

NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN VỊ TRÍ CƠ CẤU CHẤP HÀNH GÓC LÁI CHO CHÂN VỊT ĐA PHƯƠNG CỦA MÔ HÌNH TÀU THỦY THỬ NGHIỆM

A STUDY OF POSITION CONTROL SYSTEM WITH AZIMUTH THRUSTER ACTUATOR OF THE PROPELLER MODEL FOR VESSELS

Đào Quang Khanh^{1,*},
Hứa Xuân Long¹, Tống Lâm Tùng¹

TÓM TẮT

Trong bài báo này, trình bày phương pháp điều khiển hướng đẩy chân vịt bằng bộ điều khiển PID cho đối tượng là hệ thống đẩy bằng chân vịt đa phương áp dụng cho tàu mô hình thử nghiệm trong chế độ định vị động. Hệ thống chấp hành góc lái chân vịt đa phương được sử dụng trong nghiên cứu là động cơ điện DC servo được mô phỏng bằng công cụ Matlab - Simulink. Kết quả nghiên cứu hệ chấp hành góc lái chân vịt đa phương làm cơ sở thiết kế cho hệ thống điều khiển định vị động DP áp dụng trên tàu mô hình thử nghiệm. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy khả năng áp dụng các thuật toán khác nhau cho hệ thống đẩy bằng chân vịt đa phương.

Từ khóa: Định vị động, chân vịt đẩy đa phương, động cơ servo, bộ điều khiển PID.

ABSTRACT

This paper, the method of controlling the propeller thrust direction by PID controller is presented for the object of the azimuth thruster propeller system applied to the experimental model ship in dynamic positioning mode. The azimuth thruster actuator system used in the research is a DC servo motor simulated by the tool Matlab - Simulink. The results of the study of the azimuth thruster propeller driver angle actuation system serve as the design basis for the DP dynamic positioning control system applied on the experimental model ship. In addition, the results also show the possibility of applying different algorithms to the azimuth thruster propeller system.

Keywords: Dynamic Positioning, Azimuth Thruster, DC Servo, PID

¹Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email: khanhdq@vimaru.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/10/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/12/2021

Ngày chấp nhận đăng: 27/12/2021

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc nghiên cứu hệ thống điều khiển cho các tàu thủy sử dụng hệ chân vịt đa phương đã được nhiều nghiên cứu để cập tới [1-5]. Kết quả của những nghiên cứu đó là trên cơ sở từ các hệ tàu thủy thực đã được áp dụng trong các

nhà máy đóng tàu với hệ thống điều khiển và chấp hành hiện đại được phát triển bởi các nhà sản xuất lớn trên Thế giới. Tuy nhiên, trong điều kiện nước ta hiện nay, việc tiếp cận các công nghệ điều khiển trên hệ thống tàu thủy hiện đại gặp nhiều khó khăn. Vì vậy, xây dựng một mô hình tàu thủy thử nghiệm gần giống với tàu thủy thực để việc nghiên cứu phát triển các thuật toán điều khiển là một giải pháp phù hợp với điều kiện nghiên cứu hiện nay. Trong đó, hệ thống chấp hành lái chân vịt đa phương cho tàu thủy mô hình là một cơ cấu chấp hành quan trọng cần nghiên cứu và thiết kế sao cho gần giống với hệ thống chấp hành cho tàu thủy thực, làm cơ sở để các nghiên cứu tiếp theo như hệ thống định vị động DP cho tàu thủy mô hình. Vì vậy, nhóm tác giả đề xuất nghiên cứu hệ thống điều khiển chấp hành góc lái của chân vịt đa phương cho tàu thủy mô hình thử nghiệm, xây dựng mô phỏng hệ thống là bước đầu cho việc thiết kế mô hình thực.

