

## HỆ THỐNG LÁI HƯỚNG TÀU THỦY ĐA CHẾ ĐỘ

MULTI - REGIME SHIP COURSE CONTROLLER

Lê Thanh Tùng

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

### TÓM TẮT

*Nhiệm vụ chính của hệ thống lái tự động là giữ tàu chuyển động theo hướng chọn trước để đảm bảo an toàn hàng hải và tính kinh tế của vận tải biển. Để nâng cao chất lượng làm việc của chúng, nhiều kỹ thuật điều khiển khác nhau đã, đang và sẽ được áp dụng và phát triển. Trong bài báo này, một bộ điều khiển đa chế độ xây dựng trên biến tổ hợp được đề xuất. Hệ thống sẽ ứng xử khác nhau, tùy thuộc vào độ lớn biến tổ hợp. Hạn chế góc bẻ lái được tính đến trong xây dựng luật điều khiển. Ổn định của hệ thống được chứng minh theo lý thuyết ổn định Lyapunov. Hoạt động của hệ tổng hợp được đánh giá trong các điều kiện khác nhau thông qua mô phỏng số sử dụng phần mềm Matlab. Các kết quả đạt được cho thấy, bộ điều khiển đề xuất có thể ứng dụng trong thực tế.*

**Từ khóa:** *Điều khiển đa chế độ; Điều khiển tối ưu; Biến tổ hợp; Động lực học tàu thủy; Hệ thống lái tự động tàu thủy.*

### ABSTRACT

*The major ship autopilot duty is to keep a predefined direction using mostly rudder. For their successful design and performance improvement various control techniques were and are developed. In this paper, a multi-regime controller based on so called aggregated variable is presented. The behavior of the autopilot is depended on the aggregated variable values. The limitation on the rudder deflection is involved in control law design. The system stability is proved through Lyapunov theory. The performance of designed autopilot is evaluated through numerical simulation in Matlab. The results show that proposed ship autopilot can efficiently be used to control the course of real ships.*

**Keywords:** *Multi-regime controller; Optimal control; Aggregated variable; Ship dynamics, ship autopilot.*

1. MỞ ĐẦU

Nhiệm vụ chính của hệ thống lái tự động tàu thủy là duy trì hướng chuyển động của tàu được ổn định nhờ hoạt động của bánh lái. Sự an toàn hành hải cũng như hiệu quả kinh tế của vận tải biển phụ thuộc trực tiếp vào chất lượng hoạt động của các hệ thống lái tự động. Để cải thiện chất lượng làm việc của chúng nhiều kỹ thuật điều khiển hiện đại đã, đang và sẽ được nghiên cứu, ứng dụng như điều khiển thích nghi, mờ, điều khiển tối ưu hay sử dụng mạng nơ ron nhân tạo [1-10, 14]. Đối với cách tiếp cận theo điều khiển tối ưu các phân tích cho thấy, thứ nhất, chỉ số đánh giá chất lượng hay sử dụng là tiêu chuẩn bình phương tuyến tính và hệ tổng hợp ứng xử theo cùng một cách không phụ thuộc vào trạng thái của nó so với điểm cân bằng. Trong thực tế, sẽ là hợp logic hơn nếu hệ thống quay về lân cận trạng thái cân bằng một cách nhanh nhất có thể có tính đến tiết kiệm năng lượng, nhờ đó hạn chế tải trọng lên máy lái và suy giảm tốc độ tàu, do lực cản tăng. Ngoài ra, góc bẻ lái lớn nhất cũng bị hạn chế và việc không tính đến hiện tượng này trong xây dựng luật điều khiển có thể dẫn đến mất ổn định của hệ thống. Trong bài báo này, bộ điều khiển tối ưu đa chế độ sử dụng biến tổ hợp được đề xuất. Ứng xử của hệ tổng hợp sẽ khác nhau tùy thuộc vào trạng thái của hệ thống so với điểm cân bằng. Trường hợp sai lệch lớn bộ điều khiển có thuộc tính của bộ điều khiển tác động nhanh và tiết kiệm năng lượng. Khi sai lệch nhỏ, chúng ta có bộ điều khiển LQR truyền thống. Hạn chế góc bẻ lái được đưa vào trong tính toán thông số bộ điều khiển và nhờ vậy có thể kiểm soát được sự quá điều chỉnh, suy giảm tốc độ do gia tăng lực cản, nhờ đó hiệu quả làm việc của tàu có thể được cải thiện. Ổn định của hệ được tổng hợp được chứng minh theo lý thuyết Lyapunov. Bài báo

