

# Mô hình mô phỏng sử dụng phương pháp HIL ứng dụng cho các nghiên cứu chuyển động 6 bậc tự do tàu container

## The simulation model uses the HIL method applied for studying the motion of 6 degrees of freedom of container ships

**Nguyễn Đình Thạch**

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Tác giả liên hệ: thachnd.ddt@vimaru.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/12/2023; Ngày chấp nhận đăng: 15/1/2024

### Tóm tắt:

Bài báo này trình bày việc xây dựng mô hình mô phỏng phần cứng trong vòng lặp (HIL) để nghiên cứu, thử nghiệm các bộ điều khiển quỹ đạo cho tàu container. Mô hình đề xuất gồm một đối tượng điều khiển ảo 3D và một bộ điều khiển quỹ đạo thực. Đối tượng ảo là một mô hình động lực học 3D được xây dựng dựa trên hệ phương trình 6 bậc tự do (6-DOF), hồ sơ kỹ thuật của tàu và phần mềm Unity. Trong đó, bộ điều khiển tạo nên từ phần mềm MATLAB/Simulink. Bộ điều khiển và đối tượng điều khiển được truyền thông với nhau qua việc sử dụng giao thức Modbus TCP/IP với đường truyền vật lý Ethernet. Bên cạnh đó, mô hình đề xuất bao gồm đầy đủ các thành phần nhiễu loạn chính của môi trường tác động lên tàu, rất nhiều nghiên cứu về điều khiển quỹ đạo tàu trước đây đều bỏ qua. Kết quả thử nghiệm cho thấy mô hình hoạt động tin cậy, chính xác và có thể áp dụng để nghiên cứu, thử nghiệm các bộ điều khiển quỹ đạo cho tàu thủy.

**Từ khóa:** HIL; Tàu container; Mô hình động lực học 3D; 6 bậc tự do; Phần mềm Unity.

### Abstract:

This article presents the construction of a hardware-in-the-loop (HIL) simulation model to research and test trajectory controllers for container ships. The proposed model consists of a 3D virtual control object and a real trajectory controller. The virtual object is a 3D dynamic model built based on 6 degrees of freedom (6-DOF) equations, technical records of the ship, and Unity software. Meanwhile, the controller is built using Matlab/Simulink software. The controller and control object communicate with each other using the Modbus TCP/IP protocol with a physical Ethernet link. Besides, the proposed model also fully includes the main turbulence components of the environment affecting the ship that many previous studies on ship trajectory control have ignored. The test results show that the model operates reliably, and accurately, and can be applied to research and test trajectory controllers for ships.

**Keywords:** HIL; Container ship; 3D dynamic model; 6-DOF; Unity software.

### 1. Giới thiệu

Việt Nam là một quốc gia có tiềm lực rất lớn để phát triển kinh tế biển. Các công ty vận tải biển và số lượng các đội tàu đang phát triển không ngừng trong những năm gần đây. Để điều khiển

tàu hoạt động trên biển được an toàn, mang lại hiệu quả kinh tế, cần đến những bộ điều khiển quỹ đạo cho tàu.

Để nghiên cứu về các bộ điều khiển cho tàu nói riêng và các bộ điều khiển trong công

nghiệp nói chung, những mô hình mô phỏng phần cứng trong vòng lặp HIL đang ngày càng được sử dụng rộng rãi. Mô hình HIL có nhiều ưu điểm như nâng cao tính an toàn, tiết kiệm thời gian, chi phí và chất lượng điều khiển. Những HIL trong lĩnh vực hàng hải được đề cập trong các công trình nghiên cứu sau đây.

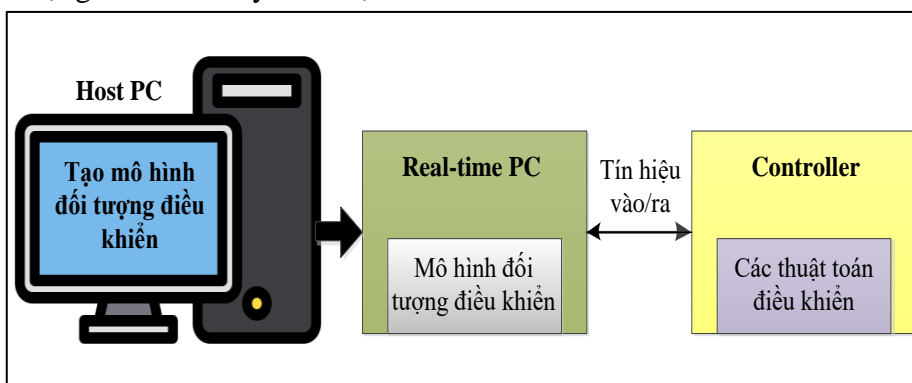
Johansen và cộng sự [1] đã xây dựng một mô hình để thử nghiệm các bộ điều khiển định vị động DP cho tàu thủy. Dubey và cộng sự trong nghiên cứu [2] đã xây dựng một mô hình HIL để thử nghiệm, kiểm chứng hệ thống điều khiển cho các tàu không người lái, mô hình động học của đối tượng điều khiển trong nghiên cứu này sử dụng là Notomo, trong khi đó, bộ điều khiển là card cRIO9064 hãng NI. Tài liệu [3] đề xuất xây dựng một mô hình thử nghiệm các bộ điều khiển plug-and-play cho thiết bị ngầm không người lái AUVs. Aarseth và cộng sự trong nghiên cứu [4] đề xuất mô hình HIL để thử nghiệm các hệ thống cứu hộ ROVs. Tài liệu [5] đề cập mô hình thử nghiệm bộ điều khiển bám quỹ đạo cho tàu thủy có ràng buộc tín hiệu và bất định hàm ở đầu vào. Nghiên cứu [6] xây dựng mô hình HIL để thử nghiệm các bộ điều khiển chuyển động cho tàu thủy với mục tiêu

