Tuy nhiên, khi tồn tại nhiễu bên ngoài và các bất định tham số, điều kiện tiếp cận của luật điều khiển sṡ≤-η|s|, η>0 phải luôn được thỏa mãn. Để bảo đảm yêu cầu này, thành phần điều khiển chuyển mạch được lựa chọn như sau:

$$u_{sw} = -\frac{1}{b}p(t)sign(s(t)) \quad (12)$$

Trong đó: p(t) là hệ số chuyển mạch luôn dương:

$$p(t) = \max|H(x,t)| + \eta \quad (13)$$

Kết hợp các phương trình (10), (11) và (12), luật điều khiển tổng quát của hệ thống được xác định như sau:

$$u_{tt} = (-h(t,x) - cx_2(t) - p(t)\mathrm{sgn}(s(t))) / b \quad (14)$$

Tính ổn định của hệ kín được khảo sát dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Hàm Lyapunov được lựa chọn là:

$$V = \frac{s^2(t)}{2} \quad (15)$$

Từ (15), có thể thấy rằng khi s(t)≠0 thì V(0)=0 và V(t)>0. Để thỏa mãn điều kiện tiếp cận trong điều khiển trượt, đạo hàm của hàm Lyapunov phải thỏa mãn V̇=sṡ<0 với s(t)≠0.

Kết hợp (9) và (15), thu được:

$$\dot{V} = s(h(t,x) + bu + cx_2(t) + H(x,t)) \quad (16)$$

Thay (14) vào (16), ta có:

$$\dot{V} = s(-p(t)\mathrm{sgn}(s) + H(x,t)) \quad (17)$$

Sử dụng tính chất |s(t)|=s(t)sign(s(t)) phương trình (17) được viết lại thành:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -|s(t)|p(t) + s(t)H(x,t)) \\ &\le -p(t)|s(t)| + s(t)H(x,t)_{\max} \\ &\le -|s(t)|(p(t) - H(x,t)_{\max}) < 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Từ (18), có thể kết luận rằng điều kiện đủ để bảo đảm tính ổn định toàn cục của hệ thống là |s(t)|>0 và s(t)≠0. Ngoài ra, hệ số tiếp cận phải được lựa chọn sao cho $p(t)>H(x,t)_{max}$ nhằm bảo đảm V̇(t)<0 luôn được thỏa mãn.

3.2. Thiết kế điều khiển trượt với mặt trượt PID

Luật điều khiển trượt được xây dựng dựa trên mặt trượt đã chọn, trong khi cấu trúc mặt trượt được xác định theo bậc của hệ điều khiển. Do hệ thống được xem xét trong nghiên cứu này là mô hình dao động một bậc tự do, hàm mặt trượt ban đầu được lựa chọn như trong (6). Tuy nhiên, để giảm hiện tượng rung xuất hiện gần mặt trượt do sự thay đổi mạnh của tín hiệu điều khiển chuyển mạch, mặt trượt được thiết kế lại dưới dạng PID như sau [9]:

$$\begin{aligned} \delta(t) &= \dot{s}(x,t) + \alpha s(x,t) \\ &= a_d x_2(t) + a_p x_1(t) + a_i \int_0^t x_1(\tau)d(\tau) \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó: a_p, a_i và a_d là hệ số tỷ lệ, tích phân và vi phân; α là hằng số dương. Lấy đạo hàm cấp 2 của (19), thu được:

$$\ddot{s}(x,t) + \alpha\dot{s}(x,t) = a_d\dot{x}_2(t) + a_p\dot{x}_1(t) + a_i x_1(t) \quad (20)$$

Các tham số a_p, a_i và a_d cần được lựa chọn thích hợp sao cho đa thức đặc trưng thỏa mãn tiêu chuẩn ổn định Hurwitz, nghĩa là toàn bộ các giá trị riêng nằm trong nửa mặt phẳng trái của mặt phẳng phức.

