

KHOA HỌC - CÔNG NGHỆ

ỨNG DỤNG MATLAB TRONG ĐIỀU KHIỂN TOÀN PHƯƠNG TUYẾN TÍNH BẬC HAI CHO HỆ THỐNG VÂY GIẢM LẮC TÀU THỦY CÓ TÍNH ĐẾN YẾU TỐ NGOẠI CẢNH

APPLICATION OF MATLAB IN LINEAR QUADRATIC REGULAR CONTROL FOR SHIP FIN STABILIZER SYSTEM CONSIDERING THE EXTERNAL DISTURBANCE

NGUYỄN THÁI DƯƠNG, NGUYỄN QUANG DUY*

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nguyenquangduy@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Khi hành trình trên biển, dao động lắc ngang của tàu sẽ ảnh hưởng lớn đến sự an toàn của tàu và hàng hóa cũng như sức khỏe của thủy thủ đoàn. Là một thiết bị phổ biến để giảm lắc ngang cho tàu, vây giảm lắc chủ động thường được lắp đặt phổ biến để giảm lắc ngang cho tàu, hiệu quả giảm lắc của các vây này phụ thuộc chủ yếu vào bộ điều khiển vây. Trong nghiên cứu của chúng tôi, bộ điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính bậc hai (Linear Quadratic Regular - LQR) được đề xuất cho hệ thống ổn định vây tuyến tính của tàu nhằm mục đích thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống vây giảm lắc chủ động của tàu. Trong thiết kế này, yếu tố ngoại cảnh được xem xét là các sóng ngẫu nhiên tác động vào hệ thống. Sau cùng, tính ổn định và hiệu quả của bộ điều khiển LQR được khẳng định bằng các kết quả mô phỏng dựa trên phần mềm mô phỏng Matlab.

Từ khóa: Điều khiển tuyến tính bậc hai, điều khiển tối ưu, vây giảm lắc chủ động.

Abstract

When ships are sailing on the sea, roll motion will greatly reduce the safety of ships and cargo, as well as the health of the crew. Due to advantages of fin stabilizer, nowadays, active fin became a popular device, which usually installed on ships to reduce roll motion, and the fins roll reduction efficiency depends primarily on the controller. In our work, Linear Quadratic Regular (LQR) controller is proposed for the ship's linear fin stabilizer system for the purpose of designing the optimal controller for the ship's active fin stabilizer system. In this design, external disturbance is considered as random waves

impacting the system. Finally, the stability and efficiency of the LQR controller are confirmed by the simulation results based on the Matlab simulation software.

Keywords: Linear Quadratic Regular, optimal control, ship fin stabilizer system.

1. Mở đầu

Dao động lắc ngang là một trong sáu bậc dao động tự do của tàu, bao gồm chuyển động ngang, chuyển động quay, chuyển động tiến lùi, lắc dọc, dập dềnh, và lắc ngang, trong đó chuyển động lắc ngang có tác động tiêu cực nhất đến sự ổn định và an toàn của tàu. Thông thường, chuyển động lắc ngang được tạo ra do tác động của các điều kiện bên ngoài khi tàu hành trình trên biển như: Sóng, gió và dòng chảy [1]. Dưới tác động của chuyển động lắc ngang, hiệu quả hoạt động của tàu sẽ giảm đáng kể, an toàn của thuyền viên và hàng hóa sẽ bị ảnh hưởng trực tiếp, dẫn đến ảnh hưởng không nhỏ đến các hoạt động hàng ngày của thuyền viên và của tàu. Vì vậy, giảm chuyển động lắc ngang của tàu là một nhiệm vụ cần thiết và quan trọng trong lĩnh vực điều khiển chuyển động tàu.