tối ưu nhiên liệu tiêu thụ áp dụng cho tàu chở hàng. Từ đó, nghiên cứu này đề xuất xây dựng một mô hình mô phỏng sử dụng phương pháp HIL với mục tiêu ứng dụng trong những nghiên cứu về chuyển động tàu với 6-DOF: Tạo ra bộ dữ liệu cho những mô hình mô phỏng lái tàu sàn treo 6-DOF, thử nghiệm các bộ điều khiển ổn định cho tàu, thử nghiệm hệ thống tự động chống nghiêng tàu thủy,...

Phần còn lại của bài báo được sắp xếp như sau: Mục 2 trình bày việc xây dựng cấu trúc mô hình mô phỏng HIL. Quá trình xây dựng chi tiết mô hình được thể hiện trong mục 3. Mục 4 là thử nghiệm mô hình đã xây dựng. Một vài kết luận được đưa ra trong mục 5.

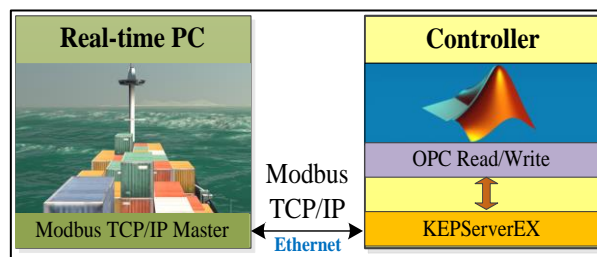
## 2. Đề xuất cấu trúc của mô hình

Một bộ mô phỏng HIL truyền thống có cấu trúc được thể hiện như Hình 1 [3]. Trong đó, Host PC là máy tính để thu thập, xây dựng mô hình toán cho đối tượng điều khiển thực. Real-time PC là máy tính chạy mô hình của đối tượng theo thời gian thực nhằm thay thế cho đối tượng thật và Controller là bộ điều khiển chứa các thuật toán, chương trình điều khiển.



Hình 1. Cấu trúc mô hình mô phỏng HIL truyền thống [3].

Dựa trên cấu trúc mô hình HIL truyền thống cùng tài liệu [6], mô hình đề xuất được xây dựng như trong Hình 2. Trong đó, đối tượng điều khiển là một mô hình động lực học 3D được tạo nên từ hệ phương trình 6-DOF của tàu chở container, mô hình này được chạy trên máy tính Real-time PC.



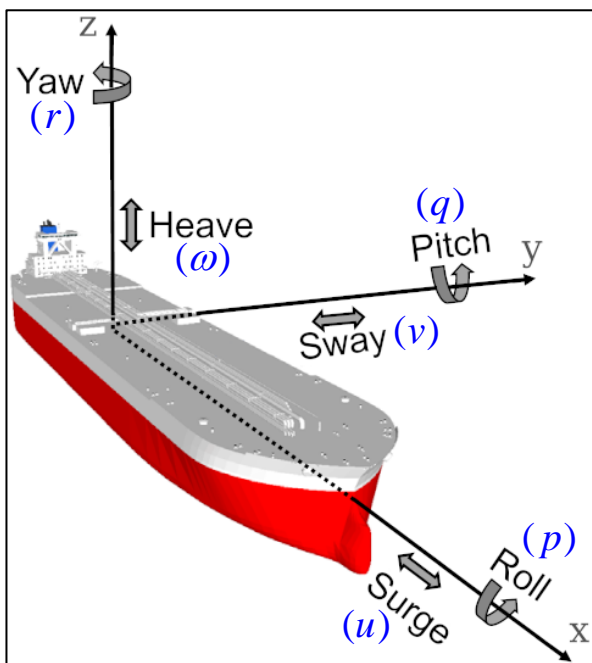
Hình 2. Cấu trúc mô hình đề xuất.

