

# Điều khiển tàu định vị động dùng mô hình nội

Nguyễn Văn Vị Quốc<sup>1,\*</sup>, Dương Hoài Nghĩa<sup>2</sup>



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

## TÓM TẮT

Hệ thống định vị động học cho tàu thủy (Dynamic Positioning System - DP) là hệ thống tự động giữ vị trí và hướng tàu bằng hệ thống lực đẩy của tàu mà không cần sử dụng neo. Nhiệm vụ của hệ thống định vị động học là điều khiển tàu đứng yên tại vị trí cố định hoặc di chuyển theo lộ trình cho trước với tốc độ bé để thực hiện một nhiệm vụ nào đó. Bài báo giới thiệu một hệ thống điều khiển mới cho tàu định vị động học có tính ổn định bền vững có khả năng kháng nhiễu tốt. Để thực hiện điều khiển, bài báo trình bày sơ đồ hệ thống điều khiển tàu định vị động, mô hình toán học của tàu thủy và các nhiễu động do sóng biển và thời tiết tác động lên hệ thống tàu. Hệ thống điều khiển đề xuất gồm 2 vòng điều khiển. Vòng trong điều khiển tốc độ tàu dùng phương pháp mô hình nội (IMC). Vòng ngoài điều khiển tọa độ tàu dùng phương pháp điều khiển tỷ lệ (P). Bài báo xác định các điều kiện ổn định bền vững của hệ thống điều khiển đối với sai số mô hình. Một trong ưu điểm của bộ điều khiển đề xuất là có thể chỉnh định tính bền vững của hệ kín bằng một tham số. Hệ thống điều khiển đề nghị cũng được so sánh với hệ thống điều khiển PID. Hệ điều khiển PID có nhiều ưu điểm, tuy nhiên để chỉnh định các tham số cần tốn nhiều thời gian và năng lượng. Các kết quả mô phỏng cho thấy tính hiệu quả của hệ thống điều khiển đề nghị: có chất lượng tốt, bền vững đối với sai số mô hình và nhất là không làm quá tải hệ thống. Bài báo chưa xét đến bài toán dẫn đường (guidance) và điều khiển hệ truyền động (thrusters actuators).

**Từ khóa:** Tàu định vị động, Tách kênh, Điều khiển mô hình nội, Ổn định bền vững

## PHẦN MỞ ĐẦU

Hệ thống định vị động học cho tàu thủy (Dynamic Positioning System - DP) là hệ thống tự động giữ vị trí và hướng tàu bằng hệ thống lực đẩy của tàu. Định nghĩa này để phân biệt với các tàu định vị bằng neo (Position Moring PM). Nhiệm vụ của hệ thống DP là điều khiển tàu đứng yên tại vị trí cố định hoặc di chuyển theo lộ trình cho trước với tốc độ bé để thực hiện một nhiệm vụ nào đó.

Những thông số thủy động lực học của tàu biển rất khó xác định và thay đổi theo thời gian. Tàu được điều khiển theo ba bậc tự do bằng hệ chân vịt truyền động (ở tốc độ thấp hệ thống bánh lái hoạt động không hiệu quả), vì vậy mô hình cho tàu DP là mô hình đa biến (các tín hiệu vào là momen quay của các chân vịt truyền động, các tín hiệu ra là tọa độ của tàu).

Sơ đồ hệ thống điều khiển tàu DP được mô tả như **Hình 1** <sup>1</sup> gồm khối xử lý tín hiệu (signal processing); khối quan sát ước lượng (observer); khối dẫn đường (guidance); khối điều khiển (controller); và khối phân phối tín hiệu điều khiển (thrust allocation). Bài báo này chỉ khảo sát khối điều khiển, không khảo sát các khối còn lại.

Sự thành công của điều khiển PID cho lái tự động và tiếp theo sự xuất hiện của hệ thống định vị toàn cầu đã xuất hiện những thuật toán điều khiển hành trình và tọa độ (positioning system). Những tàu DP đầu tiên trên thế giới từ những năm 1960 sử dụng bộ điều khiển PID. Nhiều công trình nghiên cứu dựa trên thành quả của lý thuyết điều khiển phi tuyến đã được nhiều tác giả nghiên cứu áp dụng cho điều khiển DP như điều khiển trượt, điều khiển cuốn chiếu<sup>2,3</sup>, điều khiển dựa vào bộ quan sát thụ động (Fossen)<sup>1,2</sup>, Tannuri.D.E et al. để xuất mô hình điều khiển thích nghi<sup>4</sup>. Fossen.T.I và Strand (1998) đã đưa vào áp dụng bộ quan sát cuốn chiếu<sup>3</sup>. Tất cả những bộ điều khiển vừa nêu đều dựa vào lý thuyết ổn định Lyapunov. Một trong những hạn chế của phương pháp này là tìm ra hàm Lyapunov phù hợp. Những năm gần đây do sự phát triển của công nghệ máy tính đã xuất hiện những thuật toán điều khiển liên quan công nghệ tính toán mềm như logic mờ<sup>5</sup>, mạng nơ-ron<sup>6</sup>. Tuy nhiên,

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

<sup>2</sup>Trường Đại học Quốc tế Miền Đông

### Liên hệ

**Nguyễn Văn Vị Quốc**, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

Email: quocnv.hq@vietsov.com.vn

### Lịch sử

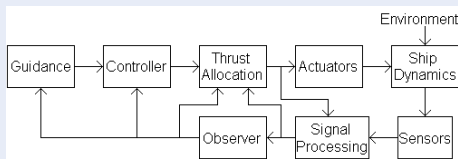
- Ngày nhận: 21-12-2018
- Ngày chấp nhận: 31-5-2019
- Ngày đăng: 30-9-2019

### DOI:



### Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



**Hình 1: Sơ đồ hệ thống điều khiển tàu DP<sup>1</sup>**

**Trích dẫn bài báo này:** Văn Vị Quốc N, Nghĩa D H. **Điều khiển tàu định vị động dùng mô hình nội.** *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.*; 3(2):xxx-xxx.

những công cụ tính toán này rất khó chứng minh chặt chẽ tính ổn định.

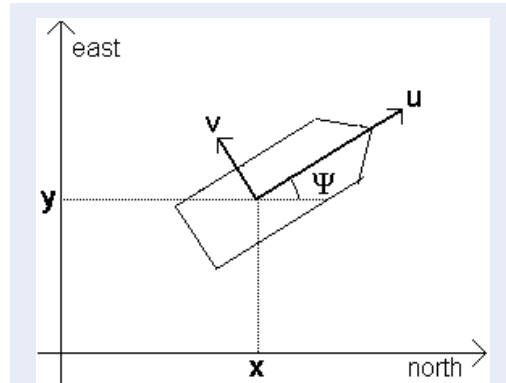
Bài báo này giới thiệu một hệ thống điều khiển mới cho tàu DP với 2 vòng điều khiển có tính ổn định bền vững và có khả năng kháng nhiễu tốt. Vòng trong điều khiển tốc độ tàu dùng phương pháp mô hình nội. Vòng ngoài điều khiển tọa độ tàu dùng phương pháp điều khiển tỷ lệ. Cấu trúc của bài báo như sau: Phần trình bày mô hình toán học của tàu DP, phần phương pháp điều khiển đề xuất, kết quả mô phỏng, so sánh luật đề xuất với điều khiển PID phi tuyến, thảo luận và cuối cùng là phần kết luận.

### MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA TÀU DP

Mô hình toán học của tàu DP như sau<sup>1</sup>

$$\begin{cases} \dot{\eta}_0 = J(\psi)v \\ M\dot{v} = -Dv + \tau + J(\psi)b + E_v w_v \\ \dot{b} = -T_b^{-1}b + E_b w_b \\ \dot{\xi} = -A_\omega \xi + E_\omega w_\omega \\ \eta = \eta_0 + \eta_\omega \end{cases} \quad (1)$$

với  $\eta = [x, y, \psi]^T$ : véc tơ vị trí trong hệ tọa độ cố định,  $v = [u, v, r]^T$ : véc tơ vận tốc (3x1) trong hệ tọa độ gắn với tàu (Hình 2),



Hình 2: Các hệ tọa độ sử dụng để mô tả chuyển động của tàu thủy.

$J(\psi)$ : ma trận (3x3) chuyển hệ tọa độ

$$J(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\tau$  là véc tơ (3x1) lực và moment điều khiển

$$\tau = [X, Y, N]^T \quad (3)$$

$M$  là ma trận (3x3) khối lượng quán tính,

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mX_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mX_G - Y_{\dot{r}} & I_Z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$m$ : khối lượng tàu thủy,  $X_G$ : tọa độ trọng tâm,  $I_Z$ : moment quán tính đối với trục thẳng đứng,

$$X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}, Y_{\dot{v}} = \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}}, Y_{\dot{r}} = \frac{\partial Y}{\partial \dot{r}}, N_{\dot{r}} = \frac{\partial N}{\partial \dot{r}}$$

là các hệ số khối lượng nước kèm (lượng nước quanh tàu và di chuyển cùng với tàu),  $D$  là ma trận (3x3) hệ số suy giảm

$$D(v) = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & Y_r \\ 0 & -Y_r & -N_r \end{bmatrix} + D_n(v) \quad (5)$$

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u}, Y_v = \frac{\partial Y}{\partial v}, Y_r = \frac{\partial Y}{\partial r}, N_r = \frac{\partial N}{\partial r}$$

(Trong chế độ điều khiển DP, vận tốc tàu thấp, thường bé hơn 2m/s, thành phần phi tuyến  $D_n = (v)$  có giá trị bé và có thể bỏ qua<sup>1</sup>),  $b$  là véc tơ (3x1) nhiễu động gộp chung của các thành phần nhiễu động tần số thấp như dòng chảy, gió và sóng,  $T_b$  là ma trận đường chéo (3x3) hằng số thời gian của nhiễu động gộp chung  $b$ ,  $E_b$  và  $E_v$  là các ma trận đường chéo (3x3) đặc trưng cho cường độ nhiễu,  $w_b, w_v, w_\omega$  là các véc tơ (3x1) nhiễu trắng Gaussian,  $\xi$ : véc tơ trạng thái (6x1) biểu diễn nhiễu động tần số cao (sóng biển), các ma trận trong mô hình trạng thái của sóng biển được xác định bởi

$$\omega = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -\Omega^2 & 2\Lambda\Omega \end{bmatrix}, E_\omega = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ \tilde{E}_\omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_\omega = [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3}]$$

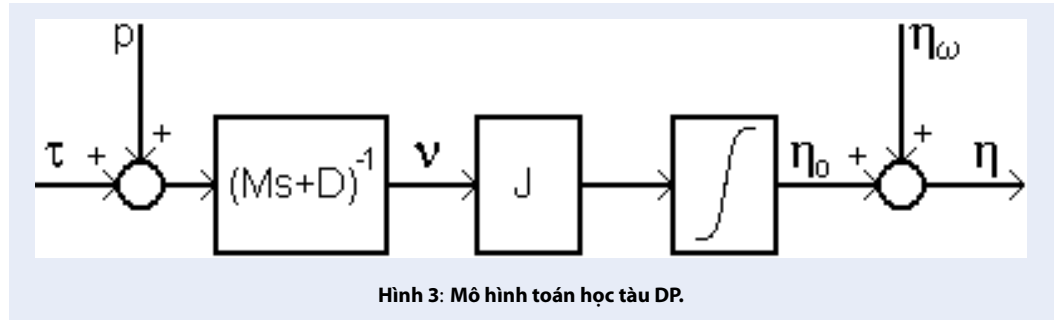
$I_{3 \times 3}$ : ma trận đơn vị (3x3),  $0_{3 \times 3}$ : ma trận không (3x3),  $\Lambda = \text{diag}\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3\}$ ,  $\Omega = \text{diag}\{\omega_{o1}, \omega_{o2}, \omega_{o3}\}$ ,  $\tilde{E}_\omega = \text{diag}\{\epsilon_{\omega 1}, \epsilon_{\omega 2}, \epsilon_{\omega 3}\}$ ,  $\zeta_i$ : hệ số cản,  $\omega_{oi}$  tần số dao động sóng biển,  $\epsilon_{\omega i}$  biên độ dao động sóng biển,  $\eta_\omega = C_\omega \xi$  mô tả tác động của sóng biển lên tàu. Sử dụng biểu diễn dạng hàm truyền đạt ta có<sup>1</sup>

$$\eta_\omega = \text{diag} \left\{ \frac{\epsilon_{\omega i} s}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{oi} s + \omega_{oi}^2} \right\} w_\omega \quad (7)$$

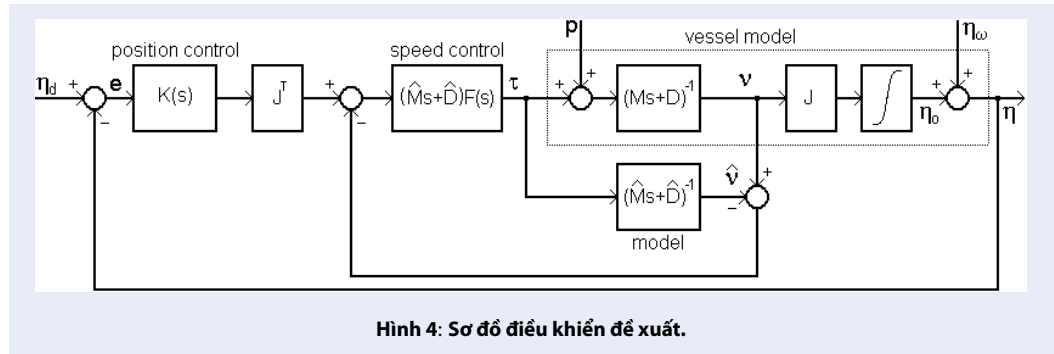
$i = 1, 2, 3$ . Hình 3 trình bày mô hình toán học tàu DP với  $p = J(\psi)b + E_v W_v$ .

### PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT

Hệ thống điều khiển đề nghị (Hình 4) có 2 vòng điều khiển: vòng trong điều khiển tốc độ, vòng ngoài điều khiển vị trí.



Hình 3: Mô hình toán học tàu DP.



Hình 4: Sơ đồ điều khiển để xuất.

### Vòng điều khiển trong

Vòng điều khiển trong (Hình 5) sử dụng kỹ thuật mô hình nội<sup>7</sup> với  $(\hat{M}s + \hat{D})^{-1}$  là mô hình thuận,  $((\hat{M}s + \hat{D}))$  là mô hình ngược,  $F(s)$  là bộ lọc IMC

$$F(s) = \text{diag} \{f_u(s), f_v(s), f_r(s)\} \quad (8)$$

với  $f_u(s) = \frac{1}{\tau_u s + 1}$ ,  $f_v(s) = \frac{1}{\tau_v s + 1}$ ,  $f_r(s) = \frac{1}{\tau_r s + 1}$  Bộ điều khiển IMC được xác định bởi

$$Q(s) = (\hat{M}s + \hat{D})F(s) \quad (9)$$

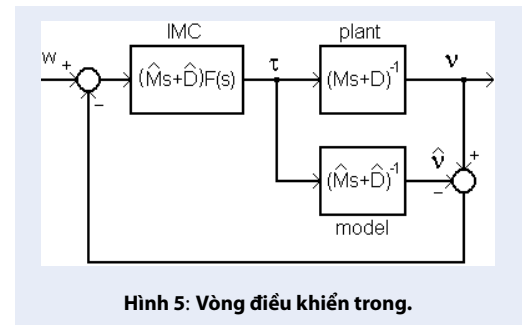
Trong bài báo dấu ^ chỉ thông số tương ứng của mô hình. Nếu mô hình hoàn toàn chính xác

$$\hat{M} = M \quad \text{và} \quad \hat{D} = D \quad (10)$$

và trong trường hợp không có nhiễu thì tín hiệu hồi tiếp trong sơ đồ Hình 4 bị triệt tiêu và hàm truyền đạt từ  $w$  đến  $v$  được xác định bởi

$$(Ms + D)^{-1}(\hat{M}s + \hat{D})F(s) = F(s) \quad (11)$$

Vậy  $F(s)$  là hàm truyền đạt danh định của vòng điều khiển trong.  $F(s)$  được chọn có dạng ma trận đường chéo như (8) nhằm đảm bảo khả năng điều khiển độc lập nhau của các tín hiệu ra (decoupling). Bậc của  $F(s)$  đảm bảo tính hợp thức (proper) của bộ điều khiển  $Q(s)$  định nghĩa ở (9).



Hình 5: Vòng điều khiển trong.

### Vòng điều khiển ngoài

Trong trường hợp mô hình hoàn toàn chính xác và hệ thống không có nhiễu, ta có thể thay thế vòng điều khiển trong bởi  $F(s)$  và được sơ đồ Hình 6, trong đó  $e$  là sai số điều khiển

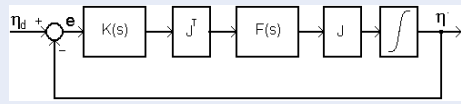
$$e = \eta_d - \eta \quad (12)$$

$\eta_d$  là giá trị đặt của  $\eta$ .

Vì hàm truyền đạt vòng hở từ  $e$  đến  $\eta$  trong Hình 6 có khâu tích phân, để triệt tiêu sai số xác lập khi  $\eta_d$  bằng hằng số, ta có thể sử dụng điều khiển tỷ lệ

$$K(s) = \text{diag} \{K_x, K_y, K_\psi\} \quad (13)$$

Trong Hình 4 và Hình 6,  $J = J(\psi)$  là ma trận chuyển hệ tọa độ định nghĩa ở (2). Thực hiện phép tính biểu thức  $JFJ^T$  ta có



Hình 6: Vòng điều khiển ngoài danh định.

$$JFJ^T = \begin{bmatrix} f_u \cos^2 \psi + f_v \sin^2 \psi & (f_u - f_v) \sin \psi \cos \psi & 0 \\ (f_u - f_v) \sin \psi \cos \psi & f_u \cos^2 \psi + f_v \sin^2 \psi & 0 \\ 0 & 0 & f_r \end{bmatrix} \text{ Nếu}$$

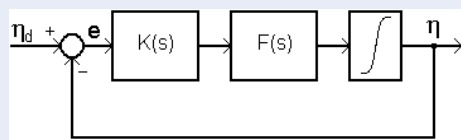
chọn \$F(s)\$ thỏa

$$f_u(s) = f_v(s) \quad (14)$$

ta có

$$J(\psi)F(s)J(\psi)^T = F(s) \quad (15)$$

và hệ thống điều khiển Hình 6 trở thành Hình 7



Hình 7: Vòng điều khiển ngoài danh định

Ma trận hàm truyền đạt vòng kín của hệ thống Hình 7 được xác định bởi

$$H(s) = \left( I + \frac{1}{s} F(s) K(s) \right)^{-1} \frac{1}{s} F(s) K(s) \quad (16)$$

Thay (8), (13) và (14) vào (16) và thực hiện phép tính, ta được

$$H(s) = \text{diag} \{ H_x(s), H_y(s), H_\psi(s) \} \quad (17)$$

với

$$H_x(s) = \frac{\frac{K_x}{\tau_u}}{s^2 + \frac{1}{\tau_u} s + \frac{K_x}{\tau_u}} \quad (18)$$

$$H_y(s) = \frac{\frac{K_y}{\tau_v}}{s^2 + \frac{1}{\tau_v} s + \frac{K_y}{\tau_v}} \quad (19)$$

$$H_\psi(s) = \frac{\frac{K_\psi}{\tau_r}}{s^2 + \frac{1}{\tau_r} s + \frac{K_\psi}{\tau_r}} \quad (20)$$

Cấu trúc đường chéo của \$H(s)\$ cho thấy khả năng điều khiển các tín hiệu ra \$x\$, \$y\$ và \$\psi\$ một cách độc lập nhau (decoupling).