Do tầm quan trọng của vấn đề trên, để giảm chuyển động lắc ngang của tàu, từ cách đây rất lâu, người ta đã lắp đặt nhiều thiết bị trên tàu để giảm lắc ngang cho tàu, chẳng hạn như vây giảm lắc bị động, kết nước giảm lắc và bánh lái giảm lắc. Vây giảm lắc bị động thường được lắp vào thân tàu, cố định và vuông góc với thân tàu, chúng có tác dụng giảm lắc ngang bằng cách tăng lực cản của tàu và biên độ lắc ngang có thể giảm 20% -50% [2]. Kết nước giảm lắc là cách giảm lắc ngang phổ biến. Trong quá trình tàu lắc ngang, nước trong kết nước giảm lắc sẽ di chuyển ngược pha và đồng thời sinh ra lực mô men làm giảm chuyển động lắc ngang của tàu. Ưu điểm của thiết bị này là phù hợp với nhiều điều kiện thời tiết biển và phù hợp với các loại tàu có tốc độ thấp hoặc

phần lớn thời gian là đứng yên. Hơn nữa, hiệu quả của việc giảm lắc là tương đối tốt, biên độ lắc ngang có thể giảm 40% -50% theo cách này [3]. Bánh lái giảm lắc cũng là một thiết bị phổ biến để giảm lắc ngang và thường được áp dụng trên tàu thủy nhờ hiệu suất giảm lắc tốt mà không cần lắp đặt thêm thiết bị. Bằng cách tận dụng bánh lái của tàu, lực giảm lắc được tạo ra bởi bánh lái để giảm chuyển động lắc ngang của tàu. Bằng cách này, đối với các tàu cỡ nhỏ như tàu cá, biên độ lắc ngang có thể giảm từ 50% đến 70% [4]. Chúng ta có thể thấy rằng các thiết bị trên không thể thực sự đạt được hiệu quả như mong muốn. Vì vậy, thiết bị vây giảm lắc chủ động đã được nghiên cứu trong những năm gần đây và dần được ứng dụng cho tàu biển để đạt hiệu suất giảm lắc tốt nhất. Bằng cách sử dụng thiết bị này, biên độ lắc ngang của tàu có thể giảm từ 70% đến 90% [5]. Hiệu quả giảm lắc của vây giảm lắc chủ động phụ thuộc rất nhiều vào bộ điều khiển, được thiết kế để điều khiển vây chủ động. Như vậy, việc thiết kế bộ điều khiển vây giảm lắc để đạt hiệu quả cao là một việc hết sức quan trọng. Trong những năm gần đây, nhiều bộ điều khiển vây giảm lắc đã được nghiên cứu dựa trên các phương pháp điều khiển khác nhau như: điều khiển trượt [6], điều khiển mờ [7],...

Như chúng ta đã biết, trong lĩnh vực điều khiển tự động thì các phương pháp điều khiển tối ưu có một vai trò quan trọng do những ưu điểm mà các phương pháp đó mang lại, có thể kể đến như điều khiển dự đoán mô hình (Model Predictive Control-MPC), điều khiển động lực học thích nghi (Adaptive Dynamic Programming-ADP),... Với nhiệm vụ chính là thiết kế tín hiệu điều khiển của hệ thống điều khiển nhằm tối ưu hóa một hàm chi tiêu, từ đó đạt được tín hiệu đầu ra như mong muốn, tuy nhiên mỗi phương pháp đều có những nhược điểm khác nhau. Với điều khiển dự đoán mô hình MPC thì nhược điểm lớn nhất là giải quyết vấn đề lập trình bậc hai (Quadratic Problem), hay độ ổn định của mô hình khi có nhiễu ngoài tác động. Với ADP là vấn đề lựa chọn các tham số của ma trận trọng số sao cho tối ưu nhất cũng là một vấn đề lớn.

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển tối ưu LQR được áp dụng cho hệ thống ổn định vây tuyến tính của tàu. Như chúng ta đã biết, phương pháp LQR là một phương pháp điều khiển tối ưu được áp dụng cho hệ thống tuyến tính mang lại hiệu quả ổn định cao. Nghiên cứu này là một cách tiếp cận điều khiển thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái cho các hệ thống tuyến tính đồng thời giảm thiểu hàm chi tiêu đã cho. Do đó, bộ điều khiển LQR được đưa ra bằng

cách giải bài toán điều khiển tối ưu tiên định. Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển LQR được thiết kế dựa trên mô hình không gian trạng thái tuyến tính của tàu, ngoài ra yếu tố ngoại cảnh tác động tới hệ thống là các sóng ngẫu nhiên cũng được tính đến giúp cho kết quả mô phỏng được thực tế hơn. Kết quả mô phỏng được đưa ra để xác nhận tính hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất.