Bên cạnh đó, bộ điều khiển Controller được xây dựng bằng phần mềm MATLAB/Simulink. Với nhiều thư viện, công cụ được tích hợp trong phần mềm MATLAB/Simulink, do đó, các bộ điều khiển có thể dễ dàng được tổng hợp, thay đổi các thông số trong quá trình nghiên cứu, thử nghiệm. Bộ điều khiển và đối tượng điều khiển được truyền thông với nhau bằng giao thức Modbus TCP/IP thông qua một cáp Ethernet. Máy tính chứa bộ điều khiển được cài đặt phần mềm KEPServerEX để giao tiếp với các khối OPC Read/Write trong Simulink và thư viện Modbus TCP/IP Master được lập trình trong phần mềm Unity chứa mô hình động lực học 3D của tàu.

### 3. Xây dựng mô hình mô phỏng HIL

#### 3.1. Mô hình đối tượng điều khiển

Trong nghiên cứu này, đối tượng điều khiển là tàu container thực được thay thế bằng mô hình động lực học 3D, xây dựng dựa trên mô hình toán 6 bậc tự do của tàu và hồ sơ kỹ thuật của nó. Khi nghiên cứu về mô hình toán của tàu, thường sử dụng sáu chuyển động cơ bản gồm: roll - góc lắc ngang; pitch - góc lắc dọc; yaw - góc quay trở; rate of heave - vận tốc trượt đứng; rate of surge - vận tốc trượt dọc và rate of sway - vận tốc trượt ngang (Hình 3).



Hình 3. Các chuyển động 6-DOF của tàu [7].

Phương trình toán của tàu với 6-DOF được thể hiện như sau [7], [8]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)vM\dot{v} + C(v)v + D(v) + G\eta = \tau_E + \tau \quad (1)$$

Trong đó,  $\eta$  là véc tơ vị trí và hướng,  $J(\eta)$  là ma trận chuyển đổi,  $v = [u, v, \omega, p, q, r]^T$  là véc tơ vận tốc góc và vận tốc dài,  $M$  là ma trận quán tính,  $C(v)$  là ma trận Coriolis và lực hướng tâm,  $D(v)$  là ma trận giảm chấn,  $G$  là ma trận hằng số,  $\tau_E$  và  $\tau$  là các lực và mô men của nhiều môi trường và hệ lực đẩy (chân vịt và bánh lái). Trong phương trình (1), thành phần lực và mô men gây ra bởi các nhiễu môi trường gồm ba thành phần chính là sóng ( $\tau_{waves}$ ), gió ( $\tau_{wind}$ ) và dòng chảy ( $\tau_{currents}$ ) như phương trình dưới đây:

$$\tau_E = \tau_{waves} + \tau_{wind} + \tau_{currents} \quad (2)$$

Trong phương trình (2), thành phần lực và mô men gây ra bởi dòng chảy ảnh hưởng trực tiếp đến vận tốc của tàu. Trong khi đó, các thành phần lực và mô men gây ra bởi sóng và gió gồm hai thành phần lực tác động vào trục dọc, trục ngang của tàu và một thành phần mô men quay trở được trình bày chi tiết trong tài liệu [7]. Với định hướng nghiên cứu là các tàu chở container có một chân vịt chính và một bánh lái, đồng thời, bỏ qua các lực và mô men của chân vịt mũi, các lực và mô men của hệ lực đẩy có thể áp dụng được cho loại tàu này [9]:

$$\tau = [\tau_U, \tau_V, 0, 0, 0, \tau_R]^T \quad (3)$$

Với  $\tau$  là các lực và mô men tổng của hệ lực đẩy tác động lên con tàu,  $\tau_U$  là véc tơ lực tác động vào tàu theo trục dọc,  $\tau_V$  là véc tơ lực tác động vào tàu theo trục ngang;  $\tau_R$  là mô men quay trở tác động lên tàu gây ra bởi bánh lái. Lực tác động vào con tàu theo trục dọc gồm thành phần lực gây ra bởi chân vịt  $\tau_P$  và bánh lái  $\tau_{VR}$ :

$$\tau_U = \tau_P + \tau_{VR} \quad (4)$$

$$\tau_P = (1 - t_P)\rho n_p^2 D_p^4 K_T \quad (5)$$

$$\tau_{VR} = -(1 - t_R)F_N \sin \delta \quad (6)$$

Trong đó,  $t_p$  là hệ số giảm trừ lực đẩy chân vịt,  $n_p$  là tốc độ quay của chân vịt,  $D_p$  là đường kính chân vịt,  $K_T$  là hệ số đẩy chân vịt,  $t_R$  hệ số giảm trừ lực cản bánh lái,  $F_N$  là lực tác dụng vào bánh lái và  $\delta$  là góc bẻ lái.