## Các thông số của hệ thống điều khiển

Các hàm truyền đạt của \$H(s)\$ có dạng chuẩn bậc 2

$$H_x(s) = \frac{\omega_x^2}{s^2 + 2\zeta_x \omega_x s + \omega_x^2} \quad (21)$$

$$H_y(s) = \frac{\omega_y^2}{s^2 + 2\zeta_y \omega_y s + \omega_y^2} \quad (22)$$

$$H_\psi(s) = \frac{\omega_\psi^2}{s^2 + 2\zeta_\psi \omega_\psi s + \omega_\psi^2} \quad (23)$$

$$\text{với } \omega_x = \sqrt{\frac{K_x}{\tau_u}}, \omega_y = \sqrt{\frac{K_y}{\tau_v}}, \omega_\psi = \sqrt{\frac{K_\psi}{\tau_r}},$$

$$\zeta_x = \frac{1}{2\sqrt{\tau_u K_x}}, \zeta_y = \frac{1}{2\sqrt{\tau_v K_y}},$$

$$\zeta_\psi = \frac{1}{2\sqrt{\tau_r K_\psi}}$$

Các thông số thiết kế của hệ thống điều khiển là \$\tau\_u\$, \$\tau\_v\$, \$\tau\_\psi\$, \$K\_x\$, \$K\_y\$ và \$K\_\psi\$. Các thông số \$\tau\_u\$, \$\tau\_v\$ và \$\tau\_\psi\$ là thời hằng của đáp ứng của các thành phần vận tốc của tàu và có thể được xác định theo thời gian đáp ứng mong muốn của các thành phần vận tốc. Các thông số \$K\_x\$, \$K\_y\$ và \$K\_\psi\$ có thể được xác định để cực tiểu hoá các tiêu chuẩn tối ưu sau

- Tiêu chuẩn tối ưu ISE

$$\zeta_x = \frac{1}{2} \Rightarrow K_x = \frac{1}{\tau_u} \quad (24)$$

- Tiêu chuẩn IAE và ITAE:

$$\zeta_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow K_x = \frac{1}{2\tau_u} \quad (25)$$

- Để hệ thống có cực thực kép :

$$\zeta_x = 1 \Rightarrow K_x = \frac{1}{4\tau_u} \quad (26)$$

Các thông số \$K\_y\$ và \$K\_\psi\$ có thể được xác định một cách tương tự.

## Tính bền vững về ổn định

Phần này khảo sát tính ổn định bền vững của hệ thống điều khiển đề xuất đối với sai số mô hình. Các dạng biểu diễn của sai số mô hình sau sẽ được khảo sát:

Biểu diễn cộng :

$$G(s) = \hat{G}(s) + \Delta\delta_A \quad (27)$$

Biểu diễn nhân ở đầu vào :

$$G(s) = (I + \Delta\delta_1) \hat{G}(s) \quad (28)$$

Biểu diễn nhân ở đầu ra :

$$G(s) = \hat{G}(s) (I + \Delta\delta_0) \quad (29)$$

Trong đó

$$G(s) = (Ms + D)^{-1} \quad (30)$$

$$\hat{G}(s) = (\hat{M}s + \hat{D})^{-1} \quad (31)$$

$\Delta$  là ma trận hàm truyền đạt ổn định và thỏa tính chất  $\|\Delta\|_\infty < 1$ ,  $\delta_A$ ,  $\delta_I$  và  $\delta_0$  là các chặn trên của sai số mô hình tương ứng.

Trong phần này ta giả thiết  $F(s)$  được chọn như (8) với  $\tau_u = \tau_v = \tau_\psi = \tau_o$  tức

$$f_u(s) = f_v(s) = f_r(s) = f(s) = \frac{1}{\tau_o s + 1} \quad (32)$$

và  $K(s)$  được chọn như (20) với

$$K_x = K_y = K_\psi = K_o \quad (33)$$

Sơ đồ điều khiển với sai số mô hình sẽ được đưa về dạng ở **Hình 8**. Điều kiện ổn định bền vững đối với sai số mô hình là  $\|N(j\omega)\|_\infty < 1^8$ .

### Ổn định bền vững với sai số cộng

Hệ thống điều khiển với sai số cộng được trình bày ở **Hình 9**. Thực hiện phép tính và với  $\eta_d = 0$ , ta có thể đưa hệ thống **Hình 9** về sơ đồ **Hình 8** với

$$N(s) = N_A(s) = -\frac{(s + K_o)\delta_A}{\tau s^2 + s + K_o} \hat{G}(s)^{-1} \quad (34)$$

Điều kiện ổn định bền vững đối với sai số cộng

$$\|N_A(j\omega)\|_\infty < 1 \quad (35)$$

### Ổn định bền vững với sai số nhân đầu vào

Hệ thống điều khiển với sai số nhân đầu vào được trình bày ở **Hình 10**. Thực hiện các phép tính và với  $\eta_d = 0$ , ta có thể đưa hệ thống **Hình 10** về sơ đồ **Hình 8** với

$$N(s) = N_I(s) = -\frac{\frac{1}{\tau}s + \frac{K_o}{\tau}}{s^2 + \frac{1}{\tau}s + \frac{K_o}{\tau}} \delta_I I \quad (36)$$

Điều kiện ổn định bền vững đối với sai số nhân đầu vào

$$\|N_I(j\omega)\|_\infty < 1 \quad (37)$$

### Ổn định bền vững với sai số nhân đầu ra

Hệ thống điều khiển với sai số nhân đầu ra được trình bày ở **Hình 11**  $\eta_d = 0$ . Thực hiện các phép tính và với , ta có thể đưa hệ thống **Hình 11** về sơ đồ **Hình 8** với

$$N(s) = N_o(s) = -\frac{\frac{1}{\tau}s + \frac{K_o}{\tau}}{s^2 + \frac{1}{\tau}s + \frac{K_o}{\tau}} \delta_o I \quad (38)$$

Điều kiện ổn định bền vững đối với sai số nhân đầu ra

$$\|N_o(j\omega)\|_\infty < 1 \quad (39)$$

## KẾT QUẢ MÔ PHỎNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT

Đối tượng điều khiển là tàu dịch vụ đa năng Northern Clipper với các thông số như sau<sup>1,9</sup>,

$$M = \begin{bmatrix} 5,31 & 0 & 0 \\ 0 & 8,28 & 0 \\ 0 & 0 & 3,74 \times 10^3 \end{bmatrix} \times 10^6 \text{ [kg]} \quad (38)$$

$$D = \begin{bmatrix} 5,0242 & 0 & 0 \\ 0 & 27,1 & -439 \\ 0 & -439 & 4,18 \times 10^4 \end{bmatrix} \times 10^4 \text{ [Ns/m]} \quad (39)$$

Bộ điều khiển IMC được thiết kế với hằng số thời gian tốc độ  $\tau_o = 4s$  (tốc độ đạt 95% giá trị xác lập sau  $3\tau_o = 12s$ ),  $K_o = 1/4\tau_o = 0,0625$  được xác định theo (26). Trong mô phỏng, tàu di chuyển dọc theo các cạnh của hình vuông ABCD với tọa độ A(0,0), B(40,0), C(40,40), D(0,40). Tàu di chuyển theo 4 giai đoạn:

- Tàu di chuyển thẳng từ A đến B với góc  $\psi = 0$ .
- Tàu di chuyển ngang từ B đến C với góc  $\psi = 0$ .
- Tàu di chuyển lùi từ C đến D với góc  $\psi = 0$ .
- Tàu di chuyển xoay mũi đạt ngang sang phải từ D đến A với góc  $\psi = 0.25 \text{ rad} \approx 14^\circ$ .