Phần còn lại của bài báo được sắp xếp như sau: Mô hình tuyến tính chuyển động lắc ngang của tàu được đưa ra trong Phần 2, mô hình sóng ngẫu nhiên được đưa ra trong Phần 3. Phần 4 là thiết kế bộ điều khiển LQR. Các kết quả mô phỏng được đưa ra trong Phần 5 và Phần 6 là kết luận của bài báo này.

2. Mô hình tuyến tính dao động lắc ngang của tàu

Khi hành trình trên biển, tàu thuyền thường chịu tác động của nhiễu động bên ngoài như sóng, gió, dòng chảy,... Khi góc lắc ngang của tàu nhỏ, mô hình vây giảm lắc tuyến tính của tàu được thiết lập dựa trên lý thuyết Conolly. Mô hình này được sử dụng rộng rãi để điều khiển giảm lắc cho tàu và được mô tả như sau [8]:

$$(M_x + \Delta M_x)\ddot{\varphi} + 2N_u\dot{\varphi} + D_p h_m \varphi = -D_p h_m \alpha_1 - K_c \quad (1)$$

Trong đó: M_x và ΔM_x là mô men quán tính và mô men quán tính khối lượng nước kèm của tàu. φ là góc lắc ngang của tàu, $\dot{\varphi}$ là tốc độ lắc ngang, h_m là chiều cao tâm nghiêng ban đầu của tàu, D_p biểu thị lượng giãn nước của tàu, $2N_u$ biểu thị hệ số đập của chuyển động lắc của tàu. α_1 biểu thị hiệu số gây nghiêng của sóng. K_c là mô men điều khiển được sinh ra bởi vây giảm lắc.

Công thức (1) được viết lại như sau:

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{(M_x + \Delta M_x)}(-2N_u\dot{\varphi} - D_p h_m \varphi - D_p h_m \alpha_1 - K_c) \quad (2)$$

Biểu thị $x = [x_1, x_2]^T = [\varphi, \dot{\varphi}]^T$ là các biến trạng thái, do đó (2) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = A_1 x_1 + A_2 x_2 + B_1 (D_p h_m \alpha_1 + K_c) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: A_1, A_2, B_1 là các ma trận hệ số và được tính toán như sau:

$$\begin{aligned} A_1 &= -\frac{D_p h_m}{(M_x + \Delta M_x)}, A_2 = -\frac{2N_u}{(M_x + \Delta M_x)}, \\ B_1 &= -\frac{1}{(M_x + \Delta M_x)} \end{aligned} \quad (4)$$

Công thức (3) được viết lại dưới dạng mô hình không gian trạng thái như sau:

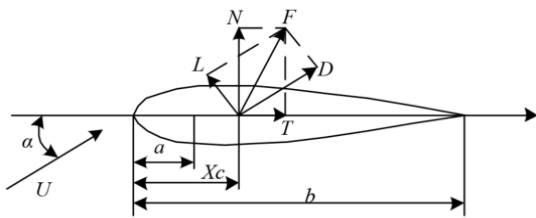
$$\dot{x}(t) = A_k x(t) + B_k u(t) + E_k d(t) \quad (5)$$

Trong đó: $A_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ A_1 & A_2 \end{bmatrix} \in R^{2 \times 2}$ là ma trận

biến trạng thái, $B_k = C_k = \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \end{bmatrix} \in R^{2 \times 1}$ là ma trận đầu vào. Ngoài ra, d biểu thị nhiễu tác động vào hệ thống, u biểu thị tín hiệu đầu vào của hệ thống, và cũng là mô men điều khiển được sinh ra bởi vây giảm lắc được mô tả trong công thức sau:

$$u(t) = K_c = 2C_{lf} l_f \cos(\alpha) \quad (6)$$

Trong đó: C_{lf} là lực nâng của vây, và l_f là lực tác động của cánh tay đòn. α biểu thị góc vây, thường được tạo bởi đường tâm của vây và trục thẳng đứng. Tham khảo các lực được sinh ra bởi vây giảm lắc chủ động như hình dưới đây.