có cấu trúc như sau: Ở phần tiếp theo, mô tả ngắn gọn động lực học tàu, máy lái và nhiễu môi trường được thực hiện. Tổng hợp bộ điều khiển, đánh giá chế độ và ổn định được trình bày ở phần 3. Kết quả mô phỏng, so sánh và đánh giá có trong phần 4. Kết luận được trình bày trong phần cuối cùng.

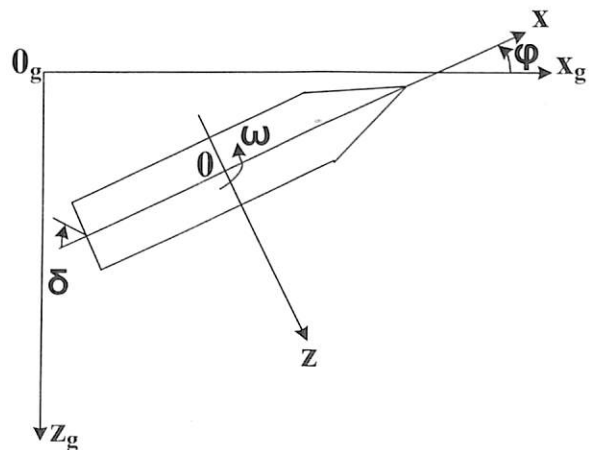
2. TÓM TẮT ĐỘNG LỰC HỌC TÀU, MÁY LÁI VÀ NHIỄU NGOÀI

2.1. Động lực học tàu và máy lái

Phương trình mô tả chuyển động của tàu được giới thiệu trong nhiều tài liệu [11-13, 17]. Đối với bài toán ổn định hướng chuyển động có thể bỏ qua sự dạt và tương tác giữa chuyển động đảo lái với chúi và lác ngang. Vận tốc của tàu được xem là ổn định, chuyển động (đảo lái) của tàu được xem là diễn ra trên mặt phẳng nằm ngang (h.1) và được mô tả bởi các phương trình sau:

$$\dot{\varphi} = \omega; \dot{\omega} = f(\omega, \delta) \tag{1}$$

Với:  $\varphi$ - Góc đảo lái;  $\omega$ - Vận tốc góc đảo lái;  $\delta$ - Góc bẻ lái.



Hình 1. Chuyển động đảo lái và các thông số.

Một mô hình phổ biến trong xây dựng hệ thống ổn định hướng là mô hình Nomoto tuyến tính bậc nhất [16]:

$$\dot{\varphi} = \omega; \dot{\omega} = -\frac{1}{T}\omega + \frac{K}{T}\delta \quad (2)$$

Ở đây, K- Hệ số đặc trưng cho hiệu quả của bánh lái; T-Hằng số thời gian.

Sử dụng mô hình máy lái [3] :

$$\dot{\delta} = -\frac{1}{T_3}\delta + \frac{1}{T_3}u; |u| \leq m_{\max} \quad (3)$$

Với u- Lệnh bẻ lái;  $u_{\max}$  - Góc bẻ lái lớn nhất;  $T_3$ - Hằng số thời gian máy lái.

