

Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền (GA) cho bài toán điều chỉnh sức căng trên tời tàu thủy

Genetic Algorithm-based Optimization of a PID Controller for Marine Winch Tension Control

> **KS ĐẶNG THỊ THU HẰNG¹, THS BÙI MINH TUẤN¹, TS ĐỖ KHẮC TIỆP^{2,*}**

¹Viện Kỹ thuật Hải quân

²Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email: dokhactiep@vamaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày việc ứng dụng giải thuật di truyền (GA) để tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển PID (K_p , K_i , K_d) cho bài toán điều chỉnh sức căng trên hệ thống tời tàu thủy. Hệ thống tời trên tàu thủy đóng vai trò quan trọng trong các hoạt động hàng hải, đòi hỏi khả năng điều khiển sức căng dây chính xác để đảm bảo an toàn và hiệu quả. Tuy nhiên, các bộ điều khiển PID kinh điển thường không đáp ứng được yêu cầu vận hành trong môi trường thực tế do đáp ứng chậm, độ vọt lố cao, đặc biệt là kém ổn định khi chịu tác động phức tạp từ sóng và gió. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu đề xuất ứng dụng Giải thuật di truyền (GA) để tối ưu hóa bộ thông số (K_p , K_i , K_d) cho bộ điều khiển PID, nhằm nâng cao chất lượng điều khiển cho hệ thống. Kết quả mô phỏng trong các kịch bản khác nhau, bao gồm cả khi có nhiễu và thay đổi tải trọng, đã chứng minh hiệu quả vượt trội của bộ điều khiển GA-PID. So với bộ PID kinh điển, bộ điều khiển được tối ưu hóa cho thấy đáp ứng nhanh hơn, giảm thiểu đáng kể độ vọt lố, đồng thời thể hiện khả năng kháng nhiễu và tính bền vững xuất sắc, duy trì sức căng gần như không đổi trước các tác động ngoại cảnh.

Từ khóa: Giải thuật di truyền; bộ điều khiển PID; điều khiển sức căng; Matlab/simulink.

ABSTRACT

This paper presents the application of Genetic Algorithm (GA) to optimize the parameters of PID controller (K_p , K_i , K_d) for the problem of tension adjustment on ship winch system. Ship winch system plays an important role in maritime activities, requiring the ability to accurately control the rope tension to ensure safety and efficiency. However, classic PID controllers often do not meet the requirements of operation in real environments due to slow response, high overshoot and especially poor stability when subjected to complex impacts from waves and wind. To solve this problem, the study proposes the application of Genetic Algorithm (GA) to optimize the parameter set (K_p , K_i , K_d) for PID controller, in order to improve the control quality of the system. Simulation results in different scenarios, including disturbances and load changes, have demonstrated the superior performance of GA-PID controller. Compared with the classical PID, the optimized controller shows faster response, significantly reduces overshoot, and exhibits excellent noise immunity and robustness, maintaining a nearly constant tension under external impacts.

Keywords: Genetic algorithm; PID controller; tension control; Matlab/simulink.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các hoạt động hàng hải, hệ thống tời tàu thủy đóng một vai trò thiết yếu, đảm bảo an toàn và ổn định trong các quy trình quan trọng như neo đậu và lái dạt [1, 2, 3]. Tầm quan trọng của việc vận hành chính xác các thiết bị này được nhấn mạnh trong các hướng dẫn của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) và các phân tích rủi ro chuyên sâu đã chỉ ra rằng hoạt động neo buộc tàu là một

trong những quy trình tiềm ẩn nhiều nguy cơ nhất. Việc duy trì một lực căng dây không đổi là cực kỳ quan trọng, bởi sự biến động đột ngột, gây ra bởi các yếu tố môi trường như sóng dài có thể làm thay đổi chuyển động của tàu và dẫn đến các sự cố nguy hiểm [4]. Do đó, việc giám sát lực căng và tự động hóa hệ thống neo đang là xu hướng tất yếu của ngành Hàng hải hiện đại.

