

**NGHIÊN CỨU BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO MÔ HÌNH ĐỂ TIẾT KIỆM  
 NĂNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ ĐỘNG TÀU BIỂN**  
 A STUDY ON ENERGY-EFFICIENT MODEL PREDICTIVE CONTROL  
 FOR MARINE VESSEL DYNAMIC POSITIONING SYSTEM

**NGUYỄN HỮU QUYỀN\*, PHAN ĐĂNG ĐÀO**

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

*\*Email liên hệ: quyennh.ddt@vamaru.edu.vn*

*DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.965>*

**Tóm tắt**

Bài báo trình bày nghiên cứu thiết kế và đánh giá bộ điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) hướng tới tiết kiệm năng lượng cho hệ thống định vị động (Dynamic Positioning - DP) của tàu biển. Trên cơ sở mô hình động lực học phi tuyến của tàu trong mặt phẳng ngang, bài toán điều khiển MPC được xây dựng nhằm bảo đảm khả năng bám quỹ đạo mong muốn đồng thời thỏa mãn các ràng buộc về lực và mô men điều khiển của cơ cấu chấp hành. Bài toán phân bổ lực đẩy được tích hợp để chuyển đổi lực điều khiển tổng sang các lực tác động riêng lẻ của các chân vịt.

Hiệu quả của bộ điều khiển MPC được đánh giá thông qua các kịch bản mô phỏng điều khiển tàu di chuyển từ điểm A đến điểm B trong điều kiện có nhiễu môi trường. Kết quả mô phỏng được so sánh với bộ điều khiển PID truyền thống dựa trên các chỉ tiêu như quỹ đạo chuyển động, lực và mô men điều khiển, tổng lực cũng như tổng năng lượng tiêu thụ. Kết quả cho thấy bộ điều khiển MPC bảo đảm độ chính xác bám quỹ đạo tương đương PID, đồng thời tạo ra tín hiệu điều khiển trơn hơn, tuân thủ tốt các ràng buộc và giảm đáng kể tổng lực cũng như năng lượng tiêu thụ, qua đó khẳng định ưu thế của MPC trong nâng cao hiệu quả năng lượng và độ tin cậy của hệ thống định vị động tàu biển.

**Từ khóa:** Định vị động, điều khiển dự báo mô hình MPC, tiết kiệm năng lượng, Phân bổ lực đẩy.

**Abstract**

*This paper presents the design and evaluation of an energy-efficient Model Predictive Control (MPC) scheme for marine vessel Dynamic Positioning (DP) systems. Based on the nonlinear horizontal-plane dynamic model of the vessel, the MPC problem is formulated to ensure accurate trajectory tracking while explicitly satisfying constraints on control forces and moments imposed by the*

*actuators. In addition, a thruster allocation scheme is integrated to distribute the total control forces and moments into individual thruster commands.*

*The performance of the proposed MPC controller is evaluated through simulation scenarios in which the vessel is required to move from an initial point to a desired target position under environmental disturbances. The simulation results are compared with those obtained using a conventional PID controller in terms of trajectory tracking performance, control forces and moments, total control effort, and cumulative control energy consumption. The results demonstrate that the MPC controller achieves comparable trajectory tracking accuracy to the PID controller while generating smoother control signals, strictly respecting actuator constraints, and significantly reducing the total control force and energy consumption. These results confirm the effectiveness and superiority of the MPC-based approach in improving energy efficiency and operational reliability of marine vessel dynamic positioning systems.*

**Keywords:** *Dynamic Positioning (DP), Model Predictive Control (MPC), Energy efficiency, Thruster Allocation.*

**1. Mở đầu**

Hệ thống định vị động (Dynamic Positioning - DP) cho phép tàu biển duy trì vị trí và hướng mong muốn chỉ bằng các cơ cấu đẩy, không cần neo hoặc liên kết vật lý với môi trường xung quanh. Công nghệ này đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực như khai thác dầu khí ngoài khơi, hỗ trợ lặn sâu, khảo sát địa chất và lắp đặt các công trình biển. Tuy nhiên, trong điều kiện làm việc thực tế, tàu DP thường xuyên chịu tác động của sóng, gió và dòng chảy, khiến hệ thống điều khiển phải liên tục điều chỉnh lực đẩy để duy trì trạng thái mong muốn [10].

Một trong những vấn đề nổi bật của hệ thống DP hiện nay là mức tiêu thụ năng lượng lớn, xuất phát từ sự biến thiên nhanh và không cần thiết của lực đẩy. Các bộ điều khiển truyền thống như PID có ưu điểm về cấu trúc đơn giản nhưng thường tạo ra tín hiệu điều khiển dao động mạnh, dễ dẫn đến hiện tượng bão hòa công suất và giảm tuổi thọ cơ cấu chấp hành. Trong bối cảnh yêu cầu giảm chi phí khai thác và phát thải ngày càng được quan tâm, việc nâng cao hiệu quả năng lượng cho hệ thống DP trở thành một mục tiêu quan trọng [8].

Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) là một phương pháp điều khiển hiện đại, cho phép tối ưu hóa hành vi của hệ thống trong tương lai dựa trên mô hình toán học. Nhờ khả năng tích hợp trực tiếp các ràng buộc của cơ cấu chấp hành vào bài toán tối ưu, MPC đặc biệt phù hợp để hạn chế biến thiên lực đẩy và giảm công suất tiêu thụ trong hệ thống DP [15].

Xuất phát từ các phân tích trên, bài báo tập trung nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển MPC cho hệ thống định vị động tàu biển theo hướng giảm biến thiên tín hiệu điều khiển và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, đồng thời vẫn đảm bảo yêu cầu ổn định và độ chính xác định vị.

## 2. Mô hình toán học tàu thủy trong hệ thống DP

### 2.1. Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy

Chuyển động của tàu thủy được mô tả như chuyển động của một vật rắn trong môi trường chất lỏng với sáu bậc tự do. Trong bài toán định vị động, chuyển động của tàu chủ yếu được xét trên mặt phẳng ngang, bao gồm ba bậc tự do: Trượt dọc (surge), trượt ngang (sway) và quay trở (yaw) [1,10].

Xét mô hình chuyển động phẳng của tàu trong hệ tọa độ gắn với Trái đất, vectơ trạng thái được xác định bởi:

$$\eta = [x, y, \psi]^T \quad (1)$$

Trong đó:  $x, y$  là tọa độ vị trí và  $\psi$  là góc hướng tàu.

Phương trình động lực học rút gọn của tàu DP trên mặt phẳng ngang có dạng:

$$M\dot{v} + Dv = \tau + d \quad (2)$$

Trong đó:  $v$  là vectơ vận tốc,  $M$  là ma trận khối lượng - quán tính,  $D$  là ma trận cản thủy động lực học tuyến tính,  $d$  là nhiễu môi trường,  $\tau$  là vectơ lực và mô-men điều khiển do các máy đẩy tạo ra, với:  $\tau = [F_x, F_y, M_z]^T$  là vectơ lực và mô-men điều khiển do hệ thống DP tạo ra [5, 9].

Các lực điều khiển bị ràng buộc bởi giới hạn vật lý

của cơ cấu chấp hành:

$$|\tau_i| \leq \tau_{i,max} \quad i = x, y, z \quad (3)$$

Ở tốc độ thấp đặc trưng của hệ DP, các thành phần phi tuyến bậc cao có thể được bỏ qua hoặc gộp vào ma trận cản tuyến tính mà không làm giảm đáng kể độ chính xác của mô hình.

### 2.2. Mô hình phân bố lực đẩy trong hệ DP

Trong hệ thống định vị động (Dynamic Positioning - DP), cơ cấu chấp hành có nhiệm vụ tạo ra các lực và mô-men điều khiển nhằm duy trì hoặc điều khiển chuyển động của tàu theo quỹ đạo đặt trước. Các lực này được sinh ra thông qua các thiết bị đẩy như chân vịt chính, chân vịt mũi, chân vịt phương vị hoặc các thruster bên. Bài báo này xét mô hình tổng quát của cơ cấu chấp hành và bài toán phân bố lực đẩy trong mặt phẳng chuyển động ngang của tàu.

#### a. Mô hình lực tổng trong hệ DP

Trong mặt phẳng chuyển động ngang, vectơ lực và mô-men tổng tác dụng lên thân tàu được biểu diễn trong hệ tọa độ thân tàu như sau [4]:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó:  $F_x$  và  $F_y$  lần lượt là lực dọc và lực ngang tác dụng lên thân tàu,

$M_z$  là mô-men quay quanh trục thẳng đứng đi qua trọng tâm tàu.

Vectơ lực tổng  $\tau$  được sinh ra từ các cơ cấu chấp hành thông qua quan hệ tuyến tính:

$$\tau = Bu$$

Với  $u = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_m]^T \in R^m$  là vectơ lực (hoặc công suất) điều khiển của  $m$  thruster,  $B \in R^{3 \times m}$  là ma trận phân bố lực (thruster configuration matrix), phụ thuộc vào vị trí lắp đặt và hướng lực của từng thruster.

Ma trận B có dạng tổng quát:

$$B = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_1 & \sin \alpha_2 & \sin \alpha_3 \\ l_{x1} \sin \alpha_1 - l_{y1} \cos \alpha_1 & l_{x2} \sin \alpha_2 - l_{y2} \cos \alpha_2 & l_{x3} \sin \alpha_3 - l_{y3} \cos \alpha_3 \end{bmatrix}$$

Trong đó  $l_{xi}, l_{yi}$  là tọa độ của thruster thứ  $i$  so với trọng tâm tàu, và  $\alpha_i$  là góc phương lực của Thruster đó trong hệ tọa độ thân tàu.

#### b. Ràng buộc cơ cấu chấp hành trong DP

Do giới hạn vật lý của các chân vịt và bộ truyền động, tín hiệu điều khiển của mỗi cơ cấu chấp hành bị

ràng buộc:  $u_i^{min} \leq u_i \leq u_i^{max}, i = 1, 2, 3, \dots, n$

Hay dưới dạng vector:  $u_{min} \leq u_k \leq u_{max}$  trong đó

$u_{min}$  và  $u_{max}$  lần lượt là các vectơ giới hạn dưới và trên của lực (hoặc công suất) thruster.