Thay (5) vào (20), thu được:

$$\ddot{s}(x,t)+\alpha\dot{s}(x,t)=a_d(h(t,x)+bu +H(x,t))+a_p\dot{x}_1(t)+a_i x_1(t) \quad (21)$$

Tín hiệu điều khiển trong (10) bao gồm hai thành phần u_{eq} và u_{sw} . Trong đó: u_{eq} đóng vai trò là tín hiệu điều khiển chính. Thành phần này được xác định từ điều kiện s̈(x,t)=0 nhằm duy trì sai số bám trên mặt trượt và bảo đảm tính ổn định của hệ thống.

$$u_{eq}=\frac{1}{a_d b}(\alpha\dot{s}(t)-a_d h(t,x)-a_p\dot{x}_1(t)-a_i x_1(t)) \quad (22)$$

Tuy nhiên, trong trường hợp tồn tại các yếu tố bất định, cần bổ sung thành phần điều khiển chuyển mạch để đưa hệ từ pha tiếp cận đến pha trượt. Luật điều khiển chuyển mạch như sau:

$$u_{sw}=-\lambda_1 s(x,t)-\lambda_{sw}sign(\dot{s}) \quad (23)$$

Trong đó: $\lambda_1,\lambda_{sw}\in R^+$ với $\lambda_1>\frac{1}{a_d b}$ và $\lambda_{sw}>\frac{H(x,t)\max}{b}$

Thay (22) và (23) vào (21), ta thu được:

$$\ddot{s}(x,t)=a_d H(x,t)-a_d b\lambda_1 s(x,t)-a_d b\lambda_{sw}sign(\dot{s}) \quad (24)$$

Để đánh giá tính ổn định của hệ thống, một hàm Lyapunov xác định dương được lựa chọn như sau:

$$V=(s^2(x,t)+\dot{s}^2(x,t))/2 \quad (25)$$

Từ (25), có thể thấy rằng khi s(x,t)≠0 và ṡ(t)≠0 thì V(0)=0 và V(t)>0 được thỏa mãn. Theo lý thuyết Lyapunov, tính ổn định của hệ thống được xác định thông qua đạo hàm bậc nhất của hàm V. Nếu V̇(t) âm thì hệ thống ổn định. Lấy đạo hàm theo thời gian của (25), thu được:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t)&=s\dot{s}+\dot{s}\ddot{s}\\&=s\dot{s}+\dot{s}(a_d H-a_d b\lambda_1 s-a_d b\lambda_{sw}sign(\dot{s}))\\&=s\dot{s}-a_d b\lambda_1 s\dot{s}+\dot{s}a_d H\\&-\dot{s}a_d b\lambda_{sw}sign(\dot{s})\end{aligned} \quad (26)$$

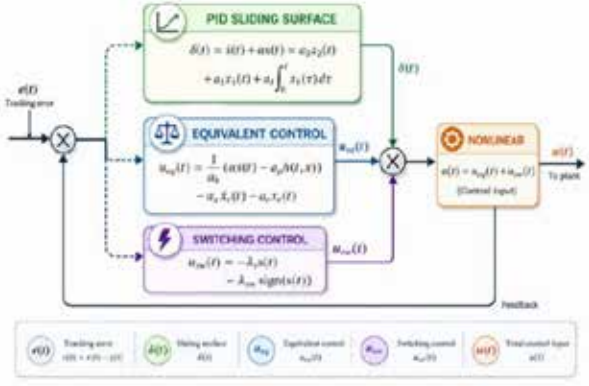
Sử dụng tính chất $|\dot{s}|=\dot{s}sign(\dot{s})$ phương trình (26) được viết lại thành:

$$\begin{aligned}\dot{V}&=s\dot{s}-a_d b\lambda_1 s\dot{s}+\dot{s}a_d H-a_d b\lambda_{sw}|\dot{s}|\\&\le|\dot{s}|(s-a_d b\lambda_1 s+a_d H-a_d b\lambda_{sw})\\&\le|\dot{s}|(|s|-a_d b\lambda_1|s|+a_d H-a_d b\lambda_{sw})\\&\le|\dot{s}|(|s|-a_d b\lambda_1|s|+a_d H\max-a_d b\lambda_{sw})\\&=-|\dot{s}|(|s|(a_d b\lambda_1-1)+(a_d b\lambda_{sw}-a_d H\max)<0\end{aligned} \quad (27)$$