Lực tác động vào tàu theo trục ngang gồm thành phần lực gây ra khi bẻ bánh lái  $\tau_v$  được tính theo phương trình sau:

$$\tau_v = -(1 + a_H)F_N \cos \delta \quad (7)$$

Thành phần mô men quay trở tác động vào tàu được tính theo phương trình:

$$\tau_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \quad (8)$$

Với  $x_H$  là tọa độ điểm tác dụng của lực theo chiều dọc và  $x_R$  là tọa độ của bánh lái theo chiều dọc tàu.

**Bảng 1.** Thông số chính của tàu HAIAN TIME.

STT	Thông số	Giá trị
1	Chiều dài lớn nhất	161,85 m
2	Chiều rộng lớn nhất	25,6 m
3	Trọng tải tàu	18055 T
4	Chiều cao mạn khô	3,878 m
5	Công suất máy chính	11440 kW
6	Tốc độ máy chính	127 rpm



**Hình 4.** Mô hình động lực học 3D.

Để xây dựng một đối tượng động lực học 3D ảo nhằm thay thế cho tàu thực, tác giả sử dụng phần mềm Unity. Unity là Game Engine rất

mạnh, hỗ trợ ba ngôn ngữ lập trình phổ biến là C#, Boo và UnityScript. Phần mềm này hỗ trợ mô phỏng vật lý cho đối tượng thông qua thuộc tính RigidBody. Vì vậy, từ phương trình (1) là phương trình chuyển động 6-DOF của tàu, kết hợp với các phương trình (2), (3) và hồ sơ kỹ thuật của tàu thực, mô hình động lực học 3D được xây dựng sử dụng phần mềm Unity để thay thế cho tàu thực HAIAN TIME, được minh họa đang hành trình trên biển như Hình 4.

Chi tiết về quá trình xây dựng và thử nghiệm mô hình này được trình bày trong nghiên cứu [10] của tác giả.

### 3.2. Xây dựng bộ điều khiển

Với mục tiêu xây dựng mô hình mở, tại đó, bộ điều khiển có thể dễ dàng được thiết kế, lập trình và thay đổi các thông số. Tác giả xây dựng một bộ điều khiển quỹ đạo sử dụng logic mờ kết hợp với bộ điều khiển PID để thử nghiệm mô hình đề xuất. Trước tiên, hướng đi tính toán  $\psi_F$  sử dụng logic mờ để gửi đến bộ điều khiển PID [11]:

$$\psi_F = \psi_1 + (\psi_2 - \psi_1) \times FZ \quad (9)$$

Trong đó,  $\psi_1$  là góc giữa đường thẳng nối tâm tàu đến điểm waypoint gần nhất với hướng Bắc,  $\psi_2$  là góc giữa đường thẳng nối tâm tàu đến điểm waypoint gần thứ hai với hướng Bắc,  $FZ$  là một hệ số được tính toán sử dụng logic mờ. Các hàm thuộc đầu vào, đầu ra và các mệnh đề hợp thành, được tham khảo như trong nghiên cứu [11]. Sau khi tính toán hướng đi mong muốn, tín hiệu được gửi tới bộ điều khiển PID để tính toán giá trị góc bẻ lái đặt cho tàu 3D như phương trình sau:

$$\delta_{order} = K_P(\psi_F - \psi) + K_I \int_0^t (\psi_F - \psi) dt - K_D \dot{\psi} \quad (10)$$

Trong đó,  $\delta_{order}$  là góc bẻ lái đặt gửi đến hệ thống lái tàu 3D,  $K_P$  là hệ số tỉ lệ,  $K_I$  là hệ số tích phân,  $K_D$  là hệ số vi phân, và  $\psi$  là hướng đi của tàu tại thời điểm tính toán.

### 3.3. Xây dựng các tín hiệu đầu ra của mô hình

Để phục vụ mục đích nghiên cứu các chuyển động của tàu, các biến đầu ra của mô hình được thể hiện như trong Bảng 2. Các thông số cần thu thập, được lập trình thông qua sử dụng những khối hàm trong Unity với ngôn ngữ lập trình

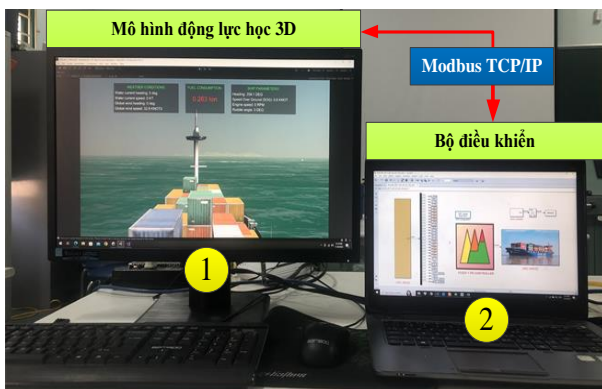
C#. Các tín hiệu trên đều được thu thập và lưu vào cơ sở dữ liệu với thời gian lấy mẫu được đặt là 0.5s. Tọa độ theo trục X và trục Y được lưu lại để dùng cho việc dựng quỹ đạo tàu đã hành trình trên biển. Các tọa độ này kết hợp với thời gian hành trình được lưu có thể tính vận tốc trung bình của tàu trong mỗi hành trình.