Các ràng buộc này được xem xét trực tiếp trong bộ điều khiển MPC (Mục 3.1), đồng thời đóng vai trò quan trọng trong bài toán phân bổ lực đẩy nhằm đảm bảo tính khả thi và an toàn cho hệ thống.

### 3. Thiết kế điều khiển

#### 3.1. Thiết kế bộ điều khiển dự báo mô hình theo hướng tiết kiệm năng lượng

Bộ điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) là một phương pháp điều khiển tối ưu dựa trên mô hình, trong đó tín hiệu điều khiển được xác định thông qua việc giải một bài toán tối ưu tại mỗi thời điểm lấy mẫu. Ưu điểm nổi bật của MPC là khả năng xử lý trực tiếp các ràng buộc biên của tín hiệu điều khiển và trạng thái hệ thống, điều này đặc biệt phù hợp với các hệ thống định vị động tàu biển, nơi các cơ cấu chấp hành luôn bị giới hạn bởi khả năng vật lý [3,4].

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển MPC được thiết kế dựa trên mô hình động lực học rời rạc của mô hình tàu. Tại mỗi bước thời gian, MPC sử dụng mô hình này để dự báo hành vi tương lai của hệ thống trong một miền dự báo hữu hạn. Trên cơ sở đó, một dãy tín hiệu điều khiển tối ưu được tính toán nhằm đưa trạng thái tàu tiến gần tới giá trị mong muốn [11].

##### a. Mô hình rời rạc hóa

Từ mô hình liên tục của tàu DP, mô hình rời rạc dạng tuyến tính bất biến theo thời gian được xây dựng với chu kỳ lấy mẫu  $T_s$  [3]:

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \quad (5)$$

Trong đó  $x$  là vectơ trạng thái,  $u$  là vectơ điều khiển.

##### b. Hàm mục tiêu bộ điều khiển MPC

Để nâng cao hiệu quả năng lượng, hàm mục tiêu của bộ điều khiển MPC được lựa chọn sao cho không chỉ giảm sai số bám mà còn hạn chế biến thiên của tín hiệu điều khiển [12,14]:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} Q |\eta_k(k+i) - \eta_{ref}(k+i)|^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} R |\Delta u(k+j)|^2 \quad (6)$$

Trong đó  $Q, R$  là các ma trận trọng số và  $N_p$  là chiều dài miền dự báo.  $N_c$  là cửa sổ điều khiển. Thành

phần  $Q |\eta_k(k+i) - \eta_{ref}(k+i)|^2$  đảm bảo độ chính xác định vị, thành phần  $R |\Delta u(k+j)|^2$  đảm bảo làm trơn tín hiệu điều khiển, giúp giảm công suất tiêu thụ và chống hao mòn cơ cấu chấp hành.

##### c. Ràng buộc điều khiển DP trong MPC

Trong hệ thống Định vị động (Dynamic Positioning - DP), một trong những ưu điểm lớn nhất của Điều khiển dự báo mô hình (MPC) chính là khả năng xử lý trực tiếp các ràng buộc (constraints) của hệ thống ngay trong quá trình tính toán tối ưu hóa. Trong bài toán DP, chúng ta không chỉ quan tâm đến việc tàu đứng yên tại một vị trí mà còn phải đảm bảo các cơ cấu chấp hành (thrusters/propellers) hoạt động trong giới hạn vật lý. Bài toán tối ưu MPC được giải với các ràng buộc [7]:

Ràng buộc biên của lực đẩy:  $u_{min} \leq u_k \leq u_{max}$ , Trong đó  $u_k$  là vector lực điều khiển tại thời điểm  $k$

Ràng buộc tốc độ thay đổi lực đẩy: Các động cơ và hệ thống thủy lực cần thời gian để tăng hoặc giảm công suất. Việc thay đổi lực đẩy quá nhanh sẽ gây hại cho máy móc (cơ cấu thực hiện), điều kiện ràng buộc này là  $\Delta u_{min} \leq u(k) - u(k-1) \leq \Delta u_{max}$  hoặc viết cách khác là  $|\Delta u(k)| \leq u_{max} \cdot T_s$  với  $T_s$  là chu kỳ lấy mẫu.

Việc đưa các ràng buộc này vào bài toán tối ưu đóng vai trò quan trọng trong việc giảm dao động lực đẩy và nâng cao hiệu quả năng lượng của hệ thống.

##### d. Phân bổ lực đẩy (Thruster Allocation)

Bài toán phân bổ lực đẩy (Thruster Allocation Problem - TAP) được đặt ra nhằm xác định vectơ điều khiển  $u$  sao cho: Tái tạo chính xác (hoặc gần đúng tối ưu) vectơ lực điều khiển tổng quát  $\tau$  do bộ điều khiển MPC sinh ra. Thỏa mãn các ràng buộc cơ cấu chấp hành. Giảm thiểu tiêu thụ năng lượng hoặc nỗ lực điều khiển [13].