### Trường hợp không có nhiễu

**Hình 12** trình bày kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển với  $\hat{M} = M$ ,  $\hat{D} = D$  (tàu có tải trọng định mức). Có thể thấy các tín hiệu ra  $x$ ,  $y$  và  $\psi$  được điều khiển một cách độc lập nhau.

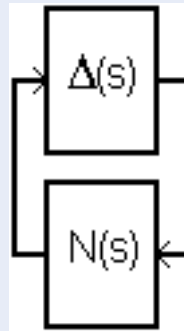
**Hình 13** trình bày kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển với  $\hat{M} = 2M$ ,  $\hat{D} = 2D$  (tàu chạy non tải). Có thể thấy các tín hiệu ra  $x$ ,  $y$  và  $\psi$  được điều khiển một cách độc lập nhau và hệ thống đáp ứng nhanh hơn khi tàu có tải trọng định mức (**Hình 11**).

**Hình 14** trình bày kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển với  $\hat{M} = 0,8M$ ,  $\hat{D} = 0,8D$  (tàu chạy quá tải 25%). Có thể thấy đáp ứng của hệ thống điều khiển chậm hơn, tàu không thể chạy nhanh như khi chạy đúng tải hoặc non tải.

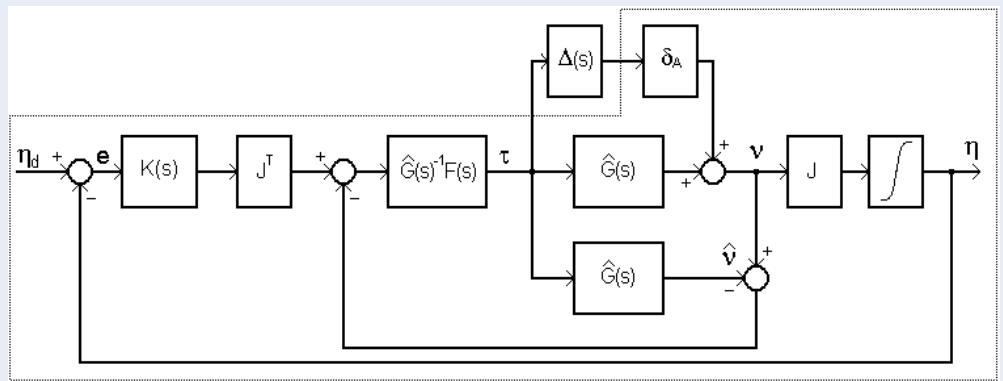
### Trường hợp có nhiễu

Thực hiện mô phỏng trong các điều kiện thời tiết (sea state code) cấp 5 trong thang độ Beaufort. Việc phân loại điều kiện thời tiết được diễn giải theo **Bảng 1**.

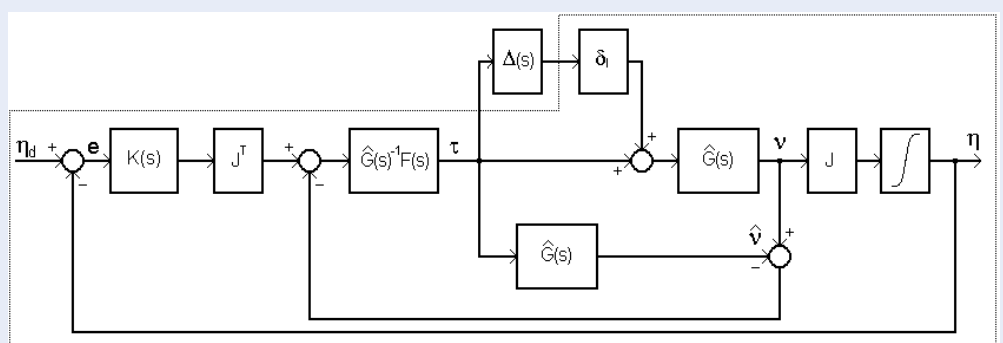
**Hình 15** trình bày kết quả mô phỏng khi tàu có tải định mức trong điều kiện thời tiết cấp 5. Ta thấy hệ thống điều khiển hoạt động tốt trong điều kiện thời tiết này.



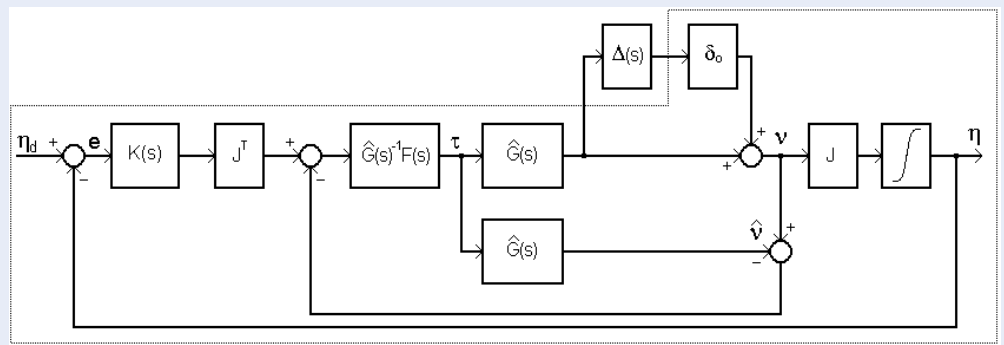
Hình 8: Sơ đồ khảo sát tính ổn định bền vững.



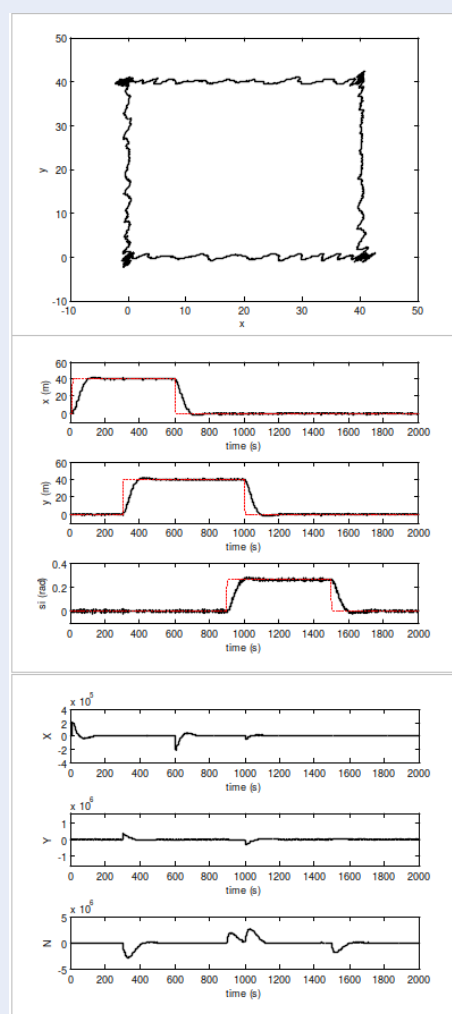
Hình 9: Hệ thống điều khiển với sai số cộng.