**Bảng 2.** Các biến đầu ra của mô hình đề xuất.

TT	Tên biến	Khối hàm (Unity và Matlab)
1	Tọa độ X	Rigidbody.transform.position
2	Tọa độ Y	Rigidbody.transform.position
3	Thời gian hành trình	Đồng hồ Clock (Simulink)
4	Góc lắc ngang	Transform.eulerAngles
5	Góc lắc dọc	Transform.eulerAngles
6	Góc quay trở	Transform.eulerAngles
7	Vận tốc trượt ngang	Rigidbody.velocity
8	Vận tốc trượt dọc	Rigidbody.velocity
9	Vận tốc trượt đứng	Rigidbody.velocity

Bên cạnh đó, sáu thông số là các chuyển động của tàu với sáu trục (thông số 4 đến 9 trình bày trong Bảng 2) được thu thập để phục vụ cho việc nghiên cứu, đánh giá các dao động của tàu. Sáu thông số này thu thập được bằng cách sử dụng các khối hàm trong phần mềm Unity.

### 3.4. Xây dựng mô hình mô phỏng



**Hình 5.** Mô hình đề xuất đã xây dựng.

Trên Hình 5 là mô hình đề xuất đã xây dựng. Trong đó, khối thứ nhất là mô hình động lực học 3D của tàu thực được dựng bằng phần mềm Unity và khối thứ hai là máy tính đóng vai trò

như bộ điều khiển thực. Giữa hai khối được kết nối với nhau thông qua sử dụng một cáp Ethernet với giao thức Modbus TCP/IP.

Với mục đích nghiên cứu các thuật toán, bộ điều khiển chuyển động cho tàu, tác giả sử dụng phần mềm MATLAB/Simulink để thiết kế bộ điều khiển. Đây là phần mềm có thể mạnh bởi các thuật toán hiện đại, dễ dàng thay đổi chương trình, thuật toán trong quá trình thử nghiệm và nghiên cứu. Quá trình thử nghiệm mô hình đề xuất được trình bày như phần dưới đây.

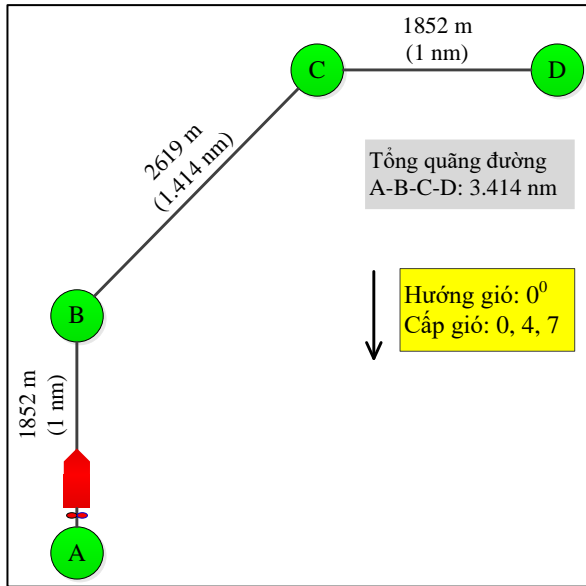
## 4. Thử nghiệm mô hình

### 4.1. Xây dựng kịch bản thử nghiệm

Mô hình đề xuất được thử nghiệm theo các kịch bản thể hiện như Hình 6. Tàu động học 3D được điều khiển đi qua một quỹ đạo các điểm waypoint A-B-C-D. Tuy nhiên, có ba trường hợp cấp gió khác nhau được cài đặt với cùng một hướng gió thổi từ phía Bắc. Cụ thể, ba kịch bản này được thể hiện như trong Bảng 3.