2. NỘI DUNG

2.1. Mô hình lực đẩy và mô-men quay trở trên tàu thủy sử dụng chân vịt đa phương

Với tàu thủy sử dụng chân vịt đẩy là chân vịt đa phương, nó di chuyển trong nước bởi tổng hợp các thành phần là lực đẩy của các chân vịt đa phương và mô-men quay trở của tàu [6, 7], hệ thống điều khiển định vị động cho tàu sẽ đưa ra lệnh điều khiển tổng các lực đẩy ngang trên trục X là ΣF_{tx} , tổng các lực đẩy dọc trên trục Y là ΣF_{ty} và tổng các mô-men trở quanh trục z là ΣM_{tz} . Xét một hệ tàu tổng quát được cấu hình bởi n chân vịt đa phương, sinh ra các lực đẩy F_{ti} (trong đó $i = 1, 2, \dots, n$), và góc lái của chân vịt đa phương là α_i , được thể hiện trong hình 1. Nếu tàu di chuyển theo các trục X, Y và góc lái của tàu như thể hiện trong hình 1 ta có các phương trình lực đẩy và mô-men quay trở của tàu như sau [6]:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{tx} &= \Sigma F_{ti} \cos \alpha_{ti}, \quad \Sigma F_{ty} = \Sigma F_{ti} \sin \alpha_{ti} \\ \text{và } \Sigma M_{tz} &= F_{ti} y_{ti} \sin \alpha_{ti} + F_{ti} x_{ti} \cos \alpha_{ti} \end{aligned} \quad (1)$$

Theo [7] lực đẩy dọc thân tàu và lực đẩy ngang thân tàu phải thoả mãn:

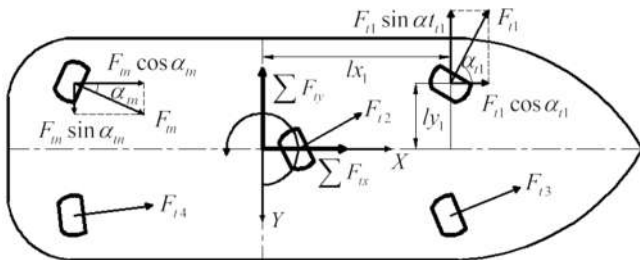
$$F_{tx} \geq F_{t1} \cos \alpha_{t1} + F_{t2} \cos \alpha_{t2} + \dots + F_{tn} \cos \alpha_{tn}$$

$$F_{ty} \geq F_{t1} \sin \alpha_{t1} + F_{t2} \sin \alpha_{t2} + \dots + F_{tn} \sin \alpha_{tn}$$
(2)

Và mô-men quay trở thân tàu phải thỏa mãn:

$$\sum M_{tz} \geq F_{t1} l_{x1} \cos \alpha_{t1} + F_{t2} l_{x2} \cos \alpha_{t2} + \dots + F_{tn} l_{xn} \cos \alpha_{tn}$$

$$+ F_{t1} l_{y1} \sin \alpha_{t1} + F_{t2} l_{y2} \sin \alpha_{t2} + \dots + F_{tn} l_{yn} \sin \alpha_{tn}$$
(3)



Hình 1. Sơ đồ mô hình tàu sử dụng các chân vịt đẩy đa phương

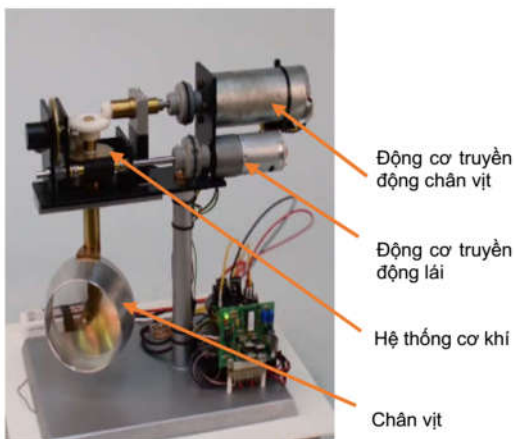
Nhận xét: Từ (1), (2), (3), các giá trị lực đẩy $\sum F_{tx}$, $\sum F_{ty}$ và mô-men quay trở thân tàu $\sum M_{tz}$ ngoài việc phụ thuộc vào lực đẩy của các chân vịt còn phụ thuộc vào độ chính xác của các góc lái của n chân vịt đẩy đa phương α_{t1} , α_{t2} , α_{t3} , ..., α_{tn} . Vì vậy, việc điều khiển chính xác góc lái của chân vịt đa phương là vấn đề cần phải giải quyết, đặc biệt khi áp dụng cho hệ thống định vị động. Trong phần 2.2, 2.3 bài báo đề cập đến phương pháp tổng hợp bộ điều khiển vị trí góc lái α_{tn} .

