

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU THAM SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID CHO ỔN ĐỊNH QUỸ ĐẠO TÀU THỦY SỬ DỤNG THUẬT GIẢI DI TRUYỀN RESEARCH ON PARAMETER OPTIMIZATION FOR PID CONTROLLER TO STABILIZE SHIP TRAJECTOR USING GENETIC ALGORITHM

NGUYỄN VĂN TIẾN*, ĐỖ KHẮC TIỆP

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

Tóm tắt

Việc điều khiển hướng tàu thủy một cách chính xác và ổn định là yếu tố quan trọng đảm bảo an toàn hàng hải và hiệu quả vận hành. Bộ điều khiển PID đã được ứng dụng rộng rãi trong hệ thống lái tự động của tàu thủy, tuy nhiên, việc tinh chỉnh các tham số của bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) để đạt được hiệu suất tối ưu trong điều kiện làm việc phức tạp và thay đổi liên tục là một thách thức lớn. Để khắc phục những hạn chế trên, bài báo đề xuất sử dụng thuật toán di truyền GA (Genetic algorithm) để tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển PID, tạo thành bộ điều khiển GA-PID nhằm mục tiêu cải thiện chất lượng bộ điều khiển. Qua đó, nghiên cứu này đóng góp vào việc nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống lái tự động tàu thủy.

Từ khóa: Mô hình MMG, MATLAB & Simulink thuật giải di truyền, PID, Ziegler-Nichols.

Abstract

Accurate and stable ship heading control is crucial for ensuring maritime safety and operational efficiency. PID controllers have been widely used in ship autopilot systems, however, fine-tuning the PID controller parameters to achieve optimal performance in complex and constantly changing operating conditions is a major challenge. To overcome the above limitations, this paper proposes the use of a Genetic Algorithm (GA) to optimize the parameters of the PID controller, forming a GA-PID controller to improve the quality of the controller. Thereby, this study contributes to improving the performance and reliability of the ship's autopilot system.

Keywords: MMG, MATLAB & Simulink, Genetic algorithms, PID, Ziegler-Nichols.

1. Mở đầu

Trong lĩnh vực hàng hải, việc điều khiển tàu thủy di chuyển chính xác và ổn định trên quỹ đạo mong muốn là một vấn đề quan trọng và đầy thách thức. Đặc biệt, trong điều kiện môi trường biển phức tạp với sự tác động của sóng, gió, dòng chảy, việc duy trì quỹ đạo ổn định cho tàu thủy càng trở nên khó khăn hơn. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các hệ thống điều khiển tự động hiệu quả cho tàu thủy luôn là một chủ đề thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học và kỹ sư hàng hải [1, 2, 3, 4].

Bộ điều khiển PID là một trong những bộ điều khiển phổ biến nhất được ứng dụng trong điều khiển tự động tàu thủy. Với cấu trúc đơn giản và hiệu quả bộ điều khiển PID đã được chứng minh là một giải pháp hiệu quả cho bài toán ổn định quỹ đạo tàu thủy. Tuy nhiên, hiệu quả điều khiển của bộ điều khiển PID phụ thuộc rất lớn vào việc lựa chọn các tham số K_p , K_i và K_d . Việc xác định các tham số này thường dựa trên kinh nghiệm của người vận hành hoặc các phương pháp thực nghiệm, điều này có thể dẫn đến kết quả không tối ưu, thậm chí gây mất ổn định cho hệ thống.

Để khắc phục hạn chế trên, nhiều phương pháp tối ưu hóa đã được nghiên cứu và ứng dụng trong việc tinh chỉnh tham số cho bộ điều khiển PID. Trong số đó, thuật giải di truyền GA [1, 5] nổi lên như một phương pháp tiềm năng với khả năng tìm kiếm giải pháp tối ưu trong không gian tham số rộng lớn và phức tạp.

Bài báo nghiên cứu sử dụng thuật giải di truyền để tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển PID xung quanh giá (K_p , K_i , K_d) tìm được bằng phương pháp Ziegler-Nichols. Điều đó có nghĩa là thuật giải GA sẽ được áp dụng để hiệu chỉnh giá trị của bộ điều khiển PID nhằm đáp ứng được mục tiêu là nâng cao chất lượng điều khiển. Mục tiêu này được cụ thể hóa bằng hàm tích phân của sai lệch tuyệt đối IAE (Integral of Absolute Error).