Để giải quyết bài toán này, bộ điều khiển PID từ lâu đã là giải

pháp phổ biến trong công nghiệp nhờ cấu trúc đơn giản và đáng tin cậy, dựa trên các nguyên tắc cơ bản về động lực học của kết cấu nổi. Mặc dù vậy, hiệu quả của nó phụ thuộc hoàn toàn vào việc lựa chọn bộ thông số (Kp, Ki, Kd) [5]. Các phương pháp kinh điển như Ziegler-Nichols (1942) tuy đặt nền móng cho việc chỉnh định tự động nhưng lại bộc lộ nhiều nhược điểm khi áp dụng vào các hệ thống phức tạp, thường cho ra một hệ thống có độ vọt lố cao và dao động kéo dài, điều không thể chấp nhận được trong một ứng dụng đòi hỏi độ chính xác và an toàn cao như điều khiển tời. Nhằm khắc phục những hạn chế này, cộng đồng nghiên cứu đã hướng đến việc áp dụng các phương pháp điều khiển thông minh. Các công trình tiên phong đã khám phá tiềm năng của bộ điều khiển logic mờ (Fuzzy PID) và mạng nơ-ron mờ (BP fuzzy neural network PID) [7] để điều khiển sức căng tời. Tuy nhiên, một hạn chế cố hữu của các phương pháp này là chúng đòi hỏi kiến thức chuyên gia sâu rộng để xây dựng một bộ luật mờ hiệu quả, điều không phải lúc nào cũng có sẵn.

Nhận thấy khoảng trống này, bài báo đề xuất một giải pháp thay thế mạnh mẽ: Ứng dụng Giải thuật di truyền (GA) để tối ưu hóa tự động bộ thông số PID. Khác với các phương pháp dựa trên luật mờ, GA là một thuật toán tìm kiếm toàn cục, không yêu cầu kiến thức chuyên sâu về hệ thống, mà thay vào đó nó tự động "học" để tìm ra bộ thông số tối ưu nhất dựa trên một hàm mục tiêu định sẵn. Mục tiêu của nghiên cứu là chứng minh rằng bộ điều khiển GA-PID mang lại hiệu suất vượt trội về tốc độ đáp ứng, độ ổn định và tính bền vững trước sự thay đổi của tải trọng, qua đó nâng cao đáng kể mức độ an toàn và hiệu quả cho hệ thống tời tàu thủy.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA HỆ THỐNG

Để phân tích và thiết kế bộ điều khiển, chúng ta cần xây dựng một mô hình toán học mô tả các đặc tính động học của hệ thống tời. Mô hình được xây dựng dựa trên các định luật vật lý cơ bản, áp dụng cho từng thành phần của hệ thống. Giả định hệ thống thực hiện nhiệm vụ nâng một vật có khối lượng ML theo phương thẳng đứng.

2.1. Mô hình toán của bộ truyền động sử dụng động cơ điện một chiều

Động cơ điện một chiều kích từ độc lập (hoặc nam châm vĩnh cửu) là bộ phận chấp hành chính. Mô hình của nó bao gồm phương trình điện và phương trình cơ.

Phương trình mạch phản ứng: Dựa trên định luật Kirchhoff về điện áp (KVL), ta có:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \tag{1}$$

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_e \psi_{ds} \end{cases} \tag{2}$$

Phương trình mô-men và sức điện động phản kháng: Mô-men điện từ sinh ra bởi động cơ tỷ lệ thuận với dòng điện phản ứng và sức điện động phản kháng tỷ lệ thuận với tốc độ góc của rotor.

$$T_e(t) = K_t i_a(t) \tag{3}$$

$$e_b(t) = K_b \omega_m(t) \tag{4}$$

Trong đó:

- $V_a(t)$ - Điện áp đầu vào đặt vào phần ứng (V);
- $i_a(t)$ - Dòng điện phần ứng (A);
- $T_e(t)$ - Mô-men điện từ do động cơ sinh ra (Nm);
- $\omega_m(t)$ - Tốc độ góc của rotor động cơ (rad/s);
- $e_b(t)$ - Sức điện động phản kháng (V);

- R_a, L_a - Điện trở (Ω) và điện cảm (H) của cuộn dây phần ứng;
- K_t - Hằng số mô-men của động cơ (Nm/A);
- K_b - Hằng số sức điện động phản kháng (V.s/rad).