## 2.2. Nhiễu môi trường

Sóng biển là nhiễu môi trường chủ yếu tác động lên thân tàu. Trong bài báo này sử dụng mô hình sóng biển sau [17]:

$$\dot{x}_w = A_w x_w + b_w \eta; w = C_w^T x_w \quad (4)$$

Với:

$$A_w = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}; b_w = \begin{bmatrix} 0 \\ K_w \end{bmatrix}; C_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Trong đó:  $\eta$  - Nhiễu trắng Gauss với trị trung bình không;  $\omega_n$  - Tần số sóng chủ đạo;  $\xi$  - Hệ số suy giảm tương đối của sóng;  $K_w$  - Hệ số phụ thuộc vào năng lượng sóng. Mô hình sóng dạng hàm truyền như sau:

$$w = C_w^T (sI - A_w)^{-1} b_w = \frac{K_w s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

## 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VÀ ĐÁNH GIÁ

Kết hợp phương trình (1) và (2), đồng

thời ký hiệu  $x_1 = \varphi; x_2 = \omega = \dot{\varphi}; x_3 = \delta$ , ta có hệ phương trình hệ mở rộng như sau:

$$\dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = -\frac{1}{T}x_2 + \frac{K}{T}x_3; \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_3}x_3 + \frac{1}{T_3}u \quad (7)$$

### 3.1. Thiết kế bộ điều khiển

Bộ điều khiển được thiết kế theo phương pháp trình bày trong [14, 15]. Xác định biến tổ hợp theo công thức:

$$\psi = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 \quad (8)$$

Chọn phiếm hàm:

$$J = \int_0^{\infty} \left( T_1^2 \dot{\psi}^2 + (th\psi)^2 \right) dt; T_1 > 0 \quad (9)$$

Tín hiệu điều khiển u được xác định từ

phương trình:  $T_1 \dot{\psi} + h\psi = 0$  và có dạng như sau:

$$u = -\frac{T_3}{c_3} \left[ \left( c_1 - \frac{c_2}{T} \right) x_2 + \left( -\frac{c_3}{T_3} + \frac{c_2 K}{T} \right) x_3 + \frac{th\psi}{T_1} \right] \quad (10)$$

Chọn:

$$c_1 = \frac{c_2}{T}; \frac{c_3}{T_3} = \frac{c_2 K}{T} \quad (11)$$

Ta có luật điều khiển:

$$u = -\frac{T_3}{T_1 c_3} th\psi; \frac{T_3}{T_1 c_3} \leq u_{\max} \quad (12)$$

Dưới tác động của tín hiệu điều khiển trên điểm biểu diễn trạng thái của hệ thống chuyển động về lân cận mặt  $\psi = 0$  và chuyển động dọc trên mặt này. Phương trình chuyển động của hệ lúc này được mô tả bởi phương trình:

$$\dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = -\frac{Kc_1}{Tc_3} x_1 - \left(-\frac{1}{T} + \frac{Kc_2}{Tc_3}\right) x_2 \quad (13)$$

Các tham số  $c_1, c_2, c_3$  phải đảm bảo chuyển động dọc theo  $\psi = 0$  là ổn định.

### 3.2. Phân tích ổn định

Xét hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \frac{Kc_1}{Tc_3} x_1^2 + \frac{1}{2} x_2^2 \quad (14)$$

Lấy đạo hàm theo thời gian ta có:

$$\dot{V} = \frac{Kc_1}{Tc_3} x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 = x_1 x_2 \left(\frac{Kc_1}{Tc_3} - \frac{Kc_1}{Tc_3}\right) - x_2 \left(\frac{1}{T} + \frac{Kc_2}{Tc_3}\right) = -x_2 \left(\frac{1}{T} + \frac{Kc_2}{Tc_3}\right) \quad (15)$$

Sử dụng (11) ta có:

$$\frac{1}{T} + \frac{Kc_2}{Tc_3} = \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T} > 0 \rightarrow V \geq 0; \dot{V} = -x_2^2 \left(\frac{1}{T} + \frac{Kc_2}{Tc_3}\right) \leq 0$$

Ta thấy: Khi  $t \rightarrow \infty, x_2 \rightarrow 0$ . Từ

$$\dot{x}_2 = -\frac{Kc_1}{Tc_3} x_1 - \left(-\frac{1}{T} + \frac{Kc_2}{Tc_3}\right) x_2 \text{ ta có } x_1 \rightarrow 0.$$

Vậy, hệ ổn định toàn cục.