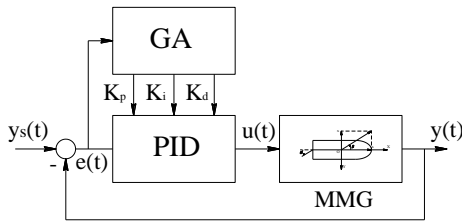
Bài báo được tổ chức thành các phần chính sau: Phần 1: Mở đầu giới thiệu về vấn đề nghiên cứu, tính cấp thiết, mục tiêu, phạm vi và bố cục của bài báo; Phần 2: Trình bày mô hình toán học của hệ thống điều

khiển quỹ đạo tàu thủy; Phần 3: Đề xuất giải thuật di truyền để tối ưu tham số PID; Phần 4: Kết quả mô phỏng và đánh giá; Phần 5: Kết luận của nghiên cứu.

2. Mô hình hóa hệ thống điều khiển quỹ đạo tàu thủy

2.1. Cấu trúc điều khiển

Hình 1 mô tả cấu trúc của hệ thống điều khiển quỹ đạo tàu thủy. Trong đó: $y_s(t)$ là hướng đặt; $y(t)$ là hướng thực tế của tàu; $e(t) = y_s(t) - y(t)$ là sai lệch điều khiển; $u(t)$ đầu ra bộ điều khiển; MMG (Maneuvering Modeling Group) mô hình động lực học của tàu thủy.



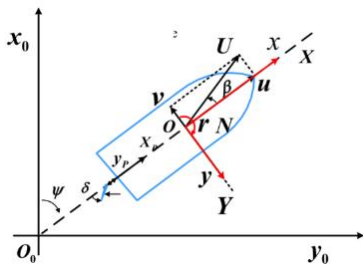
Hình 1. Mô hình cấu trúc hệ thống điều khiển

Sơ đồ Hình 1, mô tả một hệ thống điều khiển hồi tiếp sử dụng bộ điều khiển PID để điều khiển quỹ đạo tàu thủy. Đầu vào của PID là sai lệch điều khiển, đầu ra của PID là giá trị góc bánh lái cần thiết để điều khiển tàu đi đúng hướng đặt. Sai lệch $e(t)$ là đầu vào của thuật giải GA là cơ sở để tối ưu hóa thông số K_p , K_i và K_d .

2.2. Mô hình MMG tàu thủy

MMG là một nhóm các chuyên gia quốc tế về mô hình hóa chuyển động của tàu thủy. MMG đã phát triển một mô hình toán học tiêu chuẩn để mô phỏng chuyển động của tàu, được gọi là "mô hình MMG". Mô hình này dựa trên các phương trình động lực học và thủy động lực học, cho phép dự đoán chuyển động của tàu trong các điều kiện khác nhau.

Xét hệ tọa độ gắn với thân tàu như Hình 2, trong đó X, Y, N lần lượt là các lực và mô men tác động lên tàu theo các hướng khác nhau; u, v, r là các vector vận tốc của tàu theo phương dọc, ngang và thẳng đứng; δ là góc bánh lái; ψ hướng mũi tàu.



Hình 2. Các hệ tọa độ của tàu trong chuyển động

Theo mô hình MMG, phương trình điều khiển của tàu được thể hiện dưới dạng sau [3]:

$$\begin{cases} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr = X_H + X_P + X_R + X_W \\ (m + m_y)\dot{v} - (m + m_x)ur = Y_H + Y_P + Y_R + Y_W \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_N + N_P + N_R + N_W - Y_{xc} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó $m, m_x, m_y, I_{zz}, J_{zz}$ lần lượt là khối lượng tàu, khối lượng bổ sung theo phương dọc, phương ngang, mô men quán tính; Y_{xc} mô men lực hướng tâm. H, P, R, W là ký hiệu cho thân tàu, chân vịt, bánh lái và gió.