**Bảng 3.** Ba kịch bản thử nghiệm.

Kịch bản	Tốc độ đặt máy chính	Hướng gió (độ)	Cấp gió
1	105 rpm	00 – north	0
2	105 rpm	00 – north	4
3	105 rpm	00 – north	7

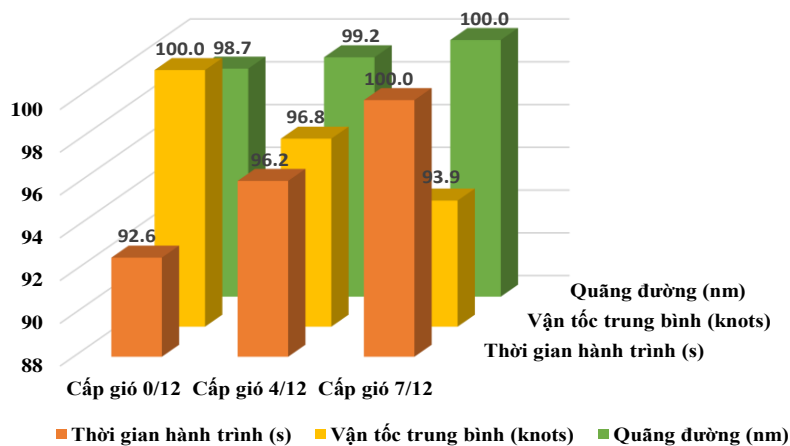


**Hình 6.** Quỹ đạo thử nghiệm.

Khi tàu hành trình ở chế độ lái tự động trên biển, giới hạn góc bẻ lái thường được đặt trong khoảng từ 50 đến 200, tùy vào điều kiện thời tiết. Với những điều kiện thời tiết giả định như trong Bảng 3, giới hạn góc bẻ lái cài đặt cho bộ điều khiển góc bẻ lái của tàu 3D là  $\pm 150$ .

#### 4.2. Kết quả thử nghiệm

Khi thử nghiệm tàu di chuyển theo quỹ đạo đặt với các kịch bản khác nhau bằng mô hình HIL, giá trị một số thông số chính được thể hiện như



**Hình 7.** Kết quả thử nghiệm theo phần trăm so với giá trị lớn nhất (% max\_value).

trên Bảng 4. Các thông số khảo sát trong ba trường hợp cấp gió khác nhau là thời gian hành trình, vận tốc trung bình và quãng đường di chuyển. Hình 7 thể hiện các thông số trên theo phần trăm so với giá trị lớn nhất trong ba kịch bản của mỗi thông số.

**Bảng 4.** Kết quả thử nghiệm.

Cấp gió	Thời gian hành trình (s)	Vận tốc (knots)	QĐ (nm)
0	1097.25	11.225	3.4215
4	1139.75	10.865	3.4399
7	1184.5	10.540	3.4679

Ở kịch bản 1, khi tàu di chuyển, không có nhiễu môi trường tác động (cấp 0/12), thời gian di chuyển của tàu là nhỏ nhất và vận tốc trung bình là lớn nhất trong cả ba kịch bản. Đồng thời, quãng đường tàu phải di chuyển ngắn nhất trong ba kịch bản bởi tàu di chuyển bám sát được quỹ đạo đặt.

Trong kịch bản 3, với cấp gió 7/12 theo thang Beaufort của Tổ chức Khí tượng Quốc tế WMO [12], do chịu ảnh hưởng của các lực và mô men gây ra bởi sóng và gió lớn, vận tốc trung bình của tàu là nhỏ nhất trong cả ba trường hợp. Do đó, thời gian hành trình waypoint A đến waypoint D là lớn nhất trong ba trường hợp. Ngoài ra, dưới sự tác động của lực và mô men tạo bởi sóng, gió nên tàu không bám sát được quỹ đạo đặt và điều này dẫn tới quãng đường phải di chuyển thực tế của tàu là lớn nhất trong cả ba kịch bản.

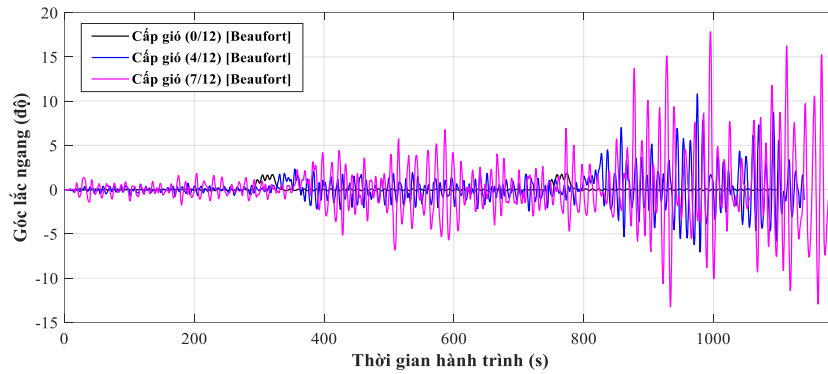
Ở kịch bản còn lại, với cấp gió 4/12, cả ba thông số khảo sát đều là những giá trị nằm giữa các giá trị tương ứng ở kịch bản 1 và kịch bản 3.