2.2. Mô hình hệ thống cơ khí

Mô hình này mô tả toàn bộ các bộ phận quay của tời, bao gồm rotor động cơ, hộp số giảm tốc và tang cuốn cáp. Bằng cách áp dụng Định luật II Newton cho chuyển động quay và quy đổi tất cả các tham số (mô-men quán tính, ma sát) về một trục quy chiếu duy nhất (thường là trục động cơ), ta có thể thiết lập một phương trình vi phân duy nhất mô tả quan hệ giữa mô-men động cơ, mô-men cản của tải và tốc độ góc của hệ thống.

Áp dụng định luật II Newton cho chuyển động quay của toàn hệ thống và quy đổi về trục động cơ:

$$T_e(t) - T_{Lm}(t) = J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_{eq} \omega_m(t) \tag{5}$$

Trong đó:

- $T_{Lm}(t)$ - Mô-men cản của tải quy đổi về trục động cơ (Nm);
- J_{eq} - Mô-men quán tính tổng hợp của hệ thống quy đổi về trục động cơ (kg.m²);
- B_{eq} - Hệ số ma sát nhớt tổng hợp quy đổi về trục động cơ (Nm.s/rad).

Sức căng dây cáp F_L khi nâng tải M_L theo phương thẳng đứng bao gồm thành phần tĩnh (trọng lực) và thành phần động (lực quán tính):

$$F_L(t) = M_L g + M_L a_L(t) = M_L g + M_L \frac{dv_L(t)}{dt} \tag{6}$$

Vận tốc dài của tải v_L liên hệ với tốc độ góc của động cơ ω_m qua bán kính tang cuốn R và tỷ số truyền hộp số i :

$$v_L(t) = \frac{\omega_m(t) \cdot R}{i} \Rightarrow \frac{dv_L(t)}{dt} = \frac{R d\omega_m(t)}{i dt} \tag{7}$$

Thay thế vào phương trình sức căng, ta có mô-men cản quy đổi về trục động cơ:

$$T_{Lm}(t) = \frac{F_L(t)}{i} \cdot R = \frac{(M_L g + M_L \frac{R d\omega_m(t)}{i dt}) R}{i} = \frac{M_L g R}{i} + \frac{M_L R^2}{i^2} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \tag{8}$$

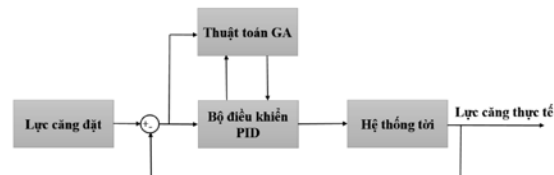
Thay $T_{Lm}(t)$ vào phương trình động lực học quay, ta được:

$$T_e(t) - \frac{M_L g R}{i} = (J_m + J_d + \frac{M_L R^2}{i^2}) \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_{eq} \omega_m(t) \tag{9}$$

Ở đây, ta đã định nghĩa mô-men quán tính tương đương $J_{eq} = J_m + J_d + \frac{M_L R^2}{i^2}$, bao gồm mô-men quán tính của rotor động cơ (J_m), của tang và hộp số (J_d) và của tải trọng quy đổi về.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN GA-PID

Cấu trúc của hệ thống điều khiển GA-PID được mô tả trong sơ đồ Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển GA-PID cho hệ thống tự động duy trì sức căng dây tời trên tàu thủy