Khi góc đặt của tàu nhỏ hơn 30° , theo [3] các mô men tác động lên thân tàu được thể hiện bằng phương trình (2):

$$\begin{cases} X_H = X(u) + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \\ Y_H = Y_vv + Y_r r + Y_{vv}v + Y_{rr}r + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}r^2 \\ N_H = N_vv + N_r r + N_{vv}v + N_{rr}r + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}r^2 \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó $X(u)$ lực đại diện cho độ nhớt của nước tác động dọc thân tàu; X_{vv}, X_{vr}, X_{rr} mô men cản của nước tỉ lệ thuận với tốc độ tàu; Y_v, Y_r, N_v, N_r mô men cản phi tuyến tác động lên tàu khi chuyển động; $Y_{vvr}, Y_{vrr}, N_{vvr}, N_{vrr}, Y_{rr}, N_{vv}$ và N_{rr} là các hệ số được xác định bằng thực nghiệm [3].

Các lực và mô men thủy động lực học do bánh lái tạo ra có thể được biểu thị như sau:

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R = -(1 - a_H)F_N \cos \delta \\ N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: t_R là hệ số trừ lực lái; a_H là hệ số tăng lực lái; x_R là tọa độ dọc của bánh lái; x_H là tọa độ dọc của điểm tác động của thành phần lực ngang bổ sung do bánh lái gây ra; F_N là lực pháp tuyến của bánh lái.

Sự nhiễu loạn của gió có tác động lớn hơn đến sự an toàn của tàu. Mô hình nhiễu loạn của gió được thể hiện bởi công thức (4).

$$\begin{cases} X_{wind} = 0.5\rho_a A_f U_R^2 C_{wx}(\alpha_R) \\ Y_{wind} = 0.5\rho_a A_s U_R^2 C_{wy}(\alpha_R) \\ N_{wind} = 0.5\rho_a A_s L_{oa} U_R^2 C_{wn}(\alpha_R) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó $C_{wx}(\alpha_R)$, $C_{wy}(\alpha_R)$ và $C_{wn}(\alpha_R)$ được tính bằng cách sử dụng phương trình hồi quy Isherwood như đã đề cập trong [3].

2.2. Thiết kế bộ điều khiển PID theo phương pháp Ziegler-Nichols

Bộ điều khiển PID là một loại bộ điều khiển kết hợp từ ba thành phần điều khiển: tỷ lệ, tích phân và vi phân để tính toán tín hiệu điều khiển dựa trên sai số giữa giá trị mong muốn và giá trị đo được. Phương trình của bộ điều khiển PID được xác định bởi (5). Trong đó, K_p hệ số tỷ lệ; T_c và T_v là hằng số thời gian chậm sau và hằng số thời gian vượt trước.

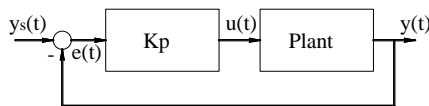
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_c} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_v \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

với:

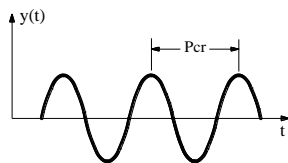
$$K_i = \frac{K_p}{T_c}; \quad K_d = K_p T_v$$

Có nhiều phương pháp để xác định bộ tham số K_p , K_i , K_d , trong đó phương pháp Ziegler-Nichols là một phương pháp kinh điển để thiết kế bộ điều khiển PID.

Mô hình MMG là khâu bậc cao sẽ phù hợp với phương pháp Ziegler-Nichols 2 thay vì Ziegler-Nichols 1. Trong phương pháp Ziegler-Nichols 2, đặt $T_c = \infty$ và $T_v = 0$, chỉ sử dụng khâu điều khiển tỷ lệ như Hình 3. Thực hiện tăng K_p từ 0 đến giá trị tới hạn K_{cr} mà đầu ra bị dao động, qua đó xác định được chu kỳ P_{cr} dao động như Hình 4.



Hình 3. Cấu trúc thực nghiệm để xác định thông số PID theo phương pháp Ziegler-Nichols 2



Hình 4. Xác định hệ số P_{cr} từ đáp ứng

Ziegler và Nichols đề xuất rằng chúng ta đặt giá trị của các tham số K_p , T_c và T_v theo công thức cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Xác định K_p , K_i , K_d theo Ziegler-Nichols

Loại bộ điều khiển	K_p	T_c	T_v
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$0.83P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Nguồn: [6]

Trong nghiên cứu này, các thông số thủy động lực của tàu phở phòng được liệt kê trong Bảng 2.