Hình 1. Các lực sinh ra bởi vây giảm lắc chủ động

Tín hiệu đầu ra của hệ thống được đưa ra như dưới đây:

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (7)$$

Trong đó: $C = [1 \ 0]$ và $v(t)$ biểu thị nhiễu hệ thống.

3. Mô hình sóng ngẫu nhiên

Để nghiên cứu tác động của sóng biển ngẫu nhiên đối với chuyển lắc ngang của tàu, mô hình sóng biển ngẫu nhiên đã được nghiên cứu để hỗ trợ tốt nhất cho việc mô phỏng giảm lắc của tàu. Bởi vì sóng biển thường có tính chất ngẫu nhiên, phi tuyến và không ổn định, do đó, rất khó để xây dựng mô hình toán học chính xác. Hầu hết các mô hình sóng biển dựa trên hai ý tưởng: Một là ý tưởng của Goda về phân phối xác suất và một ý tưởng khác là từ Nolte-Hsu và Ewing, cụ thể là sử dụng phổ sóng băng hẹp để mô tả sóng. Đây là những ý tưởng quan trọng và là cơ sở để nghiên cứu các mô hình sóng sau này. Trong nghiên cứu của chúng tôi, dựa trên phổ JONSWAP, phổ sóng biển ngẫu nhiên được đề xuất như sau [9]:

$$S_i(\omega_a) = \frac{0.0081 \times g^2}{\omega_a^5} \exp\left(-\frac{3.11}{H_{1/3}^2 \omega_a^4}\right). \quad (8)$$

Trong đó: $H_{1/3}$ là chiều cao sóng đáng kể, ω_a là tần số của sóng biển, g là gia tốc trọng trường.

Theo lý thuyết về quá trình ngẫu nhiên, một mô hình góc dốc của sóng được mô tả như sau [10]:

$$a(t) = \sum_{l=1}^n \left(\sqrt{2S_p(\omega_a) \Delta\omega_a} \cos(\omega_{a_l} t + \mu_l) \right), \quad (9)$$

Trong đó: ω_{a_l} và μ_l biểu thị tần số sóng và pha ngẫu nhiên của sóng thứ l tương ứng. n là số lượng sóng được sử dụng để mô tả sóng ngẫu nhiên. Pha ngẫu nhiên của góc dốc sóng được chọn có giá trị biến ngẫu nhiên từ $0-2\pi$ để thuận tiện cho việc tính toán, khi đó phổ độ cao sóng và phổ năng lượng có mối quan hệ sau:

$$S_p(\omega_a) = G_1^2 G_2^2 \frac{\omega_a^4}{g^2} S_t(\omega_a), \quad (10)$$

Trong đó: G_1 và G_2 là các hệ số, giá trị của các hệ số này phụ thuộc vào hình dạng thân tàu. Trong vùng nước sâu, có tính đến mối quan hệ $\omega_a^2 = kg$, khi xem xét ảnh hưởng của tốc độ và hướng tới của sóng tới tần số sóng mà tàu gặp phải thì tần số mà tàu gặp phải được mô tả như sau:

$$\omega_e = \omega_a - \frac{\omega_a^2}{g} V \cos \beta, \quad (11)$$

Trong đó: V là tốc độ của tàu, và β là hướng sóng tới. Theo nguyên lý năng lượng tương đương, năng lượng theo tần số tự nhiên và năng lượng theo tần số sóng tới trong một khoảng tần số tác dụng lên tàu phải bằng nhau, do đó chúng ta có mối quan hệ như sau:

$$S_p(\omega_a) \Delta\omega_a = S_p(\omega_e) \Delta\omega_e. \quad (12)$$

Hay:

$$S_p(\omega_e) = \frac{\Delta\omega_a}{\Delta\omega_e} S_p(\omega_a)$$

Sau biến đổi, ta có:

$$S_p(\omega_e) = S_p(\omega_a) / \left(1 - \frac{2\omega_a}{g} V \cos \beta\right). \quad (13)$$