Hình 10: Hệ thống điều khiển với sai số nhân đầu vào.



Hình 11: Hệ thống điều khiển với sai số nhân đầu ra.



Hình 15: Đáp ứng của hệ thống điều khiển với tải định mức (\$\hat{M} = M, \hat{D} = D\$), có nhiễu tác động.

Bảng 1: Thang độ thời tiết Beaufort

Cấp	Trạng thái biển	Cao sóng \$H_{1/3}\$ (m)	Tần số (rad/s)
0	Phẳng lặng	0	1,29
1	Sóng lăn tăn không có ngọn	0-0,1	1,29-1,11
2	Sóng lăn tăn	0,1-0,5	1,11-0,93
3	Sóng lăn tăn lớn	0,5-1,25	0,93-0,79
4	Sóng nhỏ	1,25-2,5	0,79-0,68
5	Sóng dài vừa phải	2,5-4,0	0,68-0,60
6	Sóng lớn với chòm bọt	4,0-6,0	0,60-0,53
7	Biển cuộn sóng	6,0-9,0	0,53-0,46
8	Sóng cao vừa phải	9,0-14	0,46-0,39
9	Sóng cao hơn.	>14	<0,39

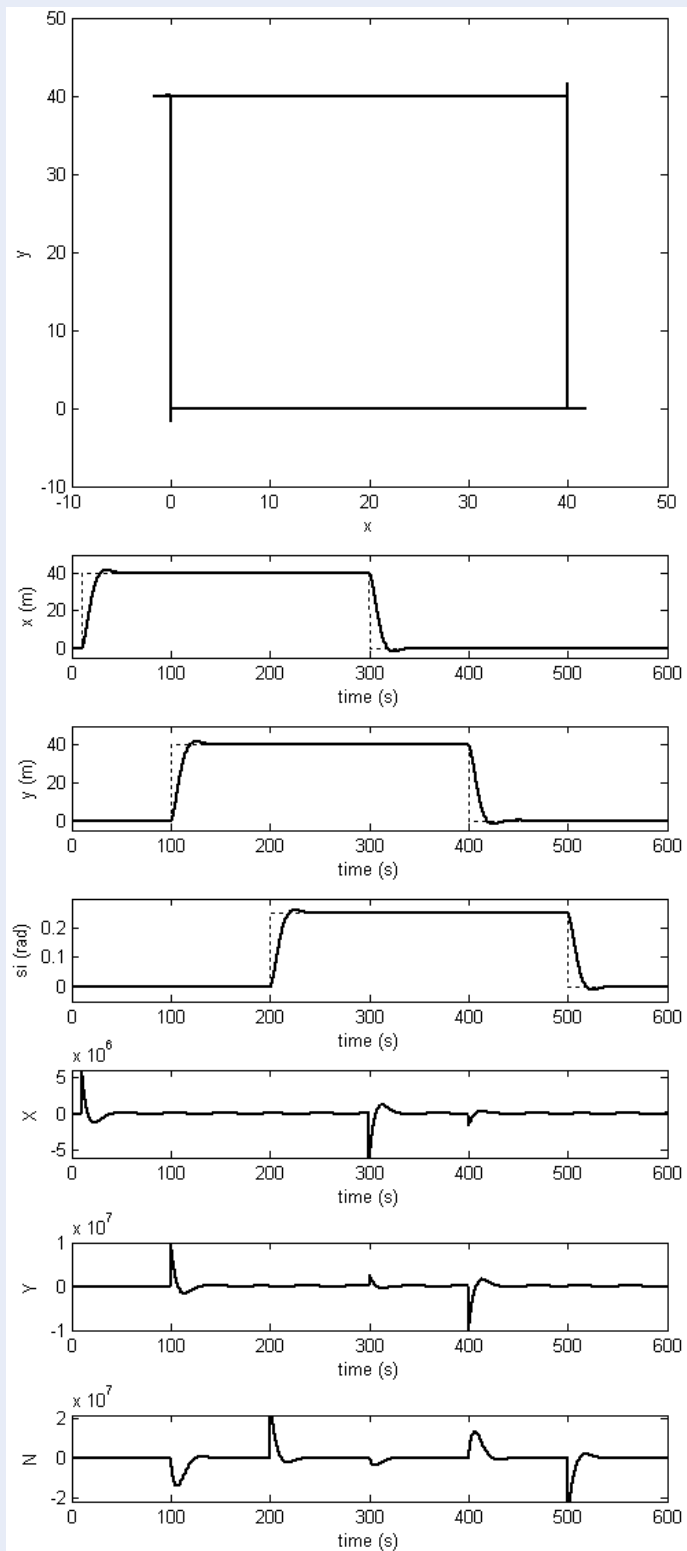
## SO SÁNH ĐIỀU KHIỂN PID PHI TUYẾN VÀ ĐIỀU KHIỂN IMC

### Hệ thống điều khiển PID phi tuyến

Luật điều khiển PID phi tuyến áp dụng cho tàu DP như sau<sup>1</sup> được sử dụng để so sánh với hệ thống điều khiển đề nghị:

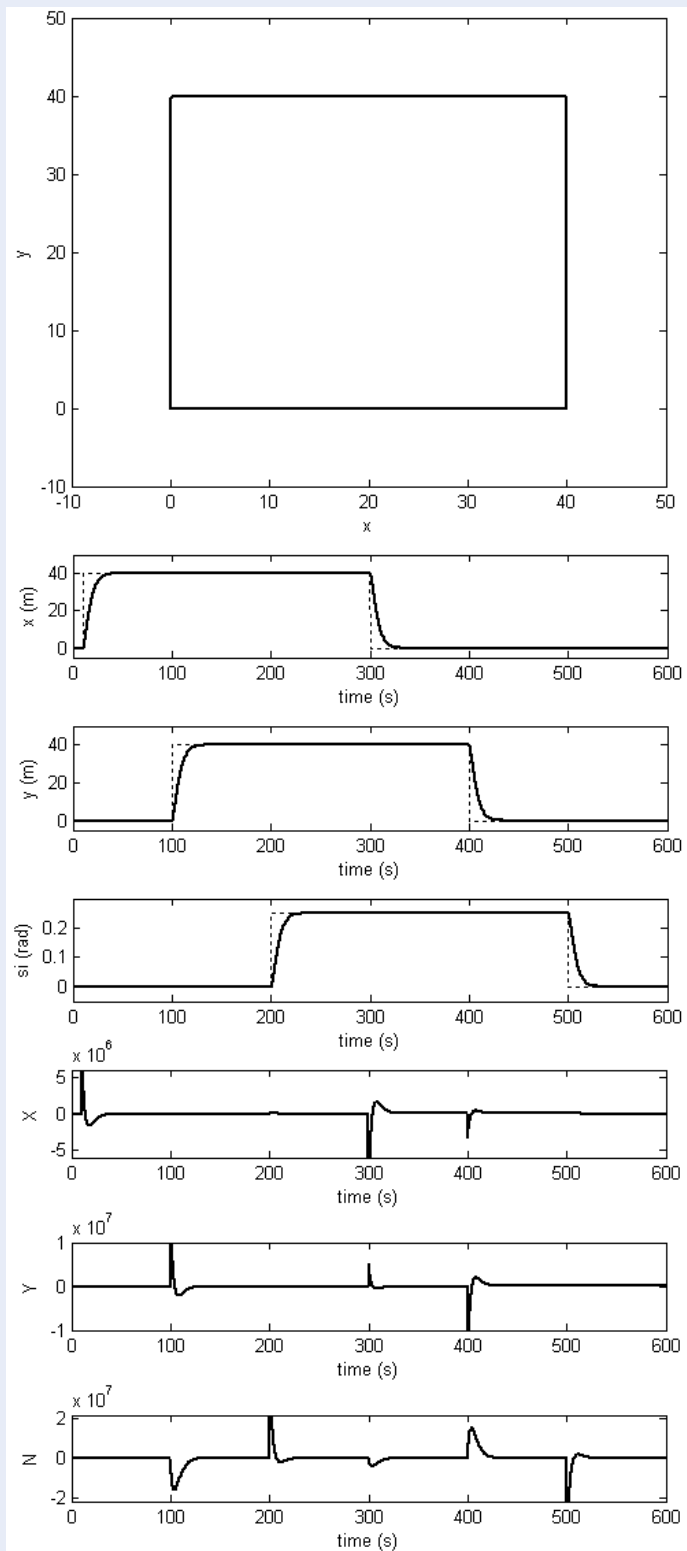
$$\tau = J^T(\psi) \left[ K_p e + K_D \frac{de}{dt} + K_I \int_0^t e dt \right] \quad (40)$$