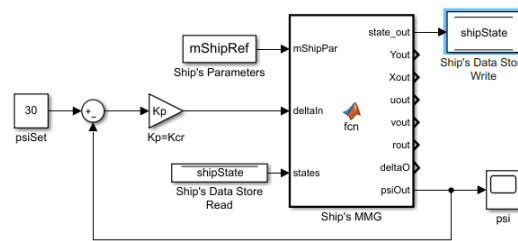
Bảng 2. Thông số tàu mô phỏng trong nghiên cứu

Thông số	Giá trị
Độ dài	103 (m)
Chiều rộng	15.6 (m)
$X(u)$	-0.5012
X_{vv}	0.183
Y_v	0.2496
Y_r	0.0542
Y_{vv}	0.8755
Y_{rr}	-0.0028
Y_{vr}	0.8937
Y_{rv}	0.1379
N_r	-0.0488
N_{vv}	-0.0782
N_{rr}	-0.0430
N_{vvr}	-0.0480
N_{rvv}	-0.3789

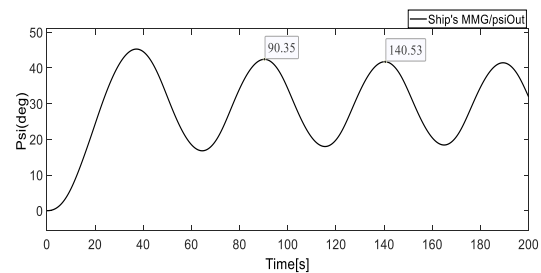
Nguồn: [4]

Mô hình MMG của tàu được xây dựng bằng m-file theo các phương trình (1), (2), (3) và (4), trong mô hình của nghiên cứu này giả thiết bỏ qua sự ảnh hưởng của yếu tố gió và dòng chảy. Đầu vào mô hình là góc bánh lái δ , đầu ra là hướng tàu Ψ .

Cấu trúc mô phỏng Simulink như trên Hình 5. Khi K_p tăng tới giá trị 4,69, đáp ứng đầu ra có dạng dao động như Hình 6.

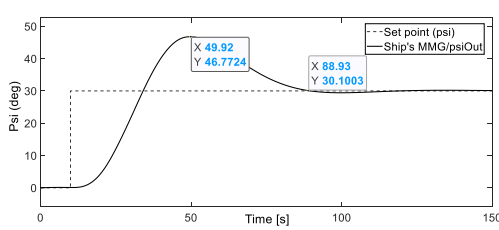


Hình 5. Sơ đồ mô phỏng trên Simulink với hướng đặt cho tàu $\Psi=30^\circ$



Hình 6. Đáp ứng của hướng tàu khi $K_p=4.69$

Theo Bảng 1, thì cần chọn bộ điều khiển PID có: $K_p=2,814$; $T_c=2,09$; $T_v=6,272$. Kết quả mô phỏng với bộ thông số tìm được thể hiện như Hình 7.



Hình 7. Đáp ứng hướng tàu khi giá trị đặt 30° với thông số bộ điều khiển $K_p=2,814$, $T_c=25,09$, $T_v=6,272$

Kết quả cho thấy độ quá điều chỉnh là 66,4%, thời gian xác lập là 78,93 giây. Có thể thấy đáp ứng của bộ có độ quá điều chỉnh lớn, điều này gây ảnh hưởng đến độ chính xác của quỹ đạo điều khiển. Trong nghiên cứu tiếp theo sẽ trình bày giải thuật di truyền GA để tối ưu hóa các thông số của bộ điều khiển PID nói trên.

3. Đề xuất sử dụng giải thuật di truyền cải thiện chất lượng bộ điều khiển PID

Giải thuật di truyền GA là một thuật toán tìm kiếm và tối ưu hóa dựa trên các nguyên tắc của quá trình tiến hóa tự nhiên, như di truyền, đột biến, lai ghép và chọn lọc tự nhiên, nguyên lý của thuật giải được trình bày chi tiết trong [1, 5].

Từ kết quả mô phỏng như trên Hình 7, thấy rằng đáp ứng có độ quá điều chỉnh lớn, các giá trị này cần phải được tinh chỉnh lại bằng thực nghiệm, mất nhiều thời gian. Mục tiêu của phần nghiên cứu này nhằm hỗ trợ quá trình tinh chỉnh trên bằng giải thuật giải GA.