3.1. Thiết kế bộ điều khiển PID

Phương trình toán học mô tả tín hiệu ra $u(t)$ của bộ điều khiển PID trong miền thời gian là:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{10}$$

Để thiết kế bộ điều khiển PID kinh điển cho hệ thống tời, bước đầu tiên và quan trọng nhất là lựa chọn một phương pháp hiệu quả để xác định bộ ba thông số K_p, K_i, K_d . Đối với bộ điều khiển PID cho hệ thống tự động duy trì sức căng dây tời, các thông số của bộ điều khiển được lựa chọn dựa trên phương pháp Ziegler-Nichols.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển GA-PID

Việc xây dựng thuật toán di truyền (GA) để tối ưu hóa bộ điều khiển PID cho hệ thống tời bao gồm 4 bước cấu thành cơ bản: Mã hóa nhiệm vụ sắc thể, xây dựng hàm thích nghi để đánh giá, lựa chọn các toán tử di truyền và thiết lập các tham số cho thuật toán. Mỗi bước đóng một vai trò quan trọng trong việc định hướng quá trình tìm kiếm đến bộ thông số (K_p, K_i, K_d) tối ưu nhất. Lưu đồ thuật toán của bộ điều khiển GA-PID được mô tả như Hình 2.

* *Xác định tham số và không gian tìm kiếm*: Ba tham số K_p, K_i, K_d của bộ điều khiển PID là các biến cần tối ưu. Một không gian tìm kiếm hợp lý, bao gồm khoảng giá trị chặn dưới và chặn trên cho từng tham số, cần được định nghĩa để giới hạn phạm vi hoạt động của GA, dựa trên hiểu biết về hệ thống hoặc các giá trị tham khảo ban đầu.

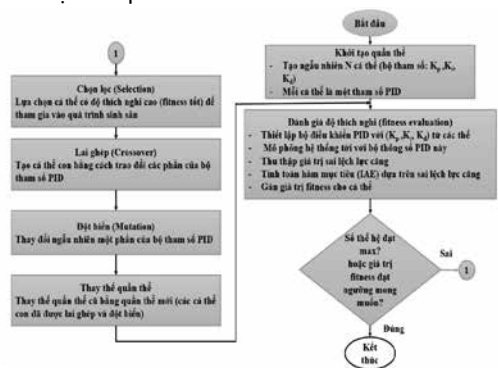
* *Lựa chọn và định nghĩa hàm mục tiêu*: Để định lượng hiệu suất điều khiển và hướng dẫn quá trình tối ưu hóa, hàm mục tiêu J cần được xác định rõ. Một lựa chọn phổ biến và hiệu quả cho việc tối ưu tham số PID, nhằm đạt được đáp ứng nhanh, ổn định và sai số thấp, là tối thiểu hóa tiêu chuẩn lỗi tích phân theo trọng số thời gian (ITAE - Integral Time-weighted Absolute Error):

$$J_{ITAE} = \int_0^T t|e(t)|dt = \int_0^T t|\psi_d(t) - \psi(t) \tag{11}$$

Trong đó: T - Khoảng thời gian mô phỏng đánh giá và $e(t)$ - Sai lệch hướng tức thời. Việc tối thiểu hóa JITAE có xu hướng tạo ra các đáp ứng ít dao động và thời gian xác lập ngắn.

* *Cấu hình tham số GA*: Các tham số vận hành của thuật toán GA cần được thiết lập, bao gồm kích thước quần thể (số lượng bộ (K_p, K_i, K_d) trong mỗi thế hệ), số thế hệ tối đa (điều kiện dừng thuật toán), phương pháp chọn lọc xác suất lai ghép và xác suất đột biến. Việc lựa chọn các tham số này ảnh hưởng đến khả năng và tốc độ hội tụ của thuật toán.