### 3.3. Phân tích chế độ

• Chế độ sai lệch lớn. Trong chế độ này,  $th\psi \rightarrow 1$

tín hiệu điều khiển  $|u| \rightarrow \frac{T_3}{T_1 c_3} \leq u_{\max}$ , phiếm

$$\text{hàm trở thành: } J = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{T_3^2}{c_3^2} u^2 + 1 \right) dt \quad (16)$$

Với,  $t_1, t_2$  - Thời điểm bắt đầu và kết thúc chế độ. Rõ ràng đây là phối hợp của tiêu chuẩn tối ưu thời gian và năng lượng.

• Chế độ sai lệch nhỏ. Trong chế độ này,  $th\psi \approx \psi = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3$ , tiêu chuẩn trở thành:

$$J = \int_0^{\infty} \left( \frac{T_3^2}{c_3^2} u^2 + (c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3)^2 \right) dt = \int_0^{\infty} (u^T R u + x^T Q x) dt \quad (17)$$

Với:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}; R = \frac{T_3^2}{c_3^2}; Q = \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_1 c_2 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_1 c_3 & c_2 c_3 & c_3^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

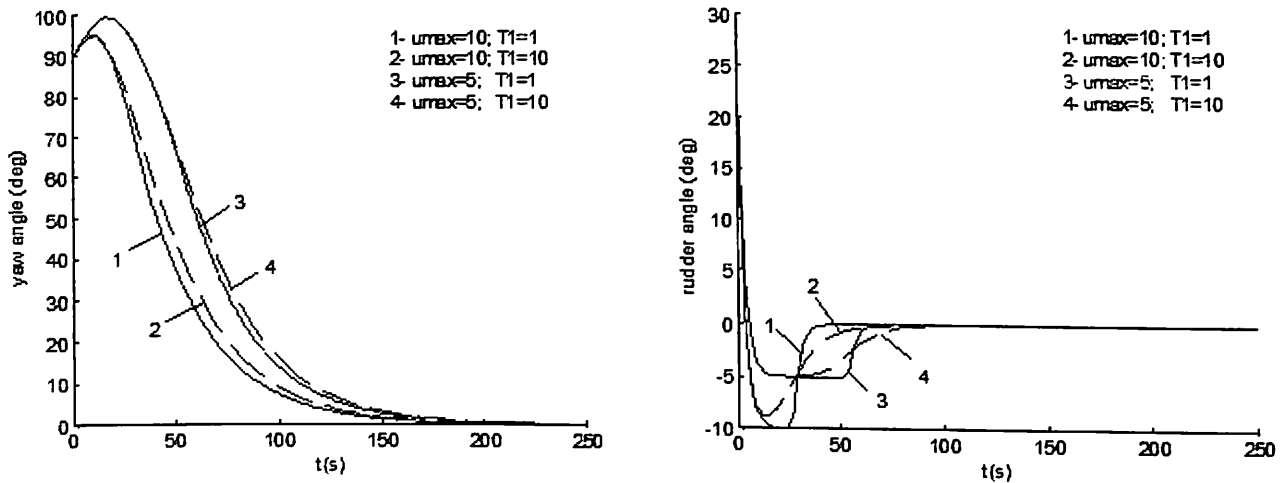
Rõ ràng đây là tiêu chuẩn bình phương tuyến tính.