Trong đó \$e = \eta\_d - \eta\$ là sai số điều khiển, \$\eta\_d\$ là giá trị đặt của \$\eta\$. Các ma trận \$K\_p = \text{diag}\{K\_{p1}, K\_{p2}, K\_{p3}\}\$, \$K\_I = \text{diag}\{K\_{I1}, K\_{I2}, K\_{I3}\}\$, \$K\_D = \text{diag}\{K\_{D1}, K\_{D2}, K\_{D3}\}\$ là các ma trận hằng số thiết kế và được xác định bằng phương pháp thử sai. Thực tế \$\eta\_d\$ thường là hàm nấc,

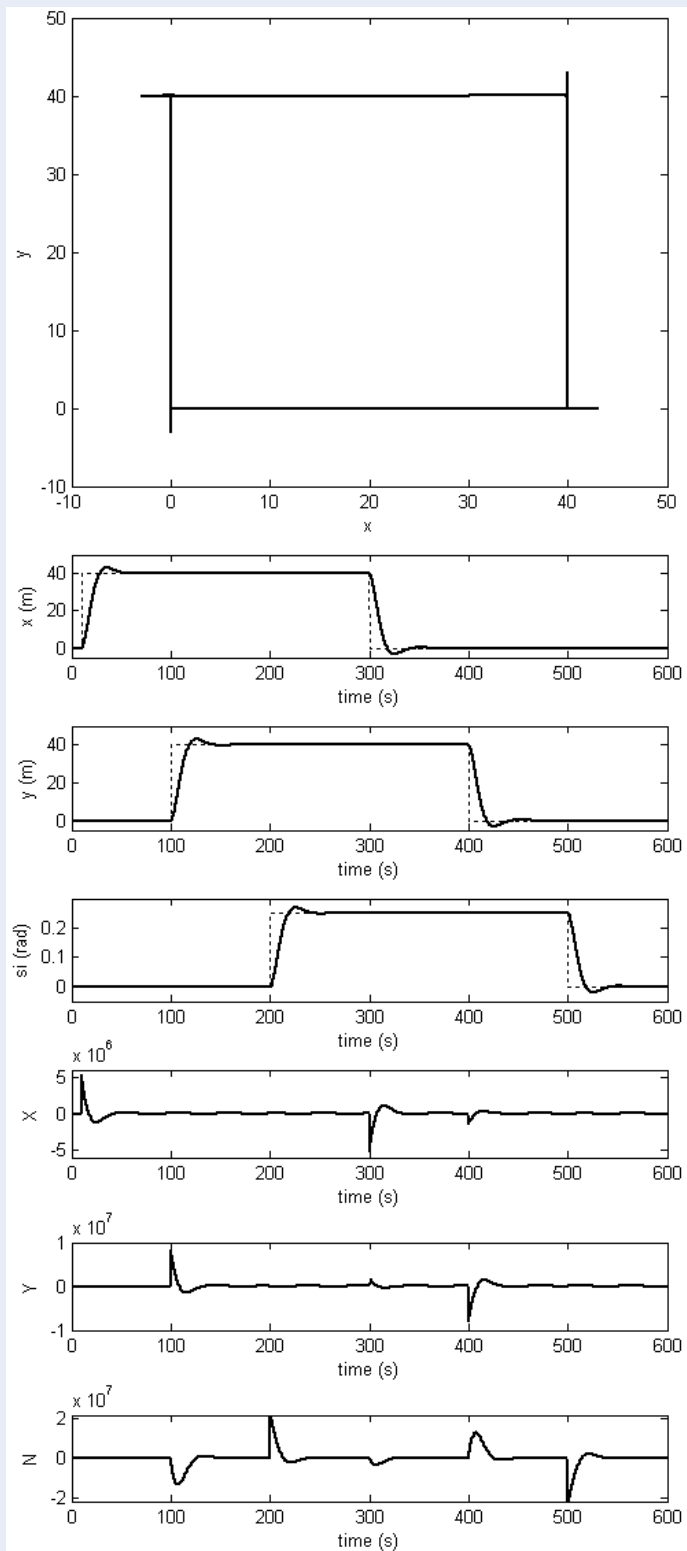


Hình 12: Đáp ứng của hệ thống điều khiển với tải định mức ( $\hat{M} = M$ ,  $\hat{D} = D$ ), không có nhiễu.





Hình 13: Đáp ứng của hệ thống điều khiển khi tàu chạy non tải ( $\hat{M} = 2M, \hat{D} = 2D$ ), không có nhiễu.



Hình 14: Đáp ứng của hệ thống điều khiển khi tàu chạy quá tải ( $\hat{M} = 0,8M$ ,  $\hat{D} = 0,8D$ ), không có nhiễu.

