

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG MÁY CHÍNH TÀU DN2000

RESEARCH ON BUILDING A SIMULATION MODEL OF THE DN2000 SHIP'S MAIN ENGINE

LÊ VĂN TÂM*, TÔNG LÂM TÙNG, NGUYỄN DUY QUANG

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

*Email liên hệ: tamlv.ddt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1085>

Tóm tắt

Bài báo trình bày nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống điều khiển máy chính tàu DN2000 phục vụ đào tạo, huấn luyện và từng bước làm chủ trang bị kỹ thuật cho lực lượng chấp pháp trên biển. Trên cơ sở đặc tính điều khiển chuẩn của hệ máy chính CAT 3516C, nhóm tác giả xây dựng mô hình HIL trên nền tảng Siemens TIA Portal, sử dụng PLC S7-1500, HMI và cơ sở dữ liệu SQL Server để tổ chức thu thập, xử lý và giám sát dữ liệu theo thời gian thực. Mô hình bao gồm các thuật toán điều khiển chuẩn bị máy, vào ly hợp, dừng máy, điều chỉnh tốc độ, đồng thời tích hợp các mô hình quá trình chính như nhiệt độ khí xả, áp suất dầu bôi trơn và động học bộ điều tốc. Kết quả so sánh giữa đặc tính chuẩn và đặc tính mô phỏng cho thấy mô hình bám sát quy luật điều khiển của hệ thống, với RMSE lần lượt là 1,325; 1,769; 0,666; và 0,282 đối với bốn đường đặc tính khảo sát; sai số cực đại đều nhỏ hơn 2,50. Các kết quả này khẳng định tính đúng đắn và khả năng ứng dụng của mô hình trong đào tạo, huấn luyện, thử nghiệm thuật toán và phát triển các hệ mô phỏng kỹ thuật chuyên sâu cho tàu DN2000.

Từ khóa: Mô hình mô phỏng, máy chính DN2000, TIA Portal, HIL, huấn luyện kỹ thuật.

Abstract

This paper presents the development of a simulation model for the DN2000 ship's main engine control system to support training, technical familiarization, and progressive mastery of onboard equipment for maritime law enforcement forces. Based on the standard control characteristics of the CAT 3516C main engine, a hardware-in-the-loop (HIL) simulation model was developed on the Siemens TIA Portal platform using an S7-1500 PLC, HMI, and SQL Server for real-time data acquisition, processing, and

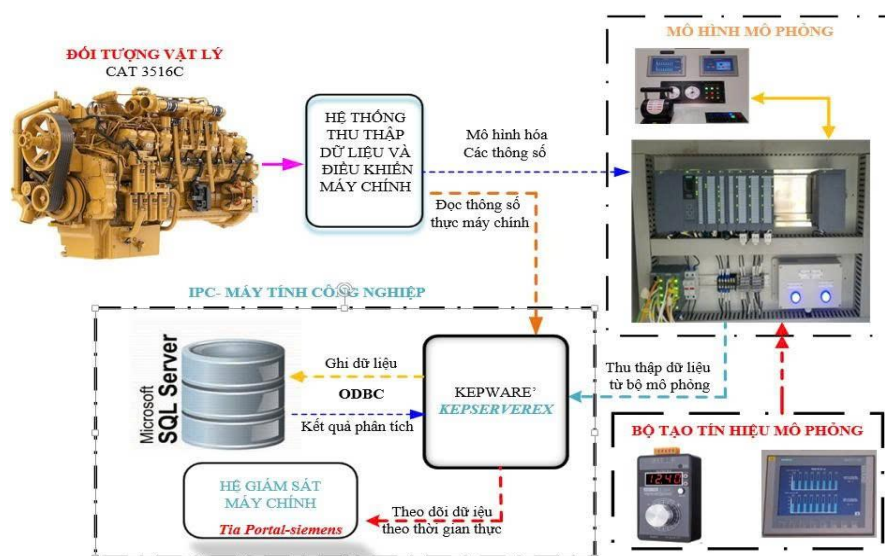
monitoring. The proposed model incorporates key control algorithms for engine preparation, clutch engagement, engine shutdown, and speed regulation, together with major process models such as exhaust gas temperature, lubricating oil pressure, and governor dynamics. Simulation results show that the developed model closely follows the standard control characteristics of the actual system. The root mean square error (RMSE) values for the four evaluated characteristic curves are 1.325, 1.769, 0.666, and 0.282, respectively, while the maximum error remains below 2.50 for all cases. These results confirm the accuracy and applicability of the proposed model for training, control algorithm testing, and further development of advanced simulation systems for DN2000 ships.