### 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mô phỏng được thực hiện trong Matlab Simulink. Các tham số của mô hình sử dụng trong mô phỏng được lấy từ [17], với các giá trị sau:  $K = 0.5(1/s); T = 31(s)$ . Góc hướng yêu cầu là bằng 0. Quá trình quá độ của hệ thống với các tham số khác nhau của bộ điều khiển được trình bày trên hình 2. Có thể thấy là góc

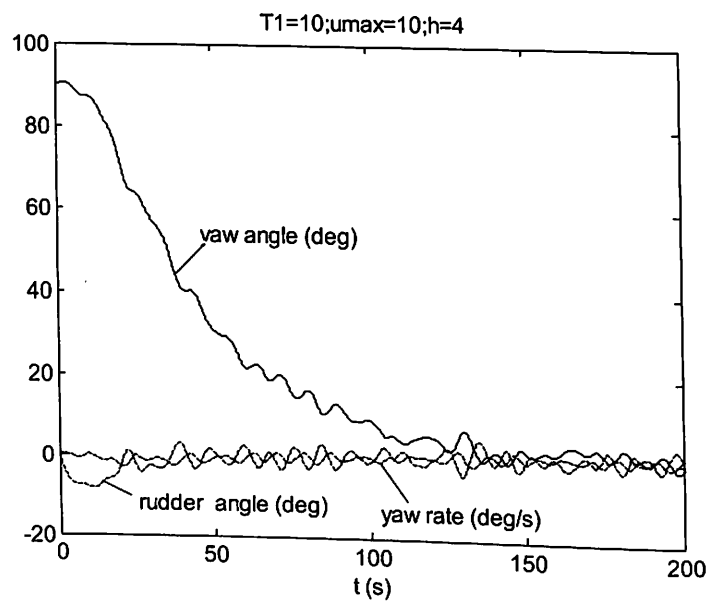
đảo lái, vận tốc góc đảo lái và góc bẻ lái hội tụ về các giá trị mong muốn sau khoảng thời gian nhất định. Ngoài ra, góc bẻ lái hội tụ về 0 nhanh hơn góc đảo lái và vận tốc góc đảo lái. Điều này, có thể được giải thích bởi khi sai lệch nhỏ hệ thống tự chuyển động về trạng thái cân bằng

(hệ (18) ổn định). Khi sai lệch có giá trị lớn góc bẻ lái nhanh chóng đạt giá trị cực đại được thiết lập và duy trì nó chừng nào sai số chưa giảm tới giá trị nào đó. Bằng cách thay đổi hệ số  $T_1$ , ta thay đổi được thời gian xác lập của hệ thống. Góc bẻ lái được giới hạn ở các giá trị đặt trước.



Hình 2. Thay đổi góc đảo lái và góc bẻ lái theo thời gian trên nước tĩnh.