Trong nghiên cứu này, bài toán phân bổ lực được mô hình hóa dưới dạng bài toán tối ưu bậc hai:

$$\min_u J_u = u^T W_u u \quad (7)$$

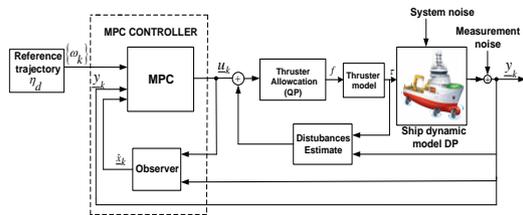
Với điều kiện là:  $\tau = Bu, u_{min} \leq u \leq u_{max}$

Trong đó:  $W_u = W_u^T > 0$  (ma trận xác định dương) là ma trận trọng số, phản ánh tiêu chí tiết kiệm năng lượng và hạn chế sử dụng thruster.

Trong bài báo này, bài toán phân bổ lực được giải tại mỗi bước lấy mẫu và tích hợp trực tiếp với bộ điều khiển MPC, giúp đảm bảo rằng tín hiệu điều khiển cuối cùng vừa thỏa mãn yêu cầu điều khiển chuyển động, vừa tối ưu về năng lượng.

##### e. Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển MPC cho hệ thống định vị động (DP)

Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển MPC cho hệ thống định vị động (DP) được đưa ra như Hình 1, trong đó bộ điều khiển MPC được sử dụng là bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra, có sử dụng bộ quan sát trạng thái (Observer) và bộ ước lượng nhiễu (Disturbance Estimate).



**Hình 1. Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển MPC cho hệ thống định vị động (DP)**

Trong sơ đồ cấu trúc trên:

**Bộ quan sát trạng thái (State Observer):** Trong hệ thống DP, không phải tất cả các biến trạng thái (như vận tốc thực của tàu trong môi trường nhiễu) đều có thể đo được một cách chính xác. Do đó, một bộ quan sát trạng thái được sử dụng để ước lượng vector trạng thái  $\hat{x}$  [11].

Phương trình thiết kế bộ quan sát có dạng:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x}\end{aligned}$$

Trong đó:

$\hat{x}$  là vector trạng thái ước lượng (vị trí và vận tốc).

$y - \hat{y}$  là sai số giữa giá trị đo thực tế từ cảm biến (GPS, IMU) và giá trị dự báo từ mô hình.

$L$  là ma trận hệ số khuếch đại (Gain matrix) của bộ quan sát, được tính toán để đảm bảo sai số ước lượng hội tụ về 0.

**Bộ ước lượng nhiễu (Disturbance Observer):**

Vì các thành phần nhiễu môi trường  $d$  (sóng, gió, dòng chảy) thường không thể đo trực tiếp, bộ ước lượng nhiễu được thiết kế để cung cấp giá trị bù nhiễu cho bộ điều khiển MPC, giúp nâng cao độ chính xác định vị.

Mô hình nhiễu thường được giả định là nhiễu có tốc độ thay đổi chậm ( $\dot{d}$ ). Phương trình thiết kế bộ ước lượng nhiễu cơ bản có dạng [11]:

$$\dot{\hat{d}} = H(y - \hat{y})$$

Trong đó:

$\hat{d}$ : Là giá trị nhiễu môi trường được ước lượng.

$H$ : Là giá trị nhiễu môi trường được ước lượng. Giá trị  $\hat{d}$  sau đó được phản hồi trực tiếp vào bộ điều khiển MPC để tính toán lực bù nhiễu chủ động, giúp tàu giữ vị trí tốt hơn mà không cần đợi sai số vị trí xảy ra quá lớn.

### 3.2. Bộ điều khiển PID

Trong thực tế, bộ điều khiển PID vẫn được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống định vị động tàu biển nhờ cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và độ tin cậy cao. Đối với nhiều hệ thống DP thương mại, PID được xem là giải pháp tiêu chuẩn do không đòi hỏi mô hình động lực học chi tiết và có khả năng làm việc ổn định trong nhiều điều kiện vận hành khác nhau [6].

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PID được thiết kế cho từng kênh điều khiển lực và mô men của hệ thống, bao gồm lực dọc  $F_x$ , lực ngang  $F_y$  và mô men quay  $M_z$ . Luật điều khiển PID tổng quát cho mỗi kênh có dạng:

$$\tau_i(t) = K_{p,i}e_i(t) + K_{i,i}\int_0^t e_i(t)dt + K_{d,i}\frac{de_i(t)}{dt} \quad (8)$$

trong đó  $e_i(t)$  là sai lệch giữa giá trị đặt và giá trị thực của đại lượng điều khiển tương ứng, còn  $K_{p,i}, K_{i,i}, K_{d,i}$  lần lượt là các hệ số tỉ lệ, tích phân và vi phân.

Các tham số PID được lựa chọn và hiệu chỉnh theo nguyên tắc đảm bảo hệ thống đạt được khả năng bám quỹ đạo mong muốn với đáp ứng ổn định, không dao động lớn và không gây quá điều khiển. Việc hiệu chỉnh tham số được thực hiện thông qua mô phỏng, dựa trên kinh nghiệm thực tiễn và các tiêu chí chất lượng như thời gian xác lập, sai lệch tĩnh và độ dao động của tín hiệu điều khiển.