* *Thực thi vòng lặp tối ưu hóa GA*: Quá trình tìm kiếm tối ưu tuân theo lưu đồ thuật toán tổng quát được minh họa trong Hình 3. Điểm mấu chốt là bước “Đánh giá độ thích nghi”: Với mỗi bộ tham số PID (cá thể) trong quần thể, bộ điều khiển PID được cấu hình với các tham số này và chạy mô phỏng trên mô hình AUV trong một khoảng thời gian T . Dựa trên kết quả mô phỏng (đáp ứng sai lệch $e(t)$), giá trị hàm mục tiêu (JITAE) được tính toán, từ đó xác định độ thích nghi (fitness) của cá thể đó (thường là một hàm giảm của JITAE). Các toán tử chọn lọc, lai ghép, đột biến sau đó được áp dụng để tạo ra thế hệ kế tiếp tốt hơn.

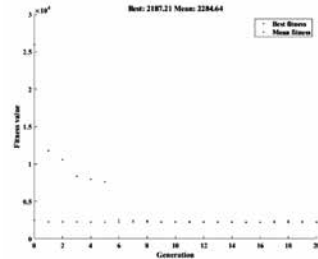


Hình 2. Lưu đồ thuật toán của bộ điều khiển GA-PID

4. KẾT QUẢ

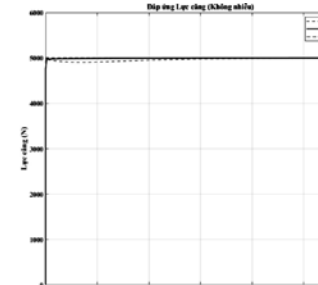
4.1. Mô phỏng hoạt động của hệ thống với trường hợp tải trọng của hệ thống là không đổi và không có nhiễu tác động

Đồ thị 3 minh họa quá trình hội tụ của Giải thuật di truyền, cho thấy giá trị thích nghi tốt nhất ("Best fitness") giảm mạnh và ổn định chỉ sau vài thế hệ. Điều này chứng tỏ thuật toán GA đã hoạt động hiệu quả, nhanh chóng tìm ra một bộ thông số PID tối ưu hơn nhiều so với bộ thông số ban đầu.



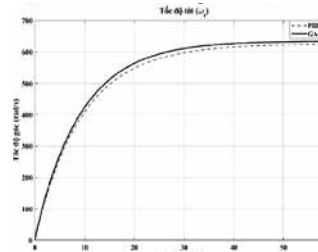
Hình 3. Quá trình tối ưu hóa của thuật toán GA qua các thế hệ với trường hợp không xét đến nhiễu và đáp ứng sức căng có dạng hằng số

Đồ thị 4, so sánh trực quan cho thấy bộ điều khiển GA-PID (đường nét liền) có đáp ứng nhanh hơn, thời gian ổn định ngắn hơn và ít bị sụt lồi hơn so với PID kinh điển (đường nét đứt). Rõ ràng, GA-PID đã cải thiện được chất lượng đáp ứng quá độ của hệ thống.



Hình 4. Đáp ứng lực căng của tời với bộ điều khiển GA-PID (đáp ứng lực căng là hằng số)

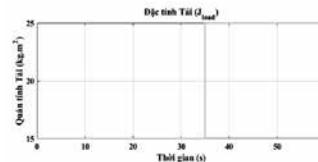
Tương ứng với đáp ứng lực căng tốt hơn (Hình 5), tốc độ của tời khi dùng GA-PID (đường nét liền) cũng đạt đến trạng thái ổn định nhanh hơn. Điều này khẳng định hệ thống hoạt động hiệu quả hơn dưới sự điều khiển của bộ thông số đã được tối ưu.