Hình 8, 9 và 10 thể hiện ba dao động tiêu biểu của tàu là góc lắc ngang, góc lắc dọc và vận tốc trượt đứng trong số sáu thông số thu thập được (mô hình còn thu thập góc quay trở, vận tốc trượt ngang và vận tốc trượt dọc).

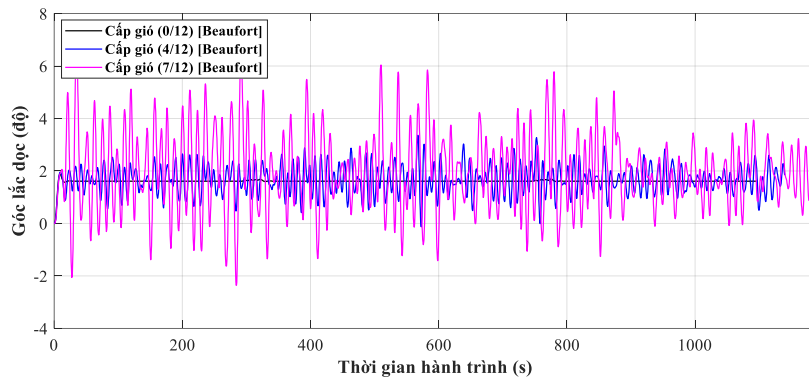
Khi tàu di chuyển với quỹ đạo từ A đến B, gió và sóng tác động vào tàu với góc tương đối là 00. Sóng và gió tác động góc tương đối là

3150 khi di chuyển từ B đến C. Trong khi đó, tàu di chuyển từ C đến D có góc tương đối là 2700.

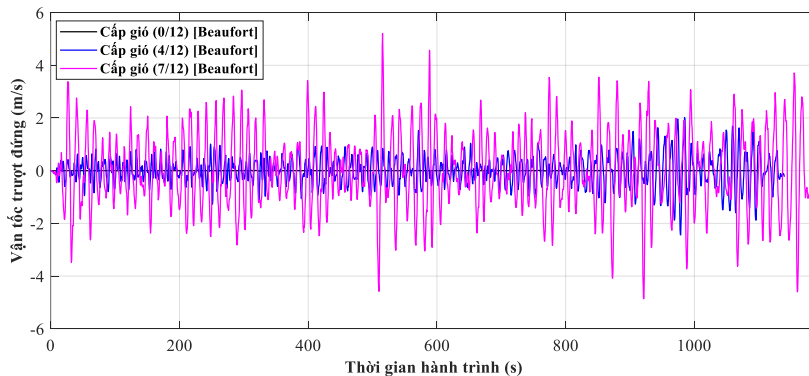
Khi góc tương đối của sóng với mũi tàu là 00, góc lắc ngang của tàu là khá nhỏ trong cả ba trường hợp cấp sóng. Khi góc tương đối là 3150, góc lắc ngang tăng lên. Đặc biệt, nếu góc tương đối là 2700, ứng với trường hợp sóng đánh ngang thân tàu thì góc lắc ngang của tàu rất lớn, đặc biệt là với cấp sóng 7/12. Điều này được thể hiện rõ trên Hình 8.



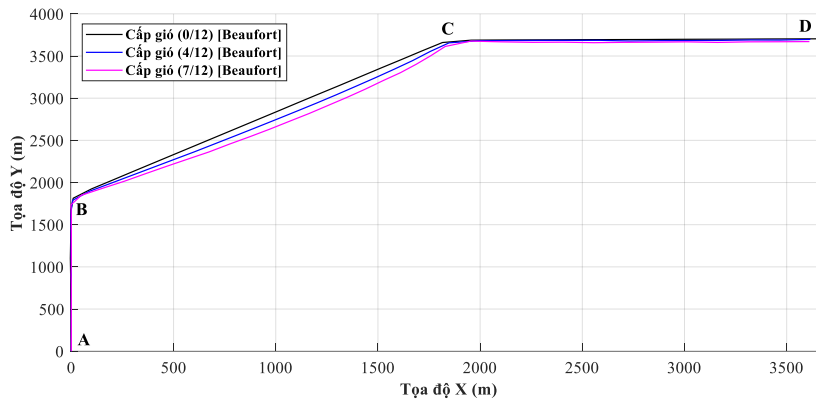
**Hình 8.** Góc lắc ngang (roll angle) với ba cấp sóng khác nhau.



**Hình 9.** Góc lắc dọc (pitch angle) với ba cấp sóng khác nhau.



**Hình 10.** Vận tốc trượt đứng (rate of heave) với ba cấp sóng khác nhau.



**Hình 11.** Quỹ đạo di chuyển của tàu động lực học 3D với ba cấp sóng khác nhau.

Trên Hình 9, thể hiện góc lắc dọc của tàu với ba cấp sóng khác nhau. Nhận thấy rằng, khi cấp sóng tăng, góc lắc dọc tăng. Khi góc tương đối giữa sóng và mũi tàu là 00, tàu lắc dọc mạnh nhất với cùng cấp sóng, góc lắc dọc nhỏ khi sóng đánh ngang vào thân tàu đó là tàu di chuyển từ C đến D (góc tương đối là 2700).