Để đảm bảo tính công bằng trong so sánh với bộ điều khiển MPC, các tham số PID được điều chỉnh sao cho chất lượng bám quỹ đạo của tàu tương đương với trường hợp sử dụng MPC trong cùng kịch bản mô phỏng. Ngoài ra, các lực điều khiển sinh ra bởi bộ PID cũng được giới hạn trong cùng miền ràng buộc biên như bộ điều khiển MPC, phản ánh đúng giới hạn vật lý của hệ thống chấp hành trên tàu.

Mặc dù bộ điều khiển PID có khả năng duy trì quỹ đạo mong muốn, phương pháp này không xét trực tiếp đến bài toán tối ưu năng lượng và không có khả năng dự báo hành vi tương lai của hệ thống. Do đó, trong các chế độ làm việc kéo dài, tín hiệu điều khiển của PID thường có biên độ dao động lớn hơn, dẫn đến tổng năng lượng tiêu thụ cao hơn so với các phương pháp điều khiển tối ưu như MPC. Đây cũng chính là cơ sở để sử dụng bộ điều khiển PID làm đối tượng so sánh nhằm làm rõ ưu điểm của bộ điều khiển MPC được đề xuất trong bài báo.

### 4. Mô phỏng và đánh giá kết quả

Trong mục này, các bộ điều khiển đã xây dựng, bao gồm bộ điều khiển dự báo mô hình (MPC) và bộ

điều khiển PID, được đánh giá thông qua các kịch bản mô phỏng số. Mục tiêu là so sánh khả năng bám quỹ đạo, nỗ lực điều khiển và mức tiêu thụ năng lượng của hai phương pháp điều khiển trong bài toán định vị động tàu biển.

**4.1. Kịch bản và tham số mô phỏng**

Kịch bản mô phỏng được xây dựng cho bài toán điều khiển tàu di chuyển từ điểm ban đầu A đến điểm đích B trong mặt phẳng ngang. Quỹ đạo đặt  $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$  được xác định sao cho tàu đạt được vị trí mong muốn với sai lệch nhỏ nhất.

**Bảng 1. Thông số tàu mô phỏng trong nghiên cứu**

Thông số	Giá trị
Độ dài	77,7 (m)
Chiều rộng	20 (m)
Mớn nước thiết kế	4,6 (m)
Số cơ cấu đẩy	3
Giới hạn lực $u_{min}$	(1.0e <sup>4</sup> , 2.0e <sup>4</sup> , 1.0e <sup>5</sup> ) N.m
Giới hạn lực $u_{max}$	(3.8e <sup>4</sup> , 4.7e <sup>4</sup> , 3.6e <sup>5</sup> ) N.m
Hằng số thời gian $T_{thr}$	1(s)
Vị trí Thruster 1 ( $x_1, y_1$ )	(30, 8) (m)
Vị trí Thruster 2 ( $x_1, y_1$ )	(30, -8) (m)
Vị trí Thruster 3 ( $x_1, y_1$ )	(-35, 0) (m)
M11	5.3122e6
M22	8.8231e6
M33	3.7454e9
D11	5.024e4
D22	2.7229e5
D23	-4.3933e6
D32	-4.3933e6
D33	4.1894e6

**Bảng 2. Thông số mô phỏng MPC trong nghiên cứu**

Thông số	Giá trị
Thời gian lấy mẫu: $T_s$	0.2 (s)
Cửa sổ dự báo: $N$	20
Cửa sổ điều khiển: $N_c$	5
Trọng số trạng thái: $Q$	diag(100,100,50)
Trọng số điều khiển: $R$	diag(10,10,50)
Trọng số điều khiển: $W_u$	diag(1,1,0.5)

**Bảng 3. Bảng thông số cài đặt bộ PID**

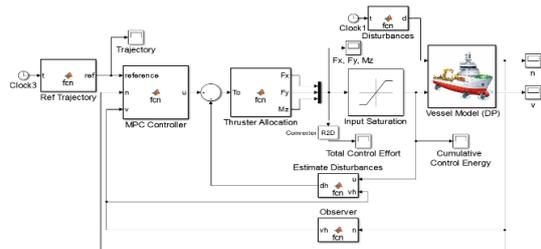
Thông số	Giá trị
$K_p$	2.46
$K_I$	0.12
$K_D$	1.89

Mô hình động lực học tàu được xét với ba bậc tự do (surge, sway và yaw), phù hợp với hệ thống định vị động. Các nhiễu môi trường tác động lên tàu, bao gồm nhiễu sóng và gió, được mô hình hóa dưới dạng nhiễu ngoại sinh giới hạn nhằm phản ánh điều kiện làm việc thực tế.

Các ràng buộc lực điều khiển của cơ cấu chấp hành được áp đặt như trong mục phân bổ lực đẩy, đảm bảo tín hiệu điều khiển luôn nằm trong giới hạn vật lý cho phép. Các tham số của bộ điều khiển MPC và PID được hiệu chỉnh để đảm bảo khả năng so sánh công bằng giữa hai phương pháp.

**4.2. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển MPC trong hệ DP**

Cấu trúc mô phỏng Simulink như trên Hình 2. Các mô hình bộ điều khiển MPC, mô hình phân bổ lực, mô hình tàu thủy trong hệ DP, mô hình bộ quan sát, mô hình ước lượng nhiễu được xây dựng bằng m-file theo các phương trình đã đưa ra ở trên.