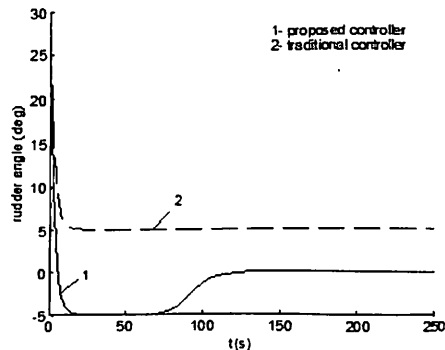
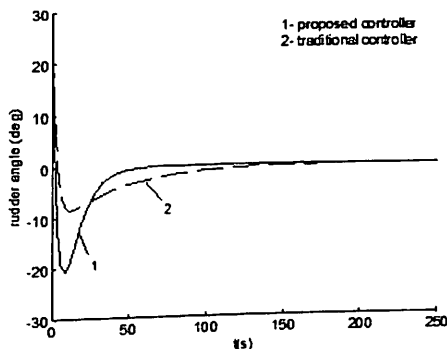
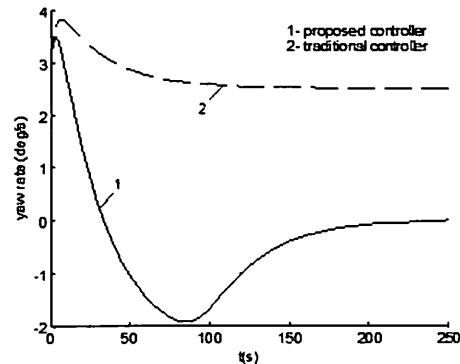
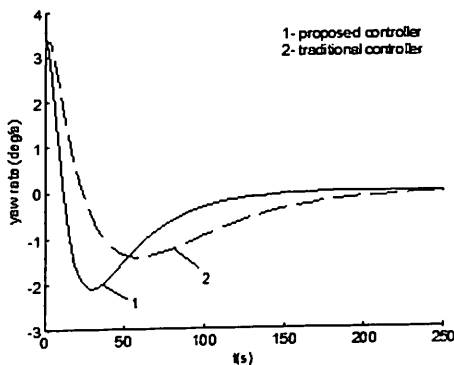
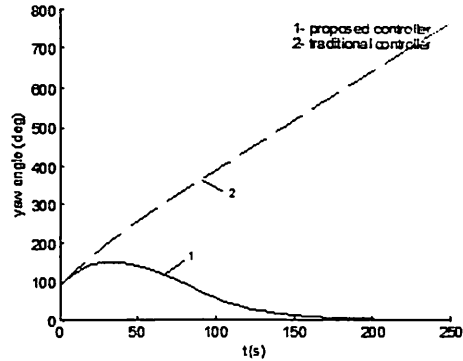
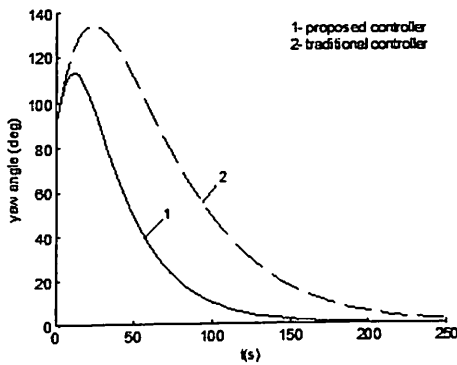
Hệ thống được mô phỏng trong các điều kiện khác nhau (cấp sóng). Trên hình 3, trình bày thay đổi góc đảo lái, vận tốc đảo lái và góc bẻ lái theo thời gian cho sóng với chiều cao đảm bảo 3% là 4 m. Có thể thấy rằng, góc đảo lái, vận tốc đảo lái và góc bẻ lái dao động xung quanh đặc tính trên nước tĩnh. Biên độ dao động góc đảo lái là khoảng  $3^\circ$ . So sánh với bộ điều khiển LQR truyền thống được trình bày trên hình 4. Các tham số của bộ điều khiển truyền thống được xác định với các ma trận Q và R lấy từ (18). Việc so sánh được thực hiện cho các giới hạn góc bẻ lái là  $35^\circ$ (a) và  $5^\circ$ (b).



Hình 3. Thay đổi góc và vận tốc đảo lái, góc bẻ lái ở sóng với  $h_3\% = 4$  m.

Kết quả cho thấy, trường hợp cả hai hệ đề xuất (1) và hệ truyền thống (2) có hạn chế góc bề lái là  $35^\circ$ , hệ đề xuất nhanh chóng đưa tàu về lân cận trạng thái cân bằng. Góc bề lái của hệ lúc này nhỏ hơn so với hệ truyền thống,

thời gian quá độ, độ quá điều chỉnh của góc hướng của hệ truyền thống lớn hơn. Trường hợp bị giới hạn góc bề lái là  $5^\circ$ , bộ điều khiển truyền thống thậm chí không đảm bảo ổn định của hệ thống.