Keywords: Simulation model, DN2000 main engine, main engine control system, TIA Portal, HIL, technical training.

1. Mở đầu

Việc đào tạo, huấn luyện sinh viên, học viên trên các thiết bị thực có những ưu điểm là học sinh, sinh viên có thể được tiếp xúc trực tiếp, thao tác và vận hành với toàn bộ các thiết bị tuy nhiên cũng có nhược điểm như: Thời gian chuẩn bị máy móc lâu, gây tốn kém chi phí vận hành và bảo dưỡng, có thể xảy ra các sự cố nguy hiểm gây hỏng hóc cho thiết bị, an toàn của con người, Việc tạo các 'PAN' sẽ khó khăn. Bởi vậy, hiện nay việc ứng dụng công nghệ mô phỏng để đào tạo, huấn luyện ngày càng đang trở nên rất phổ biến trong rất nhiều các lĩnh vực nói chung và mô phỏng máy chính tàu biển nói riêng.

Trên thế giới hiện nay có một số hãng nổi tiếng chuyên sản xuất các hệ mô phỏng cho các đối tượng khác nhau nhằm mục đích đào tạo, huấn luyện [1-3]. Tuy nhiên, các thiết bị trong những hệ thống này đều chỉ là những giao diện màn hình được thiết kế với những đồ họa gần giống thiết bị thực.



Hình 1. Cấu trúc hệ thống mô phỏng DN2000

Các nghiên cứu [4, 5, 6], các tác giả cũng đề xuất xây dựng các mô hình hệ thống mô phỏng nhằm phục vụ cho việc giảng dạy và đào tạo nhằm cải thiện kiến thức và kỹ năng điều khiển tàu.

Trong những năm gần đây, lực lượng Cảnh sát biển Việt Nam đã được trang bị các tàu DN2000 đóng mới với hệ thống điều khiển động cơ chính hiện đại. Nhằm tiến tới làm chủ trang bị kỹ thuật và nâng cao tính cơ động, sẵn sàng chiến đấu, nhóm nghiên cứu đã xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống điều khiển động cơ chính cho series tàu này.

Đóng góp mới của nghiên cứu:

- Xây dựng mô hình mô phỏng động học điều khiển máy chính DN2000.
- Thiết lập môi trường mô phỏng, phục vụ phân tích các chế độ vận hành của hệ thống.
- Đề xuất công cụ hỗ trợ huấn luyện khai thác và nghiên cứu dựa trên mô hình HIL/ SCADA.

Bố cục bài báo được chia thành 5 phần chính như sau: Phần 2 trình bày cơ sở lý thuyết, cấu trúc đề xuất của hệ thống điều khiển máy chính tàu DN2000. Phần 3 đề xuất thuật toán điều khiển và mô hình động học. Phần 4 phân tích kết quả mô phỏng và thảo luận. Cuối cùng, Phần 5 đưa ra kết luận và định hướng nghiên cứu tiếp theo.

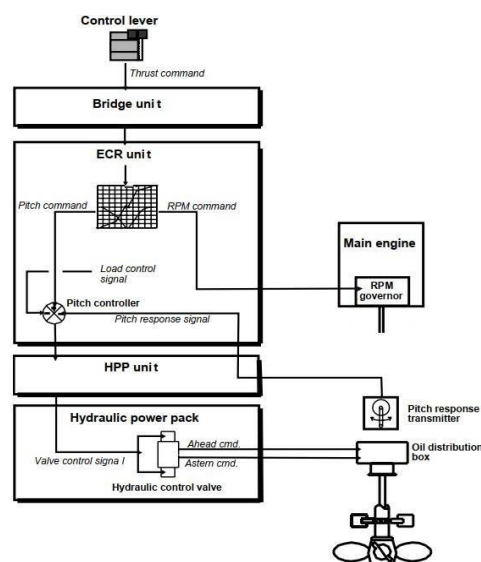
2. Xây dựng cấu trúc hệ thống và cơ sở lý thuyết

2.1. Xây dựng cấu trúc hệ thống

Tàu DN2000 là series tàu đóng mới của tập đoàn DAMEN dành riêng cho lực chấp pháp trên biển Việt

Nam. Tàu có nhiệm vụ tìm kiếm và cứu nạn trong vùng biển Việt Nam và quốc tế.