2.2. Xây dựng bộ điều khiển cho động cơ chấp hành góc lái cho chân vịt đa phương

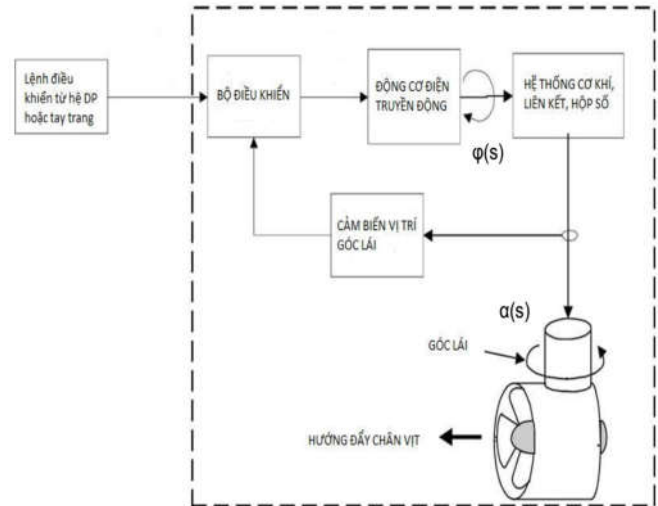
2.2.1. Cấu trúc của mô hình chân vịt đẩy đa phương

Trong hệ thống đẩy truyền thống, động cơ diesel lai chân vịt được nối với một trục (shaft), trục này qua ống trục (shaft tunnel) và ống lái (stern tube) và kết nối với chân vịt ngoài thân tàu phía sau lái tàu. Hệ thống lái của mỗi hệ thống này là một bánh lái được đặt sau chân vịt.

Đối với hệ thống chân vịt đẩy đa phương được sử dụng trên tàu là sự kết hợp giữa hệ thống đẩy và hệ thống lái thành một hệ thống. Hệ thống bao gồm một chân vịt được truyền động bởi một động cơ điện (hình 2a), chân vịt này đặt trên bầu có thể xoay 360° cũng được truyền động bằng động cơ điện như thể hiện trong hình 2b.



(a)



(b)

Hình 2. Mô hình chân vịt đẩy đa phương (a); Cấu trúc hệ thống lái chân vịt đa phương (b)

2.2.2. Tổng hợp bộ điều khiển vị trí góc lái bằng động cơ điện cho chân vịt đa phương

a) Mô hình toán động cơ điện một chiều

Với động cơ điện DC, điều khiển bằng điện áp phản ứng, theo [8, 9] sơ đồ thay thế như hình 3a.

trong đó: u - tín hiệu vào là điện áp đặt vào phần ứng (V), ω - tín hiệu ra là vận tốc góc của động cơ (rad/s), R - điện trở phần ứng (Ω), L - điện cảm phần ứng (H), i - dòng điện phần ứng (A).

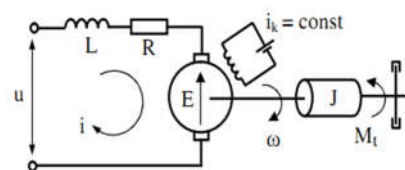
Theo [9, 10], sơ đồ laplace của động cơ DC được thể hiện trong hình 3b với hàm truyền với tín hiệu ra là góc quay phi là:

$$G(s) = \frac{\varphi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{K_m}{(Ls+R)(Js+B)}}{1 + \frac{K_m K_e}{(Ls+R)(Js+B)}} \left(\frac{1}{s} \right)$$

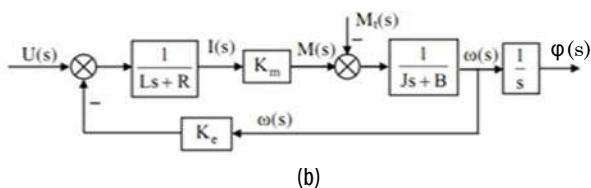
$$= \frac{K_m}{s[(Ls+R)(Js+B) + K_m K_e]} = \frac{1}{s} \frac{K}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1}$$
(4)

trong đó: K_e - hằng số sức điện động (V.s/rad), K_{ew} - sức điện động phản ứng (V), J - momen quán tính trên trục động cơ tải quy về trục động cơ (kg.m²), B - hệ số masat nhớt của động cơ tải quy về trục động cơ (Nm.s), M_t - momen tải (nhiều) (N.m). Đặt: $\tau_t = L/R$ - hằng số thời gian điện từ, $\tau_c = J/B$ - hằng số thời gian cơ và các thành phần:

$$T_1 = \frac{\tau_t \tau_c RB}{K_m K_e + RB}; T_2 = \frac{(\tau_t + \tau_c) RB}{K_m K_e + RB}; K = \frac{K_m}{K_m K_e + RB}$$