**Hình 2. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển MPC cho hệ thống định vị động (DP)**

Trong mô phỏng, nhiễu môi trường tác động lên tàu được mô hình hóa dưới dạng lực và mômen nhiễu trong hệ tọa độ thân tàu. Các nhiễu này đại diện cho tác động tổng hợp của sóng, gió và dòng chảy. Nhiễu được giả thiết là quá trình ngẫu nhiên, có giá trị trung bình bằng không, tính chất dừng và ergodic. Trong mô phỏng, nhiễu được tạo bằng nhiễu Gaussian trắng với biên độ hữu hạn và được cộng trực tiếp vào phương trình động lực học của tàu.

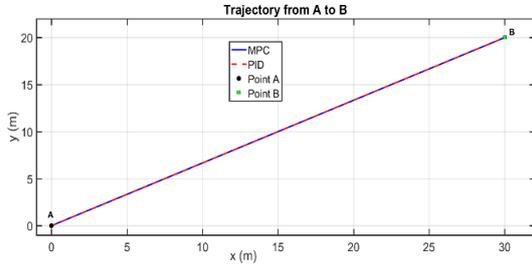
**4.3. Kết quả mô phỏng và đánh giá**

Trong mục này, hiệu quả của bộ điều khiển MPC được đánh giá và so sánh với bộ điều khiển PID thông qua năm đồ thị mô phỏng, bao gồm quỹ đạo chuyển động, các thành phần lực điều khiển  $F_x, F_y$  mô-men quay  $M_z$  tổng lực điều khiển và tổng năng lượng điều khiển tích lũy.

a. *Kết quả mô phỏng và đánh giá quỹ đạo từ A đến B với bộ điều khiển MPC và PID.*

Quỹ đạo chuyển động của tàu Hình 3 minh họa quỹ đạo di chuyển của tàu từ điểm ban đầu A đến điểm

đích B trong mặt phẳng ngang dưới tác động của hai bộ điều khiển MPC và PID. Kết quả cho thấy cả hai bộ điều khiển đều đảm bảo tàu đạt được vị trí mong muốn với sai lệch nhỏ.



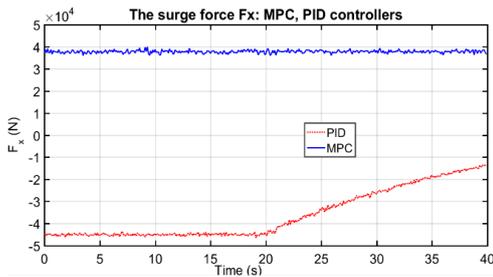
**Hình 3. Đồ thị quỹ đạo chuyển động của tàu từ A đến B**

Đáng chú ý, quỹ đạo của tàu dưới tác động của bộ điều khiển MPC trùng khớp với quỹ đạo của bộ điều khiển PID, cho thấy hai phương pháp đạt được mức độ bám quỹ đạo tương đương. Điều này đảm bảo tính công bằng trong so sánh, đồng thời cho phép đánh giá hiệu quả của các bộ điều khiển dựa trên nỗ lực điều khiển và tiêu thụ năng lượng.

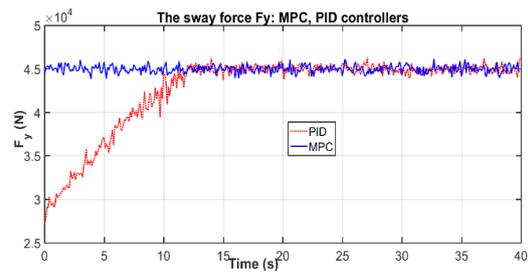
**b. Kết quả mô phỏng và đánh giá lực điều khiển theo phương dọc  $F_x$ ,  $F_y$  giữa MPC và PID**

Kết quả mô phỏng lực điều khiển theo phương dọc  $F_x$ ,  $F_y$  giữa MPC và PID được thể hiện trên Hình 4, 5.

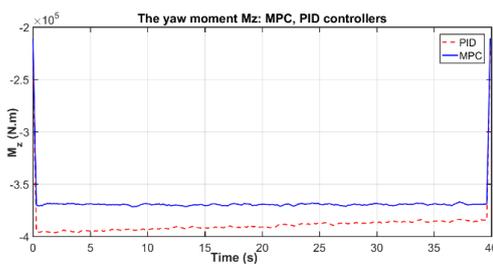
Hình 4 và Hình 5 mô tả các thành phần lực điều khiển  $F_x$  và  $F_y$  do bộ điều khiển MPC và PID sinh ra. Có thể nhận thấy rằng các lực điều khiển của hai bộ điều khiển có xu hướng biến thiên tương đồng, phản



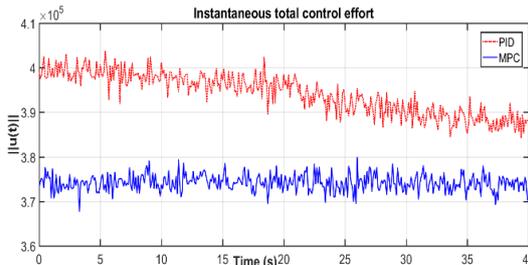
**Hình 4. Đồ thị lực điều khiển  $F_x$**



**Hình 5. Đồ thị lực điều khiển  $F_y$**



**Hình 6. Đồ thị mô-men quay  $M_z$**



**Hình 7. So sánh tổng lực điều khiển của MPC và PID**

ánh yêu cầu bám quỹ đạo giống nhau.