3.1. Lựa chọn hàm mục tiêu

Để giảm độ quá điều chỉnh ra cần thu hẹp phần diện tích giới hạn giữa đường đáp ứng và đường tín hiệu đặt. Gọi $e(t)$ là sai lệch giữa tín hiệu đáp ứng và tín hiệu đặt khi đó hàm mục tiêu của thuật giải GA trong trong bài toán này được định nghĩa như sau:

$$J_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (6)$$

Vai trò của giải thuật GA là tìm kiếm các giá trị (K_{p_GA} , K_{i_GA} , K_{d_GA}) tối ưu, mà tại đó hàm số J_{IAE} đạt cực tiểu.

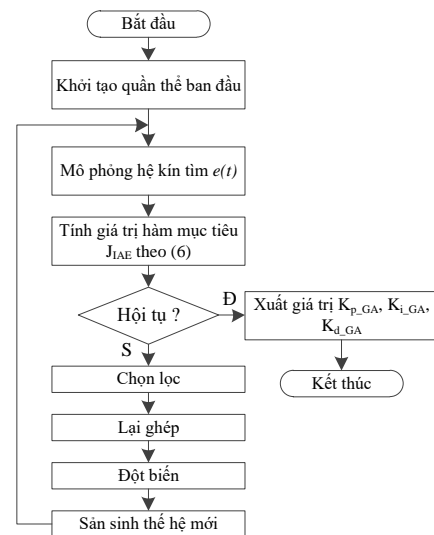
Để giới hạn không gian tìm kiếm của giải thuật GA (qua đó tăng tốc độ tìm kiếm) thì ta giả thiết rằng giá trị tối ưu (K_{p_GA} , K_{i_GA} , K_{d_GA}) sẽ là các giá trị nằm trong phạm vi $\pm 30\%$ xung quanh giá trị được xác định theo Ziegler-Nichols 2. Nếu vùng không gian tìm

kiếm này quá nhỏ có thể dẫn tới không tìm được giá trị tối ưu, nếu vùng tìm kiếm quá lớn thì tốc độ tìm kiếm sẽ chậm. Kết quả mô phỏng trên mô hình hệ thống cho thấy giá trị $\pm 30\%$ là phù hợp.

3.2. Giải thuật di truyền

Giải thuật GA được tích hợp trong phần mềm Matlab & Simulink thông qua Genetic Algorithm Toolbox. Trong bài báo này sẽ không trình bày về giải thuật GA mà chỉ được sử dụng như một công cụ để giải bài toán tối ưu, nhằm thu được các giá trị (K_{p_GA} , K_{i_GA} , K_{d_GA}) thỏa mãn hàm mục tiêu (6).

Lưu đồ thuật giải GA để tìm kiếm giá trị tối ưu cho bộ điều khiển PID được mô tả như trên Hình 8.



Hình 8. Lưu đồ thuật giải GA tìm tham số cho bộ điều khiển PID

Các tham số khởi tạo cho GA trong nghiên cứu này được chọn lựa như sau: Kích thước quần thể là 10, tần suất lai ghép 0,7; xác suất đột biến được điều chỉnh thích nghi trong khoảng từ 0,01 đến 0,1, quá trình tiến hóa được thực hiện qua 40 thế hệ. Kết quả sau khi thực hiện thuật giải GA sẽ thu được bộ tham số (K_{p_GA} , K_{i_GA} , K_{d_GA}) như trong Bảng 3.

Bảng 3. So sánh kết quả Ziegler-Nichols 2 và GA

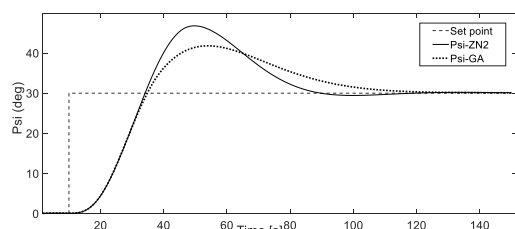
Thông số	Ziegler-Nichols 2	GA
Kp	2.814	3.151
Ki	0.122	0.095
Kd	17.649	26.474

Có thể thấy rằng bộ thông số (K_{p_GA} , K_{i_GA} , K_{d_GA}) đạt được do sử dụng thuật giải GA chỉ dao động trong một phạm vi nhỏ so với Ziegler-Nichols 2, cụ thể hệ

số tỉ lệ tăng 12%, hệ số tích phân giảm 15% và hệ số vi phân tăng 50%.