(a)



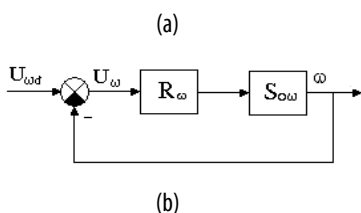
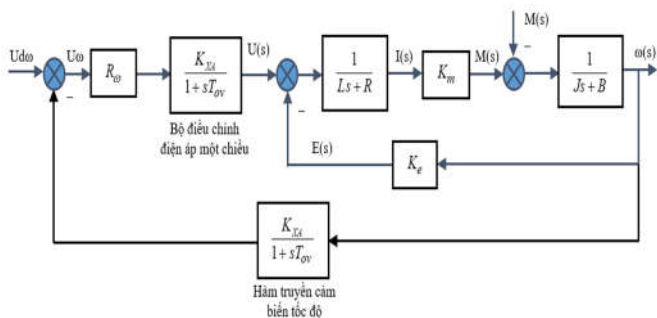
Hình 3. Sơ đồ thay thế của động cơ DC (a); Sơ đồ khối của động cơ DC với đầu ra là góc phi (b)

Bảng 1. Thông số của hệ thống và động cơ một chiều Yaskawa-Minertia Motor

Động cơ DC - Minertia QM series – UGQMEM			Các thông số hệ thống		
Công suất P _{dm}	W	8,2	Hằng số thời gian bộ băm xung T _{vo}	s	0,00125
Điện áp U _{dm}	V	26	Hằng số thời gian của bộ Encoder T _ω	s	0,0015
Dòng điện I _{dm}	A	0,66	Hệ số khuếch đại Encoder K _ω		0,0238
Momen M _{dm}	Nm	0,039	Hệ số bộ truyền lực K _r		0,067
Tốc độ quay n	r/min	2000	Góc cần dịch chuyển	deg	90
Điện trở phản ứng R _a	Ω	12,5	Hằng số thời gian của bộ Encoder T _φ		0,003
Điện cảm phản ứng L _a	H	0,006	Hệ số momen động cơ K _m	Nm/A	0,073
Momen quán tính J _M	Kg.m ²	4,4.10 ⁻⁶	Hệ số điện áp động cơ K _e	V/rad/sec	0,073
Hệ số ma sát nhớt B	Nm.s	0,59.10 ⁻⁶			

b) Tổng hợp mạch vòng tốc độ

Sơ đồ mạch vòng điều khiển tốc độ động cơ DC được thể hiện trong hình 4a, là sơ đồ mạch vòng điều chỉnh tốc độ rút gọn được thể hiện trong hình 4b.



Hình 4. Sơ đồ mạch vòng điều chỉnh tốc độ

- Hàm truyền hệ hở:

$$S_{ow} = \frac{R_u \cdot K_\omega \cdot K_{XA}}{K_m \cdot T_c \cdot s(1+2T_{sw}s)} \tag{5}$$

trong đó: $T_c = \frac{J R_u}{K_m^2}$, với $T_{sw} = T_\omega + 2 \cdot T_{ov}$

Áp dụng tiêu chuẩn tối ưu module [9]:

$$F_{OM\omega} = \frac{\omega(s)}{U_{\omega d}(s)} = \frac{1}{1+2\tau_\delta s + 2\tau_\delta^2 s^2}, \text{ chọn } \tau_\delta = T_{sw}$$

$$R_\omega(s) = \frac{F_{OM\omega}}{S_{ow}(1-F_{OM\omega})} = \frac{1}{\frac{R_u \cdot K_\omega \cdot K_{XA}}{K_m \cdot T_c \cdot s(1+T_{sw}s)} \cdot 2\tau_\delta s(1+\tau_\delta s)}$$

$$= \frac{K_m \cdot T_c}{R_u \cdot K_{XA} \cdot K_\omega \cdot 2T_{sw}}$$

Tổng hợp mạch vòng điều khiển bằng chuẩn tối ưu module ta có:

$$F_{OM\omega} = \frac{\omega(s)}{U_{\omega d}(s)} = \frac{1}{K_\omega} \frac{1}{1+2T_{sw}s + 2T_{sw}^2 s^2} \approx \frac{1}{K_\omega} \frac{1}{1+2T_{sw}s} \tag{7}$$