Tuy nhiên, tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển PID xuất hiện dao động lớn hơn, đặc biệt trong giai đoạn quá độ. Ngược lại, bộ điều khiển MPC tạo ra lực điều khiển mượt hơn và tiệm cận ranh giới ràng buộc một cách có kiểm soát. Điều này cho thấy MPC xử lý trực tiếp các ràng buộc lực trong bài toán tối ưu, trong khi PID không có khả năng này.

**c. Kết quả mô phỏng và đánh giá mô men quay  $M_z$  giữa MPC và PID.**

Hình 6 thể hiện mô men quay  $M_z$  của hai bộ điều khiển.

Kết quả cho thấy mô-men điều khiển của bộ điều khiển PID có biên độ lớn hơn và xuất hiện nhiều dao động hơn so với MPC.

Bộ điều khiển MPC tạo ra tín hiệu  $M_z$  trơn hơn và ổn định hơn, nhờ khả năng dự báo diễn biến tương lai của hệ thống và tối ưu hóa tín hiệu điều khiển trên một khoảng thời gian hữu hạn. Cụ thể trong khi bộ điều khiển PID duy trì nỗ lực điều khiển cao, dao động quanh mức  $3,9 \cdot 10^5$  đến  $4,0 \cdot 10^5$ , thì MPC duy trì ổn định ở mức thấp hơn đáng kể, khoảng  $3,75 \cdot 10^5$ . Điều này chứng tỏ MPC giúp tiết kiệm năng lượng khoảng 5-7% so với PID.

Điều này góp phần cải thiện chất lượng điều khiển hướng và giảm tải cho các cơ cấu chấp hành.

**d. Kết quả mô phỏng và đánh giá tổng lực điều khiển của MPC và PID.**

Hình 7 minh họa tổng lực điều khiển của hai bộ điều khiển, được tính toán dựa trên chuẩn Euclid của

vector lực điều khiển. Được tính từ các thành phần lực và mô men điều khiển:

$u_{total}(t) = \sqrt{F_x^2(t) + F_y^2(t) + M_z^2(t)}$ , nó phản ánh mức độ sử dụng năng lượng điều khiển.

Có thể quan sát thấy rằng tổng lực điều khiển của bộ điều khiển MPC nhỏ hơn so với bộ điều khiển PID trong suốt quá trình mô phỏng. Cụ thể độ chính xác và tính ổn định: Bộ điều khiển MPC (đường xanh) duy trì mô-men quay cực kỳ ổn định tại giá trị xấp xỉ  $3,75.10^5 \text{N.m}$  sau giai đoạn quá độ. Trong khi đó, PID (đường đỏ) không chỉ tiêu tốn lực lớn hơn (duy trì ở mức gần  $3,9.10^5 \text{N.m}$ ) mà còn xuất hiện nhiều "gai" nhiễu và dao động liên tục.

Kết quả này cho thấy bộ điều khiển MPC đạt được cùng hiệu suất bám quỹ đạo với nỗ lực điều khiển thấp hơn, phản ánh ưu thế của phương pháp điều khiển tối ưu có xét đến ràng buộc.

*e. Kết quả mô phỏng và đánh giá tổng năng lượng điều khiển của MPC và PID*

Hình 8 mô tả tổng năng lượng điều khiển tích lũy của hai bộ điều khiển. Tổng năng lượng điều khiển được xác định thông qua tích phân theo thời gian của bình phương tín hiệu điều khiển. Được tính bằng tích phân theo thời gian của tổng lực bình phương:

$$E(t) = \int_0^t (F_x^2(\tau) + F_y^2(\tau) + M_z^2(\tau))l\tau, \text{ nó đánh giá}$$

hiệu quả năng lượng tổng thể.

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển MPC tiêu thụ năng lượng thấp hơn so với bộ điều khiển PID. Nguyên nhân là do MPC hạn chế các dao động không cần thiết của tín hiệu điều khiển và phân bố lực một cách hợp lý giữa các cơ cấu chấp hành. Đây là một ưu điểm quan trọng của MPC đối với các hệ thống định vị động yêu cầu vận hành liên tục và tiết kiệm năng lượng.

### 4.3. Nhận xét

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển MPC đảm bảo khả năng bám quỹ đạo tương đương với bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, nhờ xét đến ràng buộc và tối ưu hàm mục tiêu, MPC giúp giảm biên độ dao động của lực điều khiển và làm giảm tổng năng lượng tiêu thụ. Điều này đặc biệt có ý nghĩa đối với các hệ thống DP làm việc dài hạn.