Theo [9] công bố, tàu DN2000 được trang bị 4 máy chính lại 02 chân vịt thông qua hệ bánh răng hộp số và ly hợp. Với cấu trúc 02 máy chính lại 01 chân vịt thông qua hệ thống hộp số chung, hệ thống điều khiển được thiết kế sao cho 02 máy chính có thể làm việc song song và đồng thời lại chung chân vịt. Và mỗi một máy lại có cấu trúc điều khiển độc lập giống nhau như Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc làm việc độc lập

Máy chính tàu DN2000 được lắp đặt là loại 3516C hãng Caterpillar, làm việc 4 thì kiểu khí nén tăng áp,

Bảng 1. Bảng dữ liệu số chạy máy chính

ZONE 1-2

ENGINE SPEED (RPM)	ENGINE POWER (BKW)	ENGINE TORQUE (NM)	BMEP (KPA)	BSFC (G/BKW-HR)	VFC (L/HR)	INLET MFLD PRES (KPA)	INLET MFLD TEMP (DEG C)	EXH MFLD TEMP (DEG C)	EXH MFLD PRES (KPA)	EXH STACK TEMP (DEG C)
1,8	2,24	11,884	1,913	210.3	561.4	240.5	50.0	625.4	184.9	481.4
1,7	2,24	12,583	2,025	207.0	552.6	235.0	49.7	635.0	163.7	498.6
1,6	2,108	12,581	2,025	204.3	513.4	213.6	48.8	643.6	151.6	499.4
1,5	1,947	12,395	1,995	199.9	463.9	188.2	48.0	643.2	128.6	507.4
1,4	1,786	12,179	1,96	197.4	420.2	171.9	47.8	638.0	110.1	505.9
1,3	1,539	11,305	1,819	197.7	362.6	141.4	47.1	645.4	91.6	493.5
1,2	836	6,653	1,071	206.7	206.0	54.5	46.4	584.4	37.7	480.9
1,1	607	5,269	848	212.0	153.4	21.9	47.0	543.3	21.9	465.5
900	472	5,013	807	213.2	120.1	16.6	48.4	552.8	12.9	451.4
800	375	4,476	720	214.7	96.0	11.2	49.0	511.9	8.7	406.1
700	330	4,509	726	225.0	88.6	7.8	50.3	520.4	6.0	415.3

máy chính được trang bị bộ điều tốc điện tử, kiểu phun xăng điện tử.

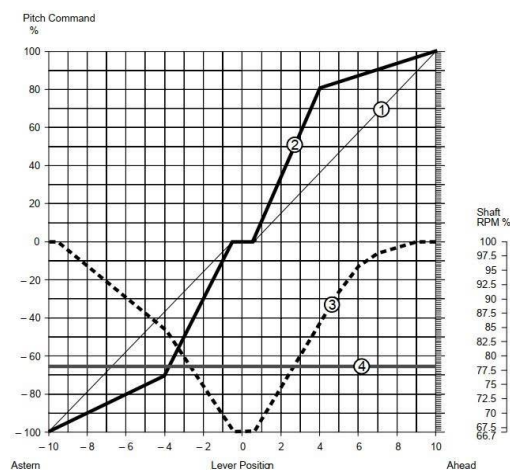
Nhóm tác giả đề xuất cấu trúc hệ thống như Hình 1, mô tả luồng dữ liệu vòng kín giữa khối mô phỏng vật lý và lớp xử lý thông minh thông qua SQL Server. Trong đó, mô hình máy chính CAT 3516C đóng vai trò nguồn dữ liệu OT, thực hiện mô phỏng nhiệt động lực học thời gian thực, giao tiếp với PLC qua Ethernet S7 chu kỳ 100ms và lưu dữ liệu vào SQL Server qua ODBC với chu kỳ 1s. Lớp xử lý thông minh trên máy tính công nghiệp thực hiện đồng bộ, tính toán và cập nhật trạng thái vận hành, từ đó cung cấp thông tin giám sát thời gian thực cho người vận hành. Để phục vụ thử nghiệm HIL, hệ thống sử dụng PLC Siemens S7-1500 CPU 1513-1PN và HMI Siemens KTP900 để tạo các tín hiệu ảo như 4-20 (mA) và 0-10 (V) thay cho cảm biến thực.