Quan sát Hình 10, tương tự như hai thông số trên, vận tốc trượt tăng khi cấp sóng tăng. Tuy không có nhiều khác biệt về thông số này với những cấp sóng khác nhau, nhưng có thể thấy tàu dao động trượt đứng ít nhất tại góc tương đối giữa sóng và mũi tàu là 00 khi tàu di chuyển từ A đến B.

Hình 11 thể hiện quỹ đạo di chuyển của tàu từ waypoint A đến waypoint D. Tàu bị dao động lớn xung quanh quỹ đạo đặt khi cấp sóng tăng lên. Mô hình này là cơ sở để nghiên cứu, thiết kế và thử nghiệm những bộ điều khiển quỹ đạo, bộ điều khiển ổn định cho tàu.

## 5. Kết luận

Bài báo này trình bày việc xây dựng một mô hình mô phỏng HIL có các đầu ra là những chuyển động của tàu với sáu bậc tự do, quỹ đạo hành trình của tàu, vận tốc trung bình và quãng đường di chuyển.

Kết quả thử nghiệm cho thấy mô hình hoạt động tin cậy, khi so sánh những thông số dao động của tàu với những thông số tương ứng đo được từ các tàu thực trong nghiên cứu [13]. Kết quả cho thấy những sự tương đồng và logic. Mô hình này có thể được ứng dụng để nghiên cứu

các bộ điều khiển quỹ đạo, bộ điều khiển ổn định cho tàu nhằm tiết kiệm thời gian và chi phí.

## Tài liệu tham khảo

- [1] T. A. Johansen, T. I. Fossen, and B. Vik, “Hardware-in-the-loop Testing of DP systems,” in *Dyn. Position. Conf.*, Houston, TX, USA, Nov. 15-16, 2005, pp. 2–16.
- [2] A. C. Dubey and V. Anantha Subramanian, “Hardware-in-the-loop simulation and control design for autonomous free-running ship models,” *Def. Sci. J.*, vol. 70, no. 4, pp. 469–476, 2020, doi: 10.14429/DSJ.70.14926.
- [3] D. Bao et al., “Hardware-in-the-Loop Simulation Applied to AUV Control,” in *Proc. 2018 Chinese Automat. Congr. (CAC)*, Xi'an, China, Nov. 30 - Dec. 02, 2018, pp. 1009–1013. doi: 10.1109/CAC.2018.8623733.
- [4] J. Aarseth, A. H. Lien, Ø. Bunes, Y. Chu, and V. Æsøy, “A hardware-in-the-loop simulator for offshore machinery control system testing,” in *Proc. 28th Eur. Conf. Modell. Simul.*, Brescia, Italy, May 27 – 30, 2014, pp. 57–63. doi: 10.7148/2014-0057.
- [5] H. Q. Nguyen, A. D. Tran, and T. T. Nguyen, “The bilinear model predictive method-based motion control system of an underactuated ship with an uncertain model in the disturbance,” *Process.*, vol. 7, no. 7, 2019, Art. no. 445, doi: 10.3390/pr7070445.
- [6] K. D. Huu, T. D. Anh, and T. H. Duc, “A hardware-in-the-loop simulator to design and test ship motion controllers,” in *Proc. 2023 Int. Russ. Autom. Conf. (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation, Sep. 10-16, 2023, pp. 398–

- 403, doi: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272955.
- [7] T. I. Fossen, *Marine control systems: Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*, Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002.
- [8] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1994.
- [9] Đ. H. Khánh, Đ. A. Tuấn, và H. Đ. Tuấn, “xây dựng, phân tích động lực học của mô hình tàu container 3D 6 bậc tự do dưới tác động của sóng và gió,” *TC KHCN HH*, số 72, tr.15-2111, 2022.
- [10] N. D. Thach and K. D. Huu, “A dynamic model with 6 degrees of freedom for container ships,” *Internauka Mag.*, vol. 39, no. 309, 2023.
- [11] Y. A. Ahmed and K. Hasegawa, “Fuzzy reasoned waypoint controller for automatic ship guidance,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 43, pp. 604–609, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.501.
- [12] *Guide to wave analysis and forecasting*, 2nd ed., W. Meteorol. Org., Geneva, Switzerland, WMO-No. 702, 1998.
- [13] J. H. Ha and T. Gourlay, “Full-scale measurements and method validation of container ship wave-induced motion at the port of fremantle,” *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, vol. 144, no. 6, pp. 1–24, Nov. 2018, doi: 10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000480.