Điều kiện $\lambda_{sw}>\frac{H\max}{b},\lambda_1>\frac{1}{a_d b},s\neq 0,|s|>0,|\dot{s}|>0$

Khi đó ta được V̇(t)<0 và V̇(t) âm.

Sơ đồ khối hệ thống điều khiển được minh họa ở Hình 1.

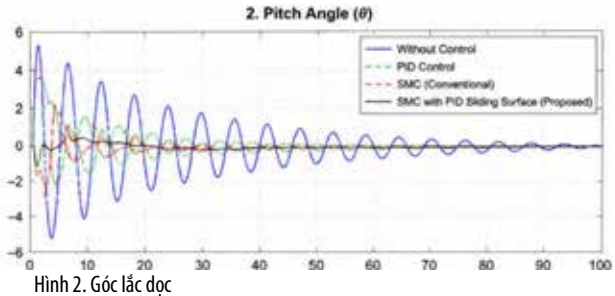


Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển được thiết kế

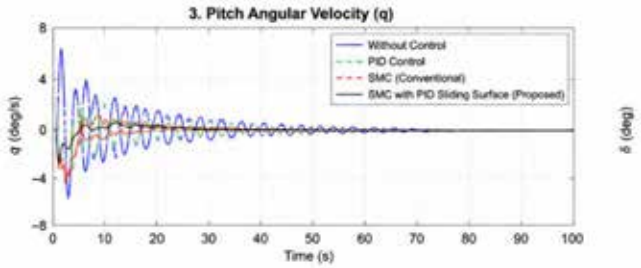
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Dựa trên mô hình tàu đã xây dựng, hiệu quả của phương pháp điều khiển giảm lắc dọc được đề xuất có thể được đánh giá và kiểm chứng thông qua mô phỏng. Đối với kịch bản tàu tốc độ cao hoạt động trên biển, điều kiện môi trường được giả thiết tương ứng với cấp sóng biển cấp 4. Trong nghiên cứu này, nhiễu sóng biển được mô hình hóa bằng phổ sóng Pierson-Moskowitz (P-M).

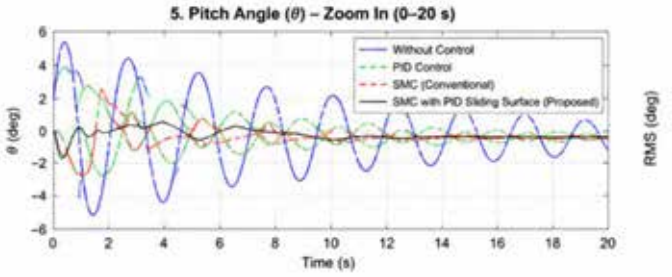
Kết quả mô phỏng được trình bày từ Hình 2 đến Hình 6 nhằm kiểm chứng hiệu quả của phương pháp đề xuất.