2.2. Cơ sở dữ liệu

Dựa trên cấu trúc điều khiển trong tài liệu [9], Nhóm tác giả tổng hợp các dữ liệu đặc trưng làm cơ sở xây dựng thuật toán và phát triển mô hình hệ thống.

Hình 3 thể hiện mối quan hệ giữa tín hiệu tay điều khiển với tốc độ máy chính và góc mở cánh chân vịt biến bước tương ứng với các chiều điều khiển, vị trí tay điều khiển và chế độ vận hành khác nhau. Trong đó, đường cong 1 biểu diễn góc mở cánh chân vịt ở

chế độ tốc độ động cơ không đổi khi chạy tự do; đường cong 2 biểu diễn góc mở cánh chân vịt ở chế độ kết hợp; đường cong 3 biểu diễn tốc độ động cơ ở chế độ kết hợp; và đường cong 4 biểu diễn tốc độ động cơ ở chế độ tốc độ không đổi. Chẳng hạn, tại vị trí tay điều khiển số 5 trong chế độ kết hợp, hệ thống xác lập góc mở cánh chân vịt khoảng 85% và tốc độ quay động cơ chính khoảng 90%.



Hình 3. Mối liên quan các đường cong điều khiển

Để có thể xây dựng các hàm thông số chạy theo tham số, vị trí tay điều khiển, trong tài liệu [10], các tác giả nhận được dữ liệu thông số từ nhà sản xuất trong quá trình chạy máy cho một động cơ chính như Bảng 1.

học cơ bản [9-12] và cơ học chất lỏng [13].

3.2.1. Mô hình hóa nhiệt độ khí xả

Động lực học nhiệt độ khí xả được mô phỏng trong ba giai đoạn: Ước tính trạng thái ổn định, lỗi và quán tính nhiệt. Đầu tiên, nhiệt độ nhiệt động cơ bản (T_{Base}) được tính toán.

Trong khi các mô hình điều khiển cơ bản thường đơn giản hóa mối quan hệ Nhiệt độ khí xả - Tải được tuyến tính hóa, tài liệu [12] đã được thiết lập về mô hình động cơ hướng điều khiển chỉ ra rằng phản ứng nhiệt vốn dĩ không tuyến tính do hiệu suất thay đổi của bộ tăng áp và tỷ lệ không khí - nhiên liệu thay đổi. Để nắm bắt độ cong này trong giới hạn thời gian thực của PLC (mà không sử dụng các hàm Wiebe nặng về tính toán), chúng tôi áp dụng hiệu chỉnh đa thức bậc hai:

$$T_{Base} = T_{Coolant} + (K_{RPM} \cdot n) + (K_{Load1} \cdot L \cdot n) + (K_{Load2} \cdot L^2 \cdot n) \quad (1)$$

Trong đó, $T_{Coolant}$ là nhiệt độ nước làm mát (°C), n là tốc độ động cơ (vòng/phút), và L là hệ số tải ($0 \div 1$), K_{RPM} , K_{Load1} và K_{Load2} là các hệ số thực nghiệm biểu thị ma sát phụ thuộc vào tốc độ, sự giải phóng nhiệt khi đốt cháy tuyến tính và các hiệu chỉnh hiệu suất phi tuyến tính tương ứng.

Để mô phỏng các lỗi cụ thể của xi lanh, một độ lệch bù được áp dụng cho xi lanh i cụ thể dựa trên cường độ lỗi đầu vào F_{-} (Nhiệt độ khí xả, i) ($0 \div 1$):

$$T_{Target,i} = T_{Base} \cdot (1 + K_{Fault} \cdot F_{EGT,i}) \quad (2)$$

Trong đó, K_{Fault} là hệ số độ nhạy.