Vì vậy, mô hình góc dốc của sóng được mô tả như dưới đây:

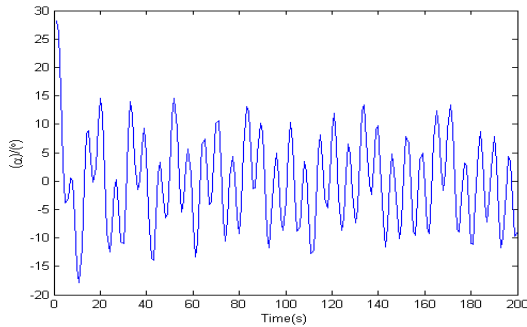
$$a_e(t) = \sum_{l=1}^n \left(\sqrt{2S_p(\omega_e) \Delta\omega_e} \cos(\omega_{e_l} t + \mu_l) \sin \beta \right). \quad (14)$$

Trong đó: ω_{e_l} và μ_l biểu thị tần số sóng mà tàu gặp phải và pha ngẫu nhiên của sóng thứ l tương ứng.

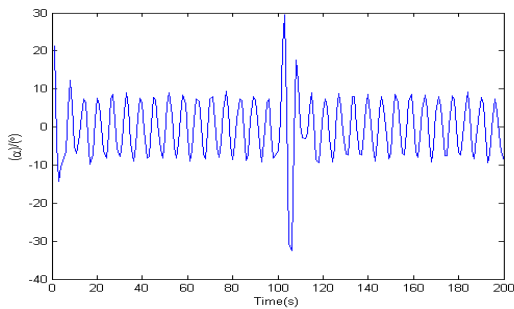
Từ (13) và (14), ta có [10]:

$$a_e(t) = \sum_{l=1}^n \left(\sqrt{2S_p(\omega_a)} \Delta\omega_a \cos(\omega_{el}t + \mu_l) \sin \beta \right) \quad (15)$$

Hình 1 là mô phỏng của sóng ngẫu nhiên với: $H_{1/3} = 5,8m, n = 28$ hướng sóng $\beta = 45^\circ, 90^\circ$ và tốc độ tàu $V = 7,8 m/s$.



Hình 2. Mô phỏng của sóng ngẫu nhiên với góc tới của sóng bằng 45°



Hình 3. Mô phỏng của sóng ngẫu nhiên với góc tới của sóng bằng 90°

4. Thiết kế bộ điều khiển tuyến tính bậc hai

Bằng cách kết hợp (5) và (7), mô hình không gian trạng thái chuyển động lắc tuyến tính của tàu được mô tả như dưới đây:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Bw(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó: $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^l$ ($0 \leq l \leq m \leq n$), $w(t)$ và $v(t)$ biểu thị nhiễu của hệ thống và nhiễu đo tương ứng. $E[ww^T] = Q$ và $E[vv^T] = R$ biểu thị phương sai của nhiễu hệ thống và nhiễu đo tương ứng.

Biểu thị $\hat{y}(t)$ là tín hiệu đầu ra lý tưởng, $y(t)$ là tín hiệu đầu ra của hệ thống. Sau đó, sai số tín hiệu ra lý tưởng và tín hiệu ra của hệ thống có thể được biểu thị như dưới đây:

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t). \quad (17)$$

Để giải bài toán điều khiển bậc hai tối ưu, chúng ta phải thiết kế $u^*(t)$ điều khiển tối ưu sao cho hàm

mục tiêu có dạng hiệu suất bậc hai như dưới đây đạt giá trị nhỏ nhất:

$$J(u) = E \left\{ \frac{1}{2} \int_0^\infty (e^T(t) Q e(t) + u^T(t) R u(t)) dt \right\}, \quad (18)$$

Trong đó: Q là ma trận bán xác định dương, và R là ma trận xác định dương.