Hình 5. Tốc độ của tời với bộ điều khiển GA-PID (đáp ứng lực căng là hằng số)

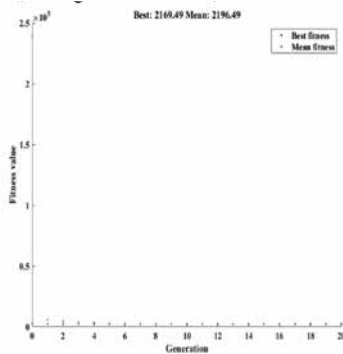
4.2. Mô phỏng hoạt động của hệ thống với trường hợp tải trọng của hệ thống thay đổi và không có nhiễu tác động

Đồ thị 6 mô tả một kịch bản thay đổi tải khác, với một bước nhảy lớn về quán tính từ 15 lên 25 $kg.m^2$ tại thời điểm 35 giây, dùng để kiểm tra tính bền vững của bộ điều khiển.



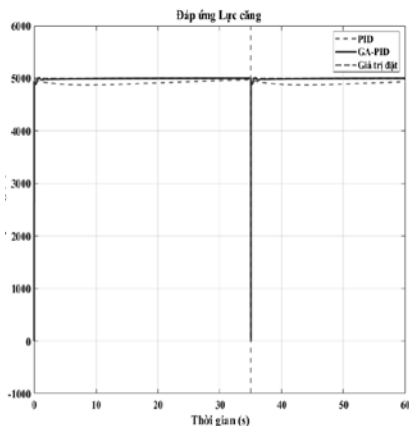
Hình 6. Đặc tính tải của hệ thống

Hình 7 thể hiện quá trình hội tụ của Giải thuật di truyền (GA) qua 20 thế hệ, theo dõi giá trị thích nghi (fitness) tốt nhất và trung bình. Thuật toán đã tìm thấy một giải pháp rất tốt ngay từ thế hệ đầu tiên, thể hiện qua việc giá trị fitness giảm đột ngột từ mức rất cao xuống gần như tối ưu. Sau đó, thuật toán nhanh chóng hội tụ khi cả giá trị tốt nhất (Best fitness) và trung bình (Mean fitness) đều ổn định ở mức thấp, cho thấy quần thể đã nhanh chóng đạt đến trạng thái tối ưu và không có sự cải thiện đáng kể ở các thế hệ sau.



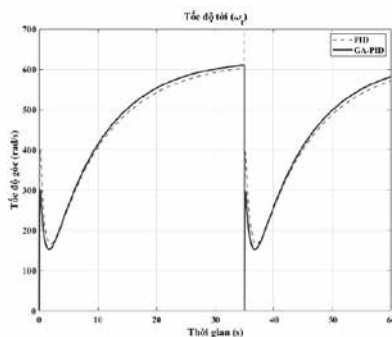
Hình 7. Quá trình tối ưu hóa của thuật toán GA qua các thế hệ với trường hợp tải trọng của hệ thống thay đổi (đáp ứng lực căng có dạng hằng số)

Từ Hình 8 ta thấy, tại thời điểm tải thay đổi vào giây thứ 35, đáp ứng của PID (đường nét đứt) bị sụt giảm rõ rệt trước khi hồi phục. Ngược lại, GA-PID chỉ bị ảnh hưởng rất nhỏ và giữ được lực căng ổn định hơn nhiều, chứng tỏ tính bền vững vượt trội.



Hình 8. Đáp ứng lực căng của tời với bộ điều khiển GA-PID với tải trọng thay đổi (đáp ứng lực căng có dạng hằng số)

Đồ thị tốc độ Hình 9 cho thấy, tại thời điểm tải thay đổi, cả hai bộ điều khiển đều phản ứng tốt, nhưng GA-PID (đường nét liền) phục hồi về quỹ đạo mong muốn nhanh và mượt mà hơn.



Hình 9. Tốc độ của tời với bộ điều khiển GA-PID với tải trọng thay đổi (đáp ứng lực căng có dạng hằng số)

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày thành công việc ứng dụng Giải thuật di truyền (GA) để tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển PID cho bài toán điều chỉnh sức căng trên hệ thống tời tàu thủy. Nghiên cứu đã giải quyết các hạn chế của bộ điều khiển PID kinh điển, vốn thường cho đáp ứng chậm, độ vọt lố cao và kém ổn định khi đối mặt với các tác động phức tạp từ môi trường biển.