Để mô phỏng thời gian phản hồi của cặp nhiệt điện công nghiệp [14], một bộ lọc trễ bậc nhất rời rạc được áp dụng:

$$T_{EGT,i}(k) = T_{EGT,i}(k-1) + [T_{Target,i} - T_{EGT,i}(k-1)] \cdot \frac{\Delta t}{\tau} \quad (3)$$

3.4.2. Mô hình động học áp lực dầu bôi trơn

Hệ thống bôi trơn được mô hình hóa như một hệ thống nhiệt-thủy lực kết hợp phù hợp với các nguyên tắc máy phụ tàu biển [15, 16]. Đầu tiên, tương tự như hệ thống làm mát, động lực học nhiệt độ dầu bôi trơn (T_{LO}) được mô phỏng dựa trên sự cân bằng nhiệt giữa sự phát sinh ma sát và hiệu quả làm mát dầu. Nhiệt độ tức thời được cập nhật thông qua bộ lọc trễ:

$$T_{LO}(k) = T_{LO}(k-1) + [T_{Target,LO} - T_{LO}(k-1)] \cdot \frac{\Delta t}{\tau_{LO}} \quad (4)$$

Trong đó, $T_{Target,LO}$ là nhiệt độ mục tiêu ở trạng thái ổn định (°C), Δt là thời gian chu kỳ quét (s), và τ_{LO} là hằng số thời gian nhiệt của bể chứa dầu (s).

Điều quan trọng là độ nhớt của dầu (μ) được cập nhật động dựa trên nhiệt độ thời gian thực này bằng cách sử dụng Phương trình Andrade [17, 18]:

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T_{LO} + 273.15}} \quad (5)$$

Trong đó, A và B là các hằng số thực nghiệm đặc trưng cho loại dầu SAE-40.

Logic tạo áp suất kết hợp với bơm sơ bộ lại bởi động cơ điện và bơm cơ khí dẫn động bằng máy chính. Áp suất cơ khí (P_{Mech}) được tính như sau:

$$P_{Mech} = (K_{Pump} \cdot n) \cdot (1 + K_{Visc} \cdot (\mu - \mu_{Ref})) \quad (6)$$

Trong đó, n là tốc độ động cơ (vòng/phút), K_{Pump} là hệ số hiệu suất bơm (bar/vòng/phút), K_{Visc} là hệ số hiệu chỉnh độ nhớt và μ_{Ref} là độ nhớt tham chiếu ở nhiệt độ hoạt động bình thường.

Để xác thực các thuật toán chẩn đoán, áp suất nguồn cuối cùng được xác định bằng logic "Van kiểm tra" (tối đa) và sau đó bị suy giảm do lỗi tắc nghẽn bộ lọc (F_{Clog}) và sự mài mòn ổ trục (F_{Wear}):

$$P_{Source} = \max(P_{Elec}, P_{Mech}) \quad (7)$$

$$P_{LO} = \min(P_{Set}, P_{Source} \cdot (1 - K_F \cdot F_{Clog}) \cdot (1 - K_W \cdot F_{Wear})) \quad (8)$$

Trong đó, P_{Elec} là áp suất bơm môi (bar), P_{Set} là giới hạn van an toàn (bar), và K_F , K_W là các hệ số tỷ lệ mức độ nghiêm trọng lỗi không thứ nguyên

3.4.3. Mô hình động học bộ điều tốc

Việc điều khiển tốc độ động cơ được thực hiện bởi một máy trạng thái hữu hạn (FSM). Để mô phỏng mômen quán tính cơ học, quá trình chuyển đổi tốc độ tuân theo một hàm "Ramp" với bộ giới hạn bão hòa (sat):

$$n_{Ramp}(k) = n(k-1) + \text{sat}\left(\frac{n_{Target} - n(k-1)}{\Delta t}, K_{Ramp}\right) \cdot \Delta t \quad (9)$$

Trong đó, K_{Ramp} : Tốc độ gia tốc (rpm/s^2).

Hơn nữa, nhận thấy tầm quan trọng của phân tích ổn định trong hệ thống điều khiển [17], một tín hiệu nhiễu xác định được đưa vào để xác thực thuật toán phát hiện. Mặc dù sự bất ổn của bộ điều tốc thực tế thường biểu hiện dưới dạng chu kỳ giới hạn phi tuyến tính. Tốc độ được đưa vào được định nghĩa là:

$$n_{Final} = n_{Ramp}(k) + (K_{Noise} \cdot F_{Gov}) \cdot \sin(\omega t) \quad (10)$$

Trong đó, F_{Gov} - độ nhạy, K_{Noise} - độ nhiễu loạn và ω tần số nhiễu (rad/s).

4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

4.1. Kết quả mô phỏng

Nhóm tác giả đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng HIL máy chính DN2000 dựa trên nền thiết bị hãng Siemens như Hình 8.



Hình 8. Mô hình mô phỏng máy chính

Ngoài ra nhóm nghiên cứu cũng xây dựng các giao diện giám sát cho hệ thống như các Hình 9, và 10.