### 5. Kết luận

Bài báo này đã xây dựng thành công bộ điều khiển dự báo mô hình (MPC) cho hệ thống định vị động học tàu thủy (DP) có xét đến các ràng buộc về cơ cấu chấp hành. Thông qua việc thiết lập hàm mục tiêu tối ưu

hóa đa mục tiêu kết hợp với các ma trận trọng số  $Q, R, W_u$  phù hợp, hệ thống đã chứng minh được khả năng duy trì vị trí và hướng tàu ổn định ngay cả khi chịu tác động của nhiễu môi trường phức tạp. Kết quả mô phỏng cho thấy MPC không chỉ cải thiện độ chính xác định vị so với bộ điều khiển PID truyền thống mà còn đảm bảo các tín hiệu điều khiển luôn nằm trong giới hạn vận hành an toàn của máy đẩy. Việc tích hợp trọng số  $W_u$  để phạt tốc độ thay đổi lực ( $\Delta u$ ) giúp làm mịn tín hiệu điều khiển, trực tiếp giảm thiểu hao mòn cơ khí và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng.

### Hạn chế của nghiên cứu

Mặc dù đạt được những kết quả khả quan, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế cần được xem xét:

*Mô hình hóa đơn giản:* Nghiên cứu hiện tại đang sử dụng mô hình tàu tuyến tính hóa quanh điểm làm việc, điều này có thể dẫn đến sai lệch khi tàu vận động với biên độ lớn hoặc trong điều kiện biển cực đoan nơi các đặc tính phi tuyến trở nên rõ rệt.

*Giả định về năng lượng:* Việc xấp xỉ năng lượng tiêu thụ thông qua bình phương lực đẩy ( $u^2$ ) chưa phản ánh hoàn toàn đặc tính phi tuyến giữa lực và công suất thực tế của các loại thruster khác nhau.

### Hướng phát triển tiếp theo

Trong các nghiên cứu tương lai, tác giả dự kiến tập trung vào các hướng sau:

*Điều khiển dự báo phi tuyến (NMPC):* Ứng dụng mô hình phi tuyến đầy đủ để nâng cao độ chính xác dự báo khi tàu thay đổi trạng thái mạnh.

*Tối ưu hóa năng lượng thực tế:* Xây dựng hàm mục tiêu dựa trên mô hình công suất thực nghiệm của máy đẩy để tối đa hóa tính kinh tế trong vận hành.

*Thực nghiệm trên mô hình:* Triển khai thuật toán trên mô hình tàu vật lý trong bể thử để kiểm chứng tính đúng đắn của các kết quả mô phỏng trước khi ứng dụng thực tế.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.71**.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. I. Fossen (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Wiley.
- [2] T. I. Fossen (2002), *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Marine Cybernetics.
- [3] E. F. Camacho, C. Bordons (2007), *Model Predictive Control*, Springer.
- [4] J. Rawlings, D. Mayne (2009), *Model Predictive*

- Control: Theory and Design*, Nob Hill Publishing.
- [5] Gao, X., & Li, T. (2024), *Dynamic Positioning Control for Marine Crafts: A Survey and Recent Advances*. Journal of Marine Science and Engineering, Vol.12(3), 362.
- [6] Ye, Y., Wang, Y., Wang, L., & Wang, X. (2023), *A Modified Predictive PID Controller for Dynamic Positioning of Vessels with Autoregressive Model*. Ocean Engineering, Vol. 284, 115176,.
- [7] H. J. Ferreau, H. G. Bock, M. Diehl, (2008), *An online active set strategy to overcome the limitations of explicit MPC*, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.18, No.8, pp.816-830.
- [8] Q. Hu, C. Hu, X. Li, et al. (2015), *Adaptive Fuzzy Controller Design for Marine Dynamic Positioning System of Vessels*. Applied Ocean Research.
- [9] Shi, Q., Hu, C., Li, X., Guo, X., & Yang, J. (2023), *Finite-time Adaptive Anti-disturbance Constrained Control for Dynamic Positioning*. Ocean Engineering, 2023
- [10] T. D. Nguyen and K. D. Do, (2023), *Dynamic positioning of ships with actuator constraints: A non-linear model predictive control approach*, International Journal of Systems Science, Vol.54, No.2, pp.312-328.
- [11] Nguyễn Hữu Quyền (2019), *Nghiên cứu giải pháp điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy có ràng buộc tín hiệu và bất định hàm ở đầu vào*, Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.
- [12] H. Wang et al., (2024), *Fast nonlinear model predictive control for ship path following with safety constraints*, Control Engineering Practice, Vol.142, p. 105741.
- [13] T. D. Nguyen and K. D. Do, (2023), *Dynamic positioning of ships with actuator constraints: A non-linear model predictive control approach*, International Journal of Systems Science, Vol.54, No.2, pp.312-328.
- [14] J. Kim and H. Myung, (2024), *Reinforcement learning-based energy-efficient dynamic positioning for autonomous surface vessels*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.12, No.1, p. 45.
- [15] S. Li and R. R. Negenborn, (2023), *Distributed nonlinear model predictive control for cooperative dynamic positioning of multiple marine vessels*, Ocean Engineering, Vol.285, p. 115402.

Ngày nhận bài:	11/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	18/01/2026
Ngày duyệt đăng:	20/01/2026