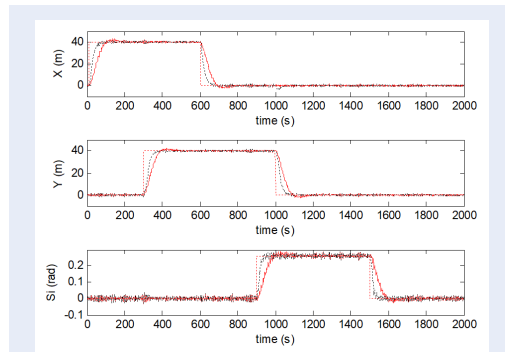
để tránh ảnh hưởng của sự thay đổi đột ngột của  $\eta_d$  lên khâu vi phân, ta thay luật điều khiển (40) bởi

$$\tau = J^T(\psi) \left[ K_p e - K_D \frac{d\eta}{dt} + K_I \int_D e dt \right] \quad (41)$$

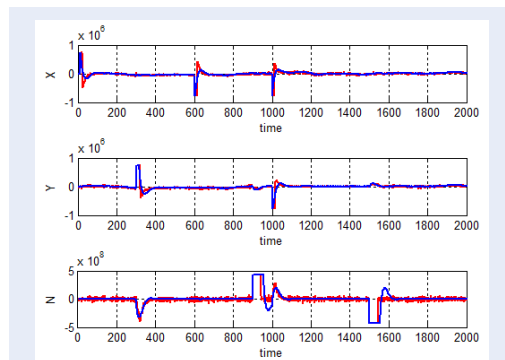
**So sánh kết quả mô phỏng điều khiển PID phi tuyến và điều khiển IMC**

Phần này trình bày so sánh kết quả mô phỏng trong điều kiện nhiễu động thời tiết cấp 5 của bộ điều khiển IMC để xuất với bộ điều khiển PID

Chọn hệ số :  $K_p = \text{diag}([6e+5, 6e+5, 1e+9]); K_D = \text{diag}([9e+6, 9e+6, 9e+9]); K_I = \text{diag}([10, 10, 150]);$



**Hình 16: So sánh kết quả mô phỏng với luật điều khiển IMC và PID phi tuyến trong điều kiện thời tiết cấp 5.**



**Hình 17: So sánh kết quả mô phỏng lực điều khiển đầu vào với luật điều khiển IMC và PID phi tuyến trong điều kiện thời tiết cấp 5.**

**Hình 16** trình bày đồ thị tọa độ theo t. Lần lượt là tọa độ x, y,  $\psi$  và hướng mũi tàu. Đồ thị màu đỏ (nét chấm) tín hiệu đặt, màu đỏ (nét liền) đáp ứng của hệ thống với luật điều khiển IMC, màu đen (nét rời) là đáp ứng hệ thống với luật điều khiển PID phi tuyến.

Ta thấy trong điều kiện thời tiết cấp 5 (nhiều động lớn) hệ thống điều khiển IMC có đáp ứng chậm hơn so với hệ thống điều khiển PID phi tuyến.

**Hình 17** cho thấy lực tác động bộ điều khiển IMC (nét mảnh liền màu xanh) ít nhạy với sự thay đổi của nhiễu động do sóng biển đầu ra tần số cao. Đồ thị màu đỏ nét liền là lực tác động bộ điều khiển PID. Ta thấy bộ điều khiển PID trong thực tế phải có bộ lọc tín hiệu nhiễu sóng biển đầu ra. Ngoài ra bộ điều khiển PID dẫn đến quá tải hệ truyền động.

**THẢO LUẬN**

Qua kết quả của mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển với hai vòng điều khiển có nhiều ưu điểm như dễ chỉnh định vì chỉ cần hằng số thời gian của bộ lọc IMC tham gia vào quá trình chỉnh định hệ thống kín, hệ số tỉ lệ của vòng điều khiển ngoài có thể xác định theo hằng số thời gian. Hệ thống điều khiển có tính ổn định bền vững với sai số mô hình và kháng nhiễu tốt. Ngoài ra hệ thống điều khiển đề xuất không làm quá tải hệ thống truyền động như điều khiển PID.

**KẾT LUẬN**

Bài báo trình bày mô hình tàu định vị động học DP và giới thiệu hệ thống điều khiển hai vòng cho tàu DP. Vòng trong sử dụng giải thuật điều khiển mô hình nội. Vòng ngoài sử dụng giải thuật điều khiển tuyến tính hóa tách kênh. Các kết quả mô phỏng ở nhiều điều kiện thời tiết khác nhau, cho thấy hệ thống điều khiển đề nghị có chất lượng tốt khi có nhiễu động, bền vững với sai số mô hình (ma trận khối lượng M và ma trận suy giảm D). Trong điều kiện thời tiết cấp 5 (độ Beaufort, chiều cao sóng biển 2,5-4,0m), bộ điều khiển dùng mô hình nội cho kết quả tốt. Bộ điều khiển đề xuất có quá trình chỉnh định đơn giản vì chỉ chọn một giá trị hằng số thời gian của bộ lọc IMC cho vòng điều khiển trong và một bộ hệ số của bộ điều khiển (P) của vòng điều khiển vị trí ngoài. Bộ điều khiển IMC ít nhạy với nhiễu động sóng biển tần số cao. Trong thực tế nhiễu động do thời tiết là lớn hơn vì vậy các nghiên cứu tiếp theo là thiết kế bộ điều khiển cho tàu DP có khả năng làm việc trong điều kiện thời tiết khắc nghiệt hơn.

**DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT**

- DP: dynamic positioning (định vị động)
- IMC: internal model control (điều khiển mô hình nội)
- LF: low frequency (tần số thấp)
- PID: proportional, intergral, derivative (tỉ lệ, tích phân, vi phân)
- PM: positioning mooring (định vị neo)
- P: proportional (tỉ lệ)
- WF: wave frequency (tần số sóng)

## XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

## ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Dương Hoài Nghĩa tham gia vào việc định hướng nghiên cứu đưa ra ý tưởng.

Nguyễn Văn Vị Quốc thu thập dữ liệu, tính toán, viết bài bản thảo và chỉnh.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Fossen TI. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons Ltd. Published. ; 2011.
2. Fossen TI. Marine Control Systems - Guidance, Navigation and Control of Ship, Rigs and Underwater Vehicles. In: Marine Cybernetics, Trondheim, Norway; 2002. ISBN 82-92356-00-2.
3. Strand JP. Nonlinear Position Control Systems Design for Marine Vessels, Phd thesis, NTNU, Trondheim, Norway; 1999.
4. Eduardo AT, Leonardo KK, Celso PP. Adaptive Technique Applied to Offshore Dynamic Positioning Systems, Depart of Naval Architecture and Ocean.J. of the Braz. Soc. H Ch Minh; 2011.
5. Xuetao C. Adaptive Interval Type-2 Fuzzy Logic Control of Marine Vessels, Phd thesis, National University of Singapore; 2013.
6. Phùng HN, Việt TN. "Hệ thống định vị động học tàu thủy -Phần 1,2: Nguyên lý" Tạp chí KH-CN Hàng hải số 14-Tháng 6/(2008) ,trang 38-42.
7. Morari M, Zafriou E. Robust process control, Prentice Hall International; 1987.
8. Hoài ND. Điều khiển hệ thống đa biến, NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh; 2011.
9. Fossen TI, Strand JP. Passive nonlinear observer design for ship using Lyapunov methods: full-scale experiments with a supply vessel. Automatica. 1999;35(1):3-16.