Hình 9. Máy chính PS



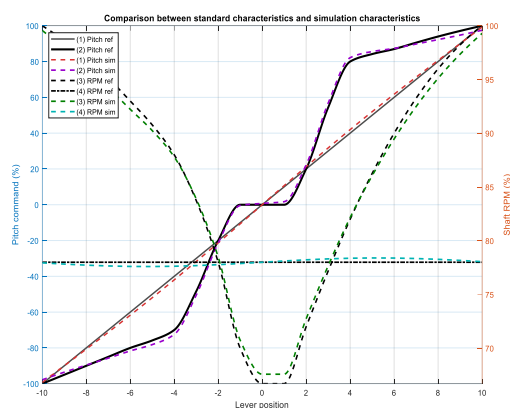
Hình 10. Giao diện tạo "PAN" hệ thống khí xả

Và các đồ thị Hình 11, 12 và 13 so sánh kết quả thu được sau khi mô phỏng so với dữ liệu chuẩn của hãng.

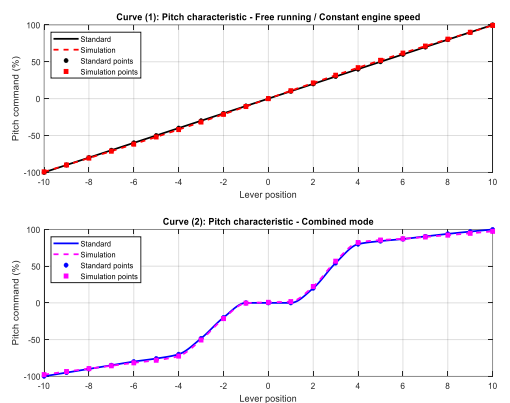
Bảng 2 cho biết độ chính xác của mô hình mô phỏng.

Đồ thị Hình 11 cho thấy mô hình mô phỏng bám sát đặc tính chuẩn của hệ điều khiển trong cả quan hệ giữa vị trí tay điều khiển với góc mở cánh bước và tốc độ trục. Sai lệch chủ yếu xuất hiện tại các vùng chuyển tiếp phi tuyến, đặc biệt quanh khu vực lân cận vị trí trung tâm, nhưng xu hướng biến thiên tổng thể vẫn được tái hiện đúng. Kết quả này cho thấy mô hình có độ tin cậy tốt và phù hợp để phục vụ nghiên cứu, đào tạo và huấn luyện vận hành hệ thống.

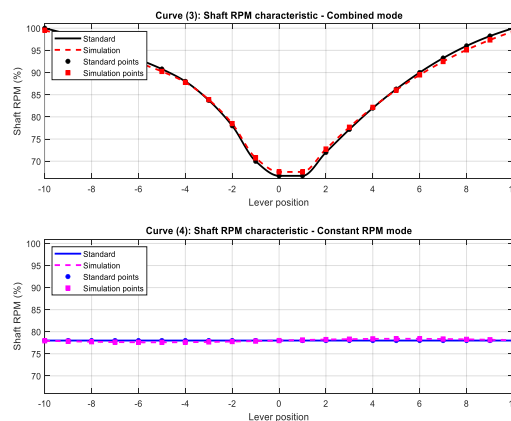
Hình 12 thể hiện kết quả so sánh cho thấy mô hình mô phỏng tái hiện tốt đặc tính pitch chuẩn trong cả hai chế độ vận hành. Với đường cong (1), đặc tính tuyến



Hình 11. So sánh đặc tính chuẩn và đặc tính mô phỏng của hệ điều khiển máy chính



Hình 12. So sánh đặc tính góc mở cánh bước giữa dữ liệu chuẩn và mô hình mô phỏng



Hình 13. So sánh đặc tính tốc độ chân vịt giữa dữ liệu chuẩn và mô hình mô phỏng

tính được bảo toàn khi pitch thay đổi gần tuyến tính từ -100% - 100% tương ứng với dải vị trí tay điều khiển thay đổi từ -10 đến 10.

Hình 13 mô tả kết quả cho thấy đặc tính RPM mô phỏng bám sát đặc tính chuẩn trong cả chế độ kết hợp

và chế độ giữ tốc độ không đổi. Ở đường cong (3), tốc độ trục giảm từ khoảng 100% tại vị trí tay điều khiển -10 xuống giá trị nhỏ nhất khoảng 67-68% trong vùng lân cận 0 đến 1, sau đó tăng dần trở lại và đạt gần 100% tại vị trí 10; đường mô phỏng gần như trùng khớp với đường chuẩn trên toàn dải khảo sát.