- Từ (6) ta tính bộ điều chỉnh tốc độ R_ω(s) như sau:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{n}{9,55} = \frac{2000}{9,55} = 209,4(\text{rad/s})$$

$$U_{\omega d} = \omega_{dm} \cdot K_\omega, \text{ chọn } U_{\omega d} = 5 \text{ V} \Rightarrow K_\omega = \frac{5}{209,4} = 0,0238$$

$$\text{- Với bộ băm áp một chiều: } K_{XA} = \frac{U_{dm}}{U_{dk}} = \frac{26}{5} = 5,2$$

- Ta có: $T_{sw} = T_\omega + 2 \cdot T_{ov}$

$$\text{vì vậy, } T_{sw} = 0,0015 + 2 \cdot 0,00125 = 0,004\text{sec}$$

$$T_c = \frac{J R_u}{K_m^2} = \frac{4,4 \cdot 10^{-6} \cdot 12,5}{(0,073)^2} = 0,01\text{sec}$$

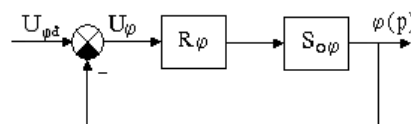
$$\Rightarrow R_\omega(p) = \frac{K_m \cdot T_c}{R_u \cdot K_{XA} \cdot K_\omega \cdot 2T_{sw}} = \frac{0,073 \cdot 0,01}{12,5 \cdot 5,2 \cdot 0,0238 \cdot 2 \cdot 0,004} = 0,059$$

c) Tổng hợp mạch vòng vị trí

Tổng hợp mạch vòng vị trí cũng tương tự như tổng hợp mạch vòng tốc độ [9], ta dùng tiêu chuẩn tối ưu module và hàm truyền đạt của mạch vòng tốc độ lấy là khâu bậc hai, bỏ qua các khâu bậc cao.

$$\frac{\omega(s)}{\omega_d(s)} = \frac{1}{1+2T_{sw}s} \cdot \frac{1}{K_\omega} \tag{8}$$

Khi dùng chuẩn tối ưu module [9], viết gọn sơ đồ ta có mạch vòng điều chỉnh vị trí như trên hình 5.



Hình 5. Sơ đồ mạch vòng điều chỉnh vị trí

Nếu khi tổng hợp mạch vòng vị trí R_φ(s) dùng chuẩn tối ưu module, ta có hàm truyền của đối tượng như sau:

$$S_{\omega\phi}(s) = \frac{K_r \frac{K_{\phi}}{K_{\omega}}}{s(1+2T_{sw}s)(1+T_{\phi}s)} \quad (9)$$

- Với góc lái là α , tỷ số truyền bánh răng là 18:1 khi đó:

$$n = \frac{\alpha \cdot 18}{360} \Rightarrow \phi = 2\pi \cdot n \text{ (rad)}$$

- Từ đó ta xác định được tín hiệu đặt xấp xỉ tín hiệu phản hồi, tức là: $K_{\phi} = \frac{U_{\phi d}}{\phi}$

- Áp dụng tiêu chuẩn tối ưu modul, chọn $\tau_{\sigma} = T_{\phi}$ ta có:

$$R_{\phi}(s) = \frac{1}{\frac{K_r \cdot K_{\phi}}{K_{\omega} \cdot s \cdot (1+2T_{sw}s)} \cdot 2\tau_{\sigma} \cdot s \cdot \frac{(1+\tau_{\sigma}s)}{1+T_{\phi}s}} \quad (10)$$

$$= \frac{K_{\omega}}{K_r \cdot K_{\phi} \cdot 2T_{\phi}} (1+2T_{sw}s)$$

- Giả sử ta chọn góc lái dịch chuyển là $\alpha = 90^{\circ}$, tỷ số truyền của hộp số là 18:1, khi đó ta tính được số vòng mà động cơ phải quay là: $\Rightarrow n = \frac{\alpha \cdot 18}{360} = \frac{90 \cdot 18}{360} = 4,5 \text{ (vòng)}$

- Góc phải quay là: $\phi = 2\pi \cdot n = 9\pi = 28,26 \text{ (rad)}$

- Chọn $U_{\phi d} = 5V$:

$$K_{\phi} = \frac{U_{\phi d}}{\phi} = \frac{5}{9,3,14} = 0,177$$

- Hệ số khuếch đại truyền lực:

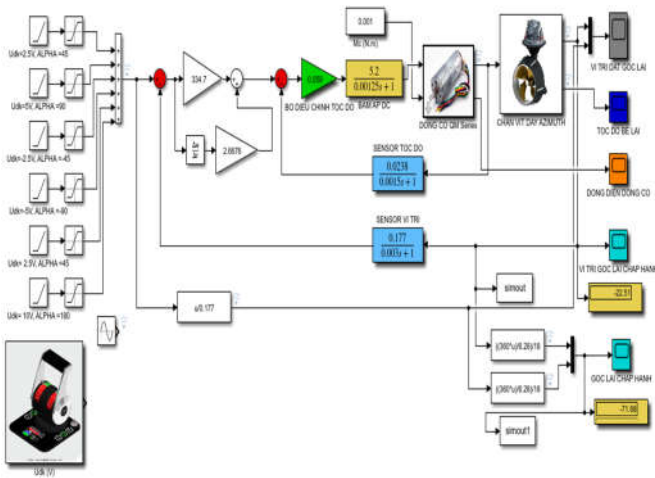
$$\phi = \int_0^1 K_r \omega dt = K_r \omega t \Rightarrow K_r = \frac{\phi}{\omega t} = 0,067$$

$$R_{\phi}(s) = \frac{K_{\omega}}{K_r \cdot K_{\phi} \cdot 2T_{\phi}} (1+2T_{sw}s)$$

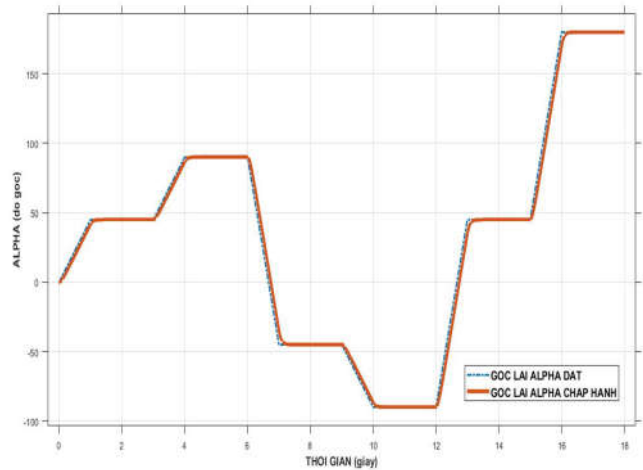
$$= \frac{0,0238}{0,067 \cdot 0,177 \cdot 2 \cdot 0,003} (1+2 \cdot 0,004s) = 334,7 + 2,6776s$$

2.3. Mô phỏng hệ thống

Sơ đồ mô phỏng của hệ thống chấp hành góc lái cho chân vịt đa phương được xây dựng trên Matlab - Simulink thể hiện trong hình 6.

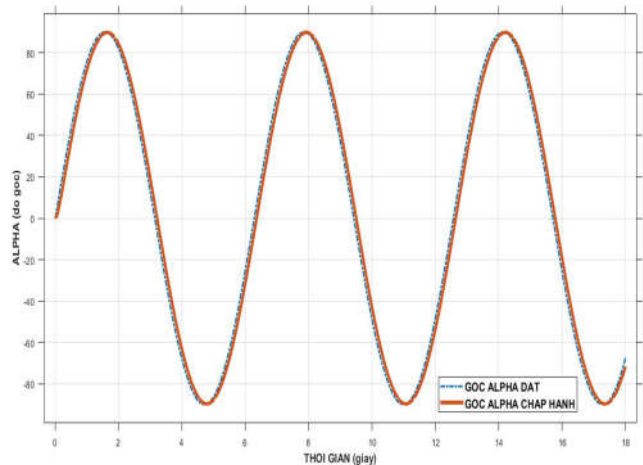


Hình 6. Sơ đồ mô phỏng điều khiển vị trí góc lái cho chân vịt đa phương



Hình 7. Kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển vị trí góc lái alpha khi tín hiệu đặt dạng bậc thang

Tiến hành chạy chương trình mô phỏng với giá trị của vị trí đặt theo điện áp ($U_{đk} = 2,5V, 5V, -2,5V, -5V, 7,5V, 10V$ tương ứng với giá trị yêu cầu góc lái là $\alpha = 45^{\circ}, 90^{\circ}, -45^{\circ}, -90^{\circ}, 45^{\circ}, 180^{\circ}$), ta có kết quả mô phỏng như đồ thị đặc tính vị trí trong hình 7.