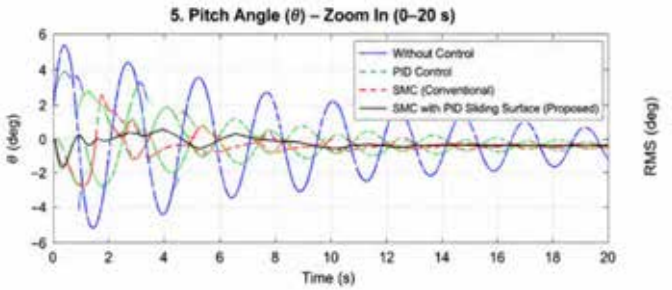
Hình 2. Góc lắc dọc



Hình 3. Vận tốc góc lắc dọc



Hình 4. Góc lệch vây điều khiển



Hình 5. Phóng đại góc lắc dọc trong khoảng thời gian 0 - 20 giây

Hình 2 thể hiện đáp ứng theo thời gian của góc lắc dọc θ. Trong trường hợp không điều khiển, góc lắc dọc xuất hiện các dao động lớn với biên độ ban đầu xấp xỉ ±5°, thời gian xác lập kéo dài và dao động tồn tại liên tục trong suốt quá trình khảo sát. Với bộ điều khiển

PID, biên độ dao động được giảm đáng kể. Tuy nhiên, hệ thống vẫn tồn tại dao động dư và thời gian xác lập còn tương đối dài. Bộ điều khiển trượt truyền thống (SMC) tiếp tục cải thiện hiệu năng nhờ tính bền vững cao đối với nhiễu và phi tuyến của hệ thống, giúp dao động được suy giảm nhanh hơn. Đáng chú ý, phương pháp SMC sử dụng mặt trượt PID được đề xuất đạt hiệu quả tốt nhất. Dao động được triệt tiêu nhanh chóng, biên độ giảm mạnh và thời gian xác lập ngắn hơn đáng kể so với các phương pháp còn lại.

Hình 3 là vận tốc góc lắc dọc. Trong trường hợp không điều khiển, vận tốc góc xuất hiện các dao động lớn và kéo dài, cho thấy tác động mạnh của nhiễu sóng đến động lực học của hệ thống. Bộ điều khiển PID làm giảm đáng kể biên độ dao động, tuy nhiên vẫn còn hiện tượng quá điều chỉnh (overshoot). Ngược lại, bộ điều khiển SMC truyền thống và đặc biệt là SMC với mặt trượt PID đã triệt giảm vận tốc góc hiệu quả hơn và nhanh chóng đưa hệ thống về trạng thái cân bằng. Điều này chứng tỏ khả năng ổn định động học và chất lượng đáp ứng quá độ được cải thiện rõ rệt.

Hình 4 biểu diễn góc lệch của vây ổn định δ. Bộ điều khiển PID tạo ra tín hiệu điều khiển tương đối mượt nhưng đáp ứng chậm. Bộ điều khiển SMC truyền thống tạo ra tín hiệu điều khiển mạnh ngay từ giai đoạn đầu nhằm nhanh chóng loại bỏ nhiễu tác động. Tuy nhiên, điều này có thể dẫn đến hiện tượng rung, gây dao động điều khiển và làm tăng tải cho cơ cấu chấp hành. Ngược lại, phương pháp đề xuất tạo ra tín hiệu điều khiển ổn định hơn, giảm đáng kể dao động điều khiển và hội tụ nhanh về trạng thái cân bằng. Kết quả này cho thấy sự cân bằng tốt giữa hiệu quả chống dao động dọc và mức tiêu thụ năng lượng điều khiển.

Hình 5 trình bày chi tiết đáp ứng góc lắc dọc trong khoảng thời gian từ 0 đến 20 giây nhằm đánh giá chính xác hơn chất lượng đáp ứng quá độ. Có thể nhận thấy rằng bộ điều khiển SMC sử dụng mặt trượt PID đã triệt giảm dao động ngay từ những chu kỳ đầu tiên. Đồng thời, phương pháp này làm giảm đáng kể độ quá điều chỉnh và dao động dư so với bộ điều khiển PID cũng như SMC truyền thống.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khảo sát và so sánh hiệu quả của các phương pháp điều khiển khác nhau đối với bài toán giảm lắc dọc của tàu dưới tác động của nhiễu sóng biển, bao gồm bộ điều khiển PID, điều khiển trượt truyền thống và bộ điều khiển SMC sử dụng mặt trượt PID được đề xuất.