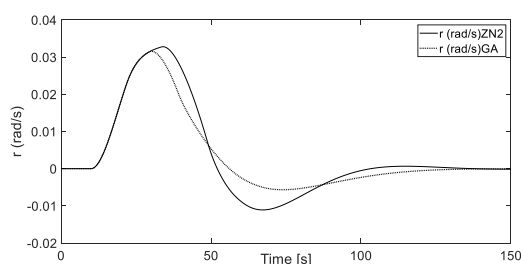
4. Kết quả mô phỏng

Các kết quả được mô phỏng bằng phần mềm Simulink 2020. Các đáp ứng của bộ điều khiển PID theo Ziegler-Nichols 2 và GA được vẽ trên cùng đồ thị để so sánh chất lượng điều khiển.



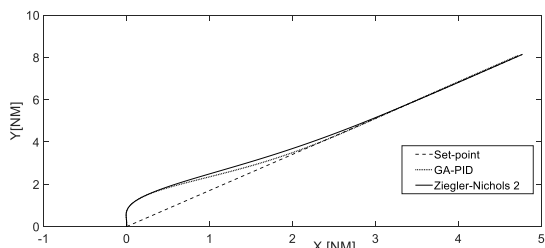
Hình 9. So sánh đáp ứng của hướng tàu giữa bộ điều khiển theo Ziegler-Nichols 2 và GA khi góc đặt $\Psi=30^\circ$

Từ kết quả trên Hình 9 ta thấy, bộ điều khiển PID được tối ưu bằng giải thuật GA có độ quá điều chỉnh thấp hơn theo phương pháp Ziegler-Nichols 2. Bằng phép tính cơ bản cho thấy độ quá điều chỉnh giảm được 16.7%, trong khi đó thời gian xác lập tăng lên.



Hình 10. Tốc độ bẻ lái khi Ψ thay đổi từ 0° thành 30°

Trên Hình 10 cho ta góc nhìn khác về bộ điều khiển GA-PID. Trong cùng chế độ điều động thì bộ điều khiển GA-PID cần tốc độ bẻ lái thấp hơn và ít dao động hơn so với bộ điều khiển Ziegler-Nichols 2. Điều này giúp giảm mức độ tiêu hao năng lượng và giảm sức ép lên hệ thống truyền động bánh lái.



Hình 11. So sánh quỹ đạo chuyển động của tàu khi sử dụng GA-PID và Ziegler-Nichols 2

Ngoài ra với bộ điều khiển GA-PID cho độ bám quỹ đạo tốt hơn và nhanh hơn so với bộ điều khiển Ziegler-Nichols 2 được thể hiện trên Hình 11.

5. Kết luận

Bài báo trình bày một phương pháp tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển PID xung quanh giá trị Ziegler-Nichols 2 bằng giải thuật GA. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển GA-PID có độ quá điều chỉnh và tốc độ bẻ lái thấp so với Ziegler-Nichols 2. Tuy nhiên, thời gian xác lập lại chậm hơn, điều này có thể khắc phục bằng cách thay đổi hàm mục tiêu hoặc thêm hệ số phụ thuộc thời gian vào hàm mục tiêu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.60.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Liu gai ye, et al. (2017), *Genetic Algorithm's Application for Optimization of PID Parameters in Dynamic Positioning Vessel*, MATEC Web of Conference, Vol.139.
- [2] Van-Suong Nguyen, et al. (2018), *Development of Automatic Ship Berthing System Using Artificial Neural Network and Distance Measurement System*, International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems Vol.18, No. 1, pp.41-49.
- [3] Qiang Zhang, et al. (2017), *Ship nonlinear-feedback course keeping algorithm based on MMG model driven by bipolar sigmoid function for berthing*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering Vol.9, pp.525-536.
- [4] Nam-Kyun Im, Van-Suong Nguyen (2018), *Artificial neural network controller for automatic ship berthing using head-up coordinate system*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.10, pp.235-249.
- [5] Jimin Zhao, Miao Xi (2020), *Self-Tuning of PID Parameters Based on Adaptive Genetic Algorithm*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol.782.
- [6] Katsuhiko Ogata (2002), *Modern Control Engineering (Fourth Edition)*, University of Minnesota, pp.681-685.

Ngày nhận bài:	09/02/2025
Ngày nhận bản sửa:	25/02/2025
Ngày duyệt đăng:	26/02/2025