Hình 8. Kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển vị trí góc lái alpha khi tín hiệu đặt dạng hình sin

Nhận xét, kết quả mô phỏng trong hình 7 cho thấy, giá trị góc lái của chân vịt đa phương ở các giá trị $\alpha = 45^{\circ}, 90^{\circ}, -45^{\circ}, -90^{\circ}, 45^{\circ}, 180^{\circ}$. Từ kết quả mô phỏng chúng ta thấy sai số vị trí $\Delta\phi = 0$, sai lệch tính $\delta\% = 0$, độ quá điều chỉnh $\sigma_{max} \approx 0$, thời gian quá độ từ 0 đến 0,4s là hệ thống ổn định khi đạt đến vị trí góc lái yêu cầu. Trong hình 8, với giá trị đặt góc alpha dạng hình sin với biên độ $+90^{\circ}, -90^{\circ}$, chu kỳ là 6,2 giây cho thấy hệ thống chấp hành góc lái alpha bám chính xác theo biên dạng sin của góc lái alpha yêu cầu.

3. KẾT LUẬN

Bài toán điều khiển vị trí góc lái của chân vịt đa phương cho tàu thủy mô hình được mô phỏng thành công bằng công cụ Matlab - Simulink, đáp ứng được yêu cầu đặt ra là: mô phỏng được hệ thống chấp hành góc lái alpha của chân vịt đa phương chính xác khi có lệnh điều khiển (từ tay trang điều khiển của người lái hoặc từ hệ thống định vị động DP).

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống phản ứng nhanh và chính xác khi có lệnh điều khiển. Việc điều khiển tự động góc lái alpha bám theo lệnh điều khiển làm tăng hiệu suất làm việc của hệ thống lái trên tàu thủy, từ đó giúp cho việc điều khiển tàu một cách cơ động và chính xác trên mặt biển. Kết quả mô phỏng của bài báo là dữ liệu để kiểm chứng khi thiết kế hệ thống điều khiển chấp hành góc lái của chân vịt đa phương thực gắn trên tàu thủy mô hình thử nghiệm và hệ thống định vị động trên tàu thủy.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT21-22.46.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Trong Dong Nguyen, Asgeir J. Sørensen, Ser Tong Quek, 2006. *Design of Hybrid Controller for Dynamic Positioning from Calm to Extreme Sea Condition*. IFAC meeting.
- [2]. Diju Gao, Xuyang Wang, Tianzhen Wang, Yide Wang, Xiaobin Xu, 2017. *Optimal thrust allocation strategy of electric propulsion ship based on improved nondominated sorting genetic algorithm*. IEEE ACCESS-2017.
- [3]. Miroslaw Tomera, Kamil Podgórski, 2021. *Control of Dynamic Positioning System with Disturbance Observer for Autonomous Marine Surface Vessels*. MDPI Sensors.
- [4]. Marco Bibuli, Enrica Zereik, Angelo Odetti, 2019. *Adaptive steering control for an azimuth thrusters-based autonomous vessel*. Journal of Marine Engineering & Technology.
- [5]. Asgeir J. Sørensen, Svein I. Sagatun, Thor I. Fossen, 1997. *Design of a dynamic positioning using model based control*. Modeling-Identification and Control (MIC).
- [6]. Inegiyemiema M., Odokwo V. E., 2021. *Preliminary Design of Dynamic Positioning System for A Drillship*. American Journal of Engineering Research (AJER).
- [7]. Thor I. Fossen, *Marine Control Systems*, Norwegian University of Science and Technology Trondheim, Norway, 1995.
- [8]. Tran Anh Dung, 2015. *Điều khiển hiện đại lý thuyết và ứng dụng*. Transport Publishing House, Hanoi.
- [9]. Bui Quoc Khanh, Nguyen Van Lien, 2009. *Tự động điều chỉnh truyền động điện*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [10]. Huynh Thai Hoàng, 2008. *Lý thuyết điều khiển nâng cao*. Viet Nam National University Ho Chi Minh City Press.

AUTHORS INFORMATION

Dao Quang Khanh, Hua Xuan Long, Tong Lam Tung

Faculty of Electrical - Electronic Engineering, Vietnam Maritime University