a

b

Hình 5. So sánh hoạt động các bộ điều khiển

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, hệ thống lái hướng đa chế độ được đề xuất. Hệ thống ứng xử khác nhau phụ thuộc vào độ lớn biến tổ hợp (đặc trưng cho sự lệch hệ thống khỏi vị trí cân bằng). Nhờ vậy, vừa đạt được tác động nhanh, đồng thời hạn chế cường độ làm việc của máy lái, và suy giảm tốc độ tàu. Các thông số bộ điều khiển phụ thuộc tường minh vào thông số tàu và các thông số thiết kế, nhờ vậy dễ dàng thay đổi theo mong muốn của người vận hành. Độ lớn góc bẻ lái được kiểm soát bằng lý thuyết. Chất lượng hoạt động của hệ đề xuất được kiểm chứng thông qua mô phỏng. Ổn định toàn cục của hệ được chứng minh sử dụng lý thuyết Lyapunov. Kết quả cho thấy, bộ điều khiển đề xuất có thể áp dụng trong thực tế. ❖

Ngày nhận bài: 11/8/2019

Ngày phản biện: 20/8/2019

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Wen-Hsien Ho et al (2010). “Optimal course handling control for nonlinear ship maneuvering systems”. International Journal of Computing, Information and Control, vol 6, No 10, pp 4379-4388.
- [2]. L. Morawski, J Pomirski (1998). “Ship track-keeping: experiments with a physical tanker model”. Control Engineering Practice vol 6, pp.763-769.
- [3]. Wang Xian-zhou, Xu Han-zhen (2006). “Robust autopilot with wave filter for ship steering”. Journal of Marine Science and Application, vol 5, No 2, pp.24-29.
- [4]. R. Burns, R. Richer(1996). “A neural-network approach to the control of surface ships”. Control Engineering Practice vol 4, No 3, pp.411-416.
- [5]. Miroslaw Tomera (2010). “Nonlinear controller design of a ship autopilot”. Int.J.Appl. Math. Comput.Sci., vol 20, No.2, pp.271-280
- [6].J. van Amerogen et al (1990). “Rudder roll stabilization for Ships”. Automatica, vol 26, No 4, pp.679-690.
- [7]. J. van Amerogen (1984). “Adaptive steering of Ships – A model reference approach”. Automatica, vol 20, No 1, pp.1-14.
- [8]. J. van Amerogen (1980). “Criteria for optimum steering of ships”. Symposium on ship steering automatic control, 25-27 June, Genova, Italy.
- [9].C.G.Kallstrom et al (1979). “Adaptive autopilot for tankers”. Automatica, vol 15, pp. 241-254
- [10]. J. van Amerogen. H.R van Nauta Lemke (1978). “Optimum steering of ships with adaptive autopilot”. The 5th ship control systems Symposium, 30 october – 3 november, Annapolis, USA.
- [11]. Voitkunsky Y, Ed (1985). Ship theory handbook, Vol 1, Shipbuilding, Leningrad (tiếng Nga)
- [12]. Lukomsky Iu (1996). Marine control systems, Elmor, Leningrad. (tiếng Nga)
- [13]. Fossen T (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, Wiley.
- [14]. Kolesnirov A.A (1987). “Analytical construction of nonlinear aggregated regulators for a given set of invariants manifolds” (tiếng Nga), Electromechanica, Izv. VTU, Novocherkask, Part I, No.3, pp.100-109, Part II, No.5, pp58-66.
- [15]. Terekhov V.A et al (2002). Neural network control systems (tiếng Nga) – M.: IPRGR .
- [16]. K. Nomoto et al (1957). On the steering Qualities of Ships. Technical report, International Shbuilding Progress, Vol 4.
- [17]. T. Fossen and M. Paulsen (1992). Adaptive Feedback Linearization Applied to Steering of Ships, 1st IEEE Conference on Control Applications.