Thông qua quá trình mô phỏng trên Matlab/Simulink, kết quả đã khẳng định rõ ràng hiệu quả vượt trội của bộ điều khiển GA-PID so với phương pháp chỉnh định Ziegler-Nichols truyền thống. Cụ thể:

- Trong điều kiện tải trọng không đổi và không có nhiễu: Bộ điều khiển GA-PID đã cải thiện chất lượng đáp ứng quá độ, cho thấy thời gian ổn định nhanh hơn và giảm thiểu đáng kể độ vọt lố so với bộ PID kinh điển.

- Trong điều kiện tải trọng thay đổi đột ngột: Bộ điều khiển GA-PID thể hiện tính bền vững xuất sắc, duy trì sức căng gần như không đổi và phục hồi nhanh chóng. Ngược lại, bộ điều khiển PID kinh điển bị ảnh hưởng rõ rệt, cho thấy sự sụt giảm đáng kể về lực căng tại thời điểm thay đổi tải.

Những kết quả này chứng minh rằng việc tích hợp giải thuật di truyền là một giải pháp mạnh mẽ và hiệu quả để nâng cao chất lượng điều khiển cho hệ thống tời tàu thủy. Bộ điều khiển GA-PID không chỉ đảm bảo hệ thống hoạt động với đáp ứng nhanh và chính xác mà còn tăng cường khả năng kháng nhiễu và tính bền vững, góp phần quan trọng vào việc đảm bảo an toàn và hiệu quả trong các hoạt động hàng hải.

Hướng phát triển trong tương lai có thể tập trung vào việc kiểm chứng thuật toán trên các mô hình thực nghiệm và hệ thống tời thực tế, đồng thời xem xét ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu động phức tạp hơn như sóng và gió để hoàn thiện hơn nữa giải pháp điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Kuzu, A.C.; Akyuz, E.; Arslan, O. (2019), Application of fuzzy fault tree analysis (FFTA) to maritime industry: A risk analysing of ship mooring operation. *Ocean Eng.*, 179, 128-134.
- [2]. International Maritime Organization (IMO) (2020), Revised Guidance on Shipboard Towing and Mooring Equipment (MSC.1/Circ.1175/Rev.1); International Maritime Organization: London, UK.
- [3]. Shi, X.-Y.; Zhang, N.-C.; Chen, C.-P.; Jiang, H.-Z.; Cui, L. (2014), Experimental Study of characteristics of motions of a large mooring ship in long-period waves. *J. Mar. Sci. Technol.*, 22, 15.
- [4]. Wu, L.; Yang, J.; Xiang, Z.; Liu, M.; Li, M.; Di, Y.; Jiang, H.; Dai, C.; Ji, X. (2023), An intelligent monitoring system for the force characteristics of floating bollards in a ship lock. *J. Mar. Sci. Eng.*, 11, 1948.
- [5]. Nazligul, Y.E.; Yazir, D. (2023), Comparison of automated mooring systems against existing mooring systems by using the IF-TOPSIS method. *Ocean Eng.*, 285, 115269.
- [6]. Chen, Q.; Li, W.; Chen, G. (2016), FUZZY P+ ID controller for a constant tension winch in a cable laying system. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64, 2924-2932.
- [7]. Zhu, P.; Zhang, Q.; Zhao, Z.; Yang, B. (2023), BP fuzzy neural network PID based constant tension control of traction winch. *Meas. Control*, 56, 857-873.
- [8]. Barltrop, N.D.P. (1998), *Floating Structures: A Guide for Design and Analysis*, 1st ed.; Oilfield Publications Limited (OPL): Ledbury, UK.