Đối với vấn đề giảm lắc ngang, tín hiệu đầu ra lý tưởng $\hat{y}(t) = 0$, có nghĩa là chuyển động lắc ngang của tàu bằng không, và do đó sai số giữa tín hiệu ra lý tưởng và tín hiệu ra của hệ thống $e(t) = y(t) = x(t)$. Do đó, (10) được viết lại như sau:

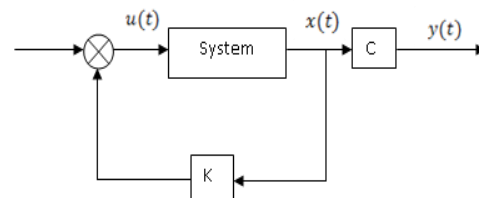
$$J(u) = E \left\{ \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)) dt \right\}. \quad (19)$$

Luật kiểm soát tối ưu LQR có thể được tính toán như sau:

$$u^*(t) = -Kx(t). \quad (20)$$

Trong (20), $K = R^{-1}B^T P$ là độ lợi của phản hồi trạng thái với P là nghiệm bán xác định dương của phương trình Riccati $PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0$. $x(t)$ là biến trạng thái của hệ thống. Phương trình Riccati có thể được giải trực tiếp bằng tay hoặc sử dụng công cụ Matlab với câu lệnh như sau:

$$\gg P = \text{care}(A, B, Q, R)$$



Hình 4. Sơ đồ hệ thống điều khiển LQR

5. Nghiên cứu mô phỏng

Bảng 1. Tham số tàu mô phỏng

Tham số	Giá trị	Đơn vị
Chiều dài tính toán	84	m
Chiều rộng	10	m
Món nước	3,2	m
Lượng giãn nước của tàu	1300	t
Diện tích vây giảm lắc	4	m ²
Cánh tay đòn lực nâng của vây	5,7	m
Hệ số lực nâng của vây	0,055	
Góc ngập nước	48	(°)
Chiều cao tâm nghiêng ban đầu	1	m
Tốc độ thiết kế	18	knots

Trong phần này, mô phỏng sẽ được thực hiện với một tàu cá cỡ nhỏ có các tham số được đưa ra như Bảng 1 [9] sử dụng ngôn ngữ lập trình Matlab.

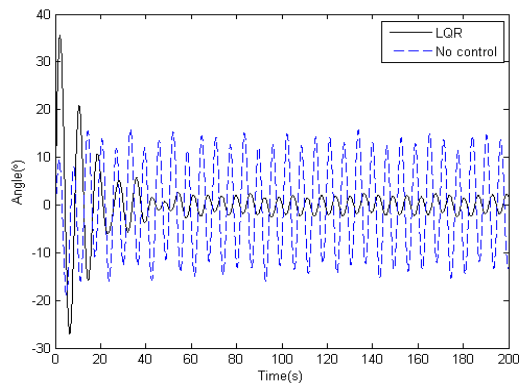
Với các tham số cho trong Bảng 1, mô hình không gian trạng thái tàu của chuyển động sự rung lắc tàu thu được như dưới đây

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.55 & -0.18 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} w(t) \quad (21)$$

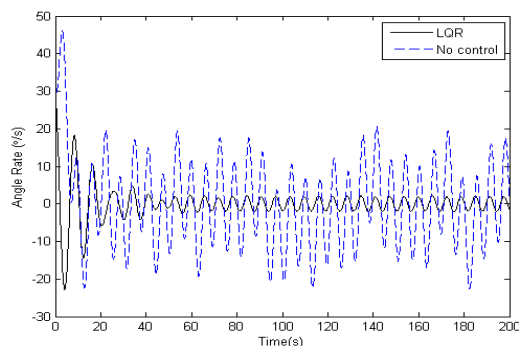
Và hàm mục tiêu của bộ điều khiển LQG có thể được thiết kế như dưới đây:

$$J(u) = E \left\{ \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \right\}. \quad (22)$$

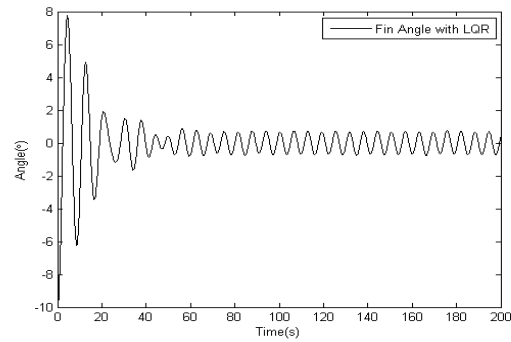
Trong đó: Q là ma trận bán xác định dương, có thể được chọn làm $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$. R là ma trận xác định dương, có thể được chọn là $R = [1]$.