Bảng 2. Kết quả đánh giá sai số giữa dữ liệu chuẩn và mô hình mô phỏng của các đường đặc tính điều khiển

Characteristic	RMSE	MAE	MaxError
Curve 1	1.325	1.146	1.970
Curve 2	1.769	1.602	2.493
Curve 3	0.666	0.615	0.890
Curve 4	0.282	0.253	0.398

Bảng 2 cho thấy mô hình mô phỏng bám sát đặc tính chuẩn với các chỉ tiêu sai số đều nhỏ. Sai số thấp nhất thuộc về đường cong RPM ở chế độ không đổi, trong khi các đường đặc tính còn lại cũng có RMSE nhỏ hơn 1,77 và sai số cực đại nhỏ hơn 2,50. Kết quả này khẳng định độ tin cậy của mô hình trong việc tái hiện đặc tính điều khiển của hệ thống.

5. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu tài liệu, cơ sở dữ liệu cơ bản cho động cơ chính 3516C hãng Caterpillar với các hàm thông số bám theo vị trí tay điều khiển, đồng thời xây dựng một số thuật toán điều khiển để từ đó lựa chọn hệ sinh thái Siemens xây dựng thành công mô hình điều khiển cho động cơ.

Tuy nhiên nhóm nghiên cứu chỉ có được kết quả ở môi trường tĩnh, thiếu một số dữ liệu tác động với những điều kiện môi trường làm việc khác nhau. Kết quả cần được kiểm nghiệm, đối sánh với những điều kiện khác nhau để tối ưu hóa mô hình điều khiển cho hệ thống.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.60**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Kongsberg Maritime, *Bridge Systems & Control Centres*, <https://www.kongsberg.com/maritime/products/bridge-systems-and-control-centres>.

[2] Wärtsilä's, Wärtsilä R&D Simulator, <https://www.wartsila.com/marine/products/simulation-and-training/navigational-simulators>.

[3] NAUTIS, *NAUTIS Maritime Simulator*, <https://www.vstepsimulation.com/nautis-simulator/nautis-maritime-simulator/>.

[4] Đoàn Hữu Khánh, Phạm Minh Thảo, Nguyễn Văn Hùng, Đào Xuân Tùng, Nguyễn Cao Sơn (2017), *Xây dựng hệ thống mô phỏng 3D động học tàu thủy*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 5, tr.96-101.

[5] Đinh Anh Tuấn (2017), *Mô hình hóa và mô phỏng 3D động học tàu thủy*, Tạp chí Giao thông vận tải, tháng 5.

[6] Đ. H. Khánh, Đ. A. Tuấn và H. Đ. Tuấn (2022), *Xây dựng, phân tích động lực học của mô hình tàu container 3D 6 bậc tự do dưới tác động của sóng và gió*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 72, tr.15-21.

[7] Rolls Royce (2012), *Main propeller remote control system*, 49772-E.

[8] Caterpillar (2010), *Performance data*, DM8434.

[9] Pulkrabek, W.W. (2004). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine (2nd ed.)*. Pearson Prentice Hall.

[10] Heywood, J.B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals (2nd ed.)*. McGraw-Hill Education.

[11] Ferguson, C.R., Kirkpatrick, A.T. (2015). *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.

[12] Guzzella, L., Onder, C.H. (2010). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engines (2nd ed.)*. Springer-Verlag.

[13] White, F.M. (2015). *Fluid Mechanics (8th ed.)*. McGraw-Hill Education.

[14] Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering (5th ed.)*. Prentice Hall.

[15] McGeorge, H.D. (1998). *Marine Auxiliary Machinery (7th ed.)*. Butterworth-Heinemann.

[16] Woodyard, D. (2009). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines (9th ed.)*. Butterworth-Heinemann.

[17] Mahmood, M.S., Shareef, I.R. (2024). *Applications of artificial intelligence for smart conveyor belt monitoring systems: A comprehensive review*. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol.57(4), pp.1195-1206. Doi: 10.18280/jesa.570426.

Ngày nhận bài: 24/03/2026
 Ngày nhận bản sửa: 04/04/2026
 Ngày duyệt đăng: 08/04/2026