Kết quả mô phỏng cho thấy tất cả các phương pháp điều khiển đều cải thiện độ ổn định của hệ thống so với trường hợp không điều khiển. Tuy nhiên, hiệu quả của từng phương pháp có sự khác biệt đáng kể. Bộ điều khiển PID làm giảm biên độ dao động nhưng vẫn tồn tại nhược điểm về tốc độ đáp ứng chậm và dao động dư. Điều khiển trượt truyền thống cải thiện khả năng chống nhiễu và tính bền vững của hệ thống, nhưng lại phát sinh hiện tượng chattering và yêu cầu tín hiệu điều khiển ban đầu tương đối lớn. Trong khi đó, phương pháp điều khiển được đề xuất đạt hiệu năng tổng thể tốt nhất, làm giảm đáng kể góc dao động dọc, vận tốc góc dao động dọc và giá trị RMS, đồng thời cải thiện rõ rệt đặc tính đáp ứng quá độ của hệ thống.

Từ các kết quả đạt được, có thể kết luận rằng bộ điều khiển trượt sử dụng mặt trượt PID là một giải pháp điều khiển hiệu quả và có độ bền vững cao đối với các hệ thống giảm lắc dọc của tàu biển, mang lại khả năng ổn định tốt hơn, thời gian đáp ứng nhanh hơn và mức độ dao động nhỏ hơn khi tàu chịu tác động kích thích của sóng biển. Trong các nghiên cứu tiếp theo, có thể tập trung vào việc kiểm chứng thực nghiệm trên mô hình vật lý hoặc tàu thực, cũng như nghiên cứu tích hợp các cơ chế điều chỉnh tham số thích nghi hoặc các thuật toán điều khiển thông minh nhằm tiếp tục nâng cao hiệu quả điều khiển trong các điều kiện biển động khác nhau và môi trường khai thác có mức độ bất định cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S. Cho, H. Shim and Y.-S. Kim. Dynamical sliding mode control for robust dynamic positioning systems of FPSO vessels. Journal of Marine Science and Engineering, vol. 10, no. 4, Art. no. 474, 2022.

[2] J. Dong, M. Zhao, L. Zhao and M. Cheng. Fault-tolerant trajectory tracking control of an unmanned marine vehicle via an adaptive non-singular fast terminal sliding mode control. Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 45, no. 4, pp. 889-903, 2023.

[3] C. Liang, M. Ge, Z. Liu, G. Ling and F. Liu. Predefined-time formation tracking control of networked marine surface vehicles. Control Engineering Practice, vol. 107, Art. no. 104682, 2021.

[4] M. A. Abkowitz. Measurement and analysis of ship motions in longitudinal seas. Ocean Engineering, vol. 237, Art. no. 109605, 2021.

[5] Y. Liu, X. Li and H. Du. Adaptive disturbance rejection control for nonlinear marine systems with actuator saturation. ISA Transactions, vol. 120, pp. 312-324, 2022.

[6] J. Xu and S. Li. PID-based sliding mode control for uncertain nonlinear systems with external disturbances. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 31, no. 14, pp. 6754-6771, 2021.

[7] Z. Peng, J. Wang and D. Wang. Neural-network-based adaptive control for marine surface vessels with uncertainties and input saturation. Applied Ocean Research, vol. 118, Art. no. 102987, 2022.

[8] H. D. Xi and J. Sun. Feedback stabilization of high-speed planning vessels by a controllable transom flap. IEEE Journal of oceanic engineering, 31(2): 421-431, 2006.

[9] Nada M. Moawad, Wael M. Elawady, Amany M. Sarhan. Adaptive PID sliding surface-based second order sliding mode controller for perturbed nonlinear systems. 2017 12th International conference on computer engineering and systems (ICCES), Cairo, Egyp.