Hình 5. Góc lắc của tàu khi có và không có bộ điều khiển



Hình 6. Chu kỳ lắc của tàu khi có và không có bộ điều khiển



Hình 7. Tín hiệu vào của hệ thống

Từ kết quả mô phỏng ở trên ta có thể thấy rằng: Hình 5 và 6 chỉ ra góc lắc và tốc độ lắc của tàu khi hệ thống có và không có bộ điều khiển, qua đó chúng ta có thể thấy hiệu quả giảm lắc cho tàu của phương pháp đưa ra là tương đối tốt, hệ thống nhanh chóng đạt được trạng thái ổn định, và góc lắc của tàu cũng được giảm xuống giá trị mong muốn. Hình 7 đưa ra tín hiệu điều khiển của hệ thống, kết quả cho thấy tín hiệu điều khiển có sự ổn định và nằm trong giới hạn cho phép.

6. Kết luận

Trong bài báo này, một bộ điều khiển toàn phương tuyến tính bậc hai được đưa ra cho hệ thống vây giảm lắc của tàu. Với việc áp dụng phương pháp điều khiển toàn phương tuyến tính giúp cho hệ thống đạt được sự ổn định và mạnh mẽ, giúp hệ thống đạt được hiệu quả giảm lắc như mong đợi. Ngoài ra, việc xem xét ảnh hưởng của yếu tố ngoại cảnh tác động vào hệ thống là các nhiễu sóng biển ngẫu nhiên giúp cho kết quả mô phỏng thực tế và đáng tin cậy hơn. Các kết quả mô phỏng đã được đưa ra để khẳng định hiệu quả giảm lắc tốt của phương pháp được đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Perez, *Course keeping and roll stabilisation using rudder and fins*, London, Springer-Verlag, 2005.
- [2] Allan, J.F., *Stabilisation of ships by activated fins*, Transactions of the Royal Institution of Naval architects RINA 87, pp.123-159, 1945.
- [3] Zilin Zhang, *Design and simulation research of anti-rolling tanks system*, international conference on computer technologies in physical and engineering applications ICCTPEA, pp.213-214, 2014.
- [4] Alarcin, Fuat, *Rudder roll stabilization for fishing vessel using neural network approach*, Ocean engineering, Vol.34(13), pp.1811-1817, 2007.

- [5] D. W. Tank and J. J. Hopfield, *Simple neural optimization networks: An A/D converter, signal decision circuit, and a linear programming circuit*, IEEE Trans. Circuits Syst, Vol. CAS-33, pp. 533-541, May 1986.
- [6] Hui Li, Chen Guo, *Adaptive fuzzy sliding mode controller design for ship fin stabilizer under rough sea conditions*, IEEE international conference on information and automation ICIA, pp.566-571, 2014.
- [7] Shuai Sun, Jiangqiang Hu, *Design of simplified fuzzy controller for ship fin stabilizer*, Proceedings of the 33rd Chinese control conference, pp.4534-4538, 2014.
- [8] Jin Hongzhang, Zhang Xiaofei, Luo Yanming, Li Dongsong, *An adaptive control system design for fin stabilization at zero speed using improved genetic algorithms*, Journal of Harbin Engineering University, Vol.29, No.4, pp. 368-373, 2008.
- [9] Songtao Zhang, Peng Zhao, Lihua Liang, *LQR-based ship roll reduction control using fin stabilizer*, IEEE international conference on mechatronics and automation ICMA, pp.1031-1036, 2018.
- [10] Bai Weiwei, *Control of ship fin stabilizer in the presence of input saturation*, A master thesis submitted to Dalian Maritime University, pp. 9-10, 2014.

Ngày nhận bài:	17/3/2021
Ngày nhận bản sửa:	19/4/2021
Ngày duyệt đăng:	04/5/2021