

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG NHẬN DẠNG PHI TUYẾN HỆ LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN C-EPS TRÊN XE Ô TÔ SỬ DỤNG MATLAB – SIMULINK

STUDY ON SIMULATION OF NONLINEAR IDENTIFICATION OF C-EPS ELECTRIC POWER STEERING SYSTEM FOR VEHICLES USING MATLAB – SIMULINK

Đào Quang Khanh, Hứa Xuân Long, Tống Lâm Tùng
Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT

Trong bài báo này, trình bày cơ sở lý thuyết của hệ thống lái trợ lực điện C-EPS, từ đó xây dựng mô hình phi tuyến của hệ. Trên cơ sở đó, xây dựng mô phỏng các thành phần của hệ thống và sử dụng công cụ Identification System của Matlab & Simulink để nhận dạng hệ phi tuyến C-EPS về hệ tuyến tính. Kết quả, các đặc tính đầu ra là mô-men trợ lực lái của hệ tuyến tính C-EPS nhận dạng được so sánh với hệ phi tuyến C-EPS cho thấy sự tương đồng giữa hệ tuyến tính và hệ phi tuyến đáp ứng được yêu cầu đặt ra trong suốt quá trình điều khiển. Ngoài ra, kết quả mô phỏng hệ thống cho thấy tính ưu việt của phương pháp nhận dạng hệ phi tuyến so với phương pháp tuyến tính hóa hệ thống, giúp cho việc tính toán điều khiển hệ thống lái trợ lực C-EPS được đơn giản và hiệu quả hơn.

Từ khóa: Hệ thống lái trợ lực điện C-EPS; Nhận dạng hệ thống; Công cụ nhận dạng trong Matlab.

ABSTRACT

This paper, the theoretical basis of the C-EPS electric power steering system is presented, from which a nonlinear model of the system is built. On that basis, build a simulation of the system's components and use the System Identification tool of Matlab & Simulink to identify the C-EPS nonlinear system and different linear systems. As a result, the output characteristics of the power steering torque of the identified C-EPS linear system are compared with the C-EPS nonlinear system, showing the similarity between the linear system and the nonlinear system to meet the requirements set during the control process. In addition, the system simulation results show the superiority of the nonlinear system identification method compared to the system linearization method, helping to simplify the calculation and control of the C-EPS power steering system and more effective.

Keywords: Electric power steering system on C-EPS steering column; Identification system in Matlab. 

1. TỔNG QUAN

Hệ thống lái có hai nhiệm vụ chính là: điều hướng cho xe ô tô theo quỹ đạo chuyển động như mong muốn của người lái, tạo cảm giác lái chân thực, dễ dàng cho người điều khiển xe ô tô. Hai nhiệm vụ đó trên được thực hiện bởi hệ thống lái, trong đó, hệ thống lái trợ lực điện trên trụ lái (C-EPS) có tính ưu việt, căn cứ vào vận tốc của xe, mô-men của vô lăng hệ thống bổ sung thêm mô-men lái cần thiết thông qua động cơ điện trợ lực lái, giúp xe ô tô chuyển hướng dễ dàng khi chỉ cần một lực quay vô lăng nhỏ, giúp người điều khiển xe di chuyển nhẹ nhàng. Hệ thống lái là một hệ phi tuyến phức tạp, có tải động, vì vậy để điều khiển hệ thống lái, chúng ta cần đơn giản hóa mô hình điều khiển.

Kết quả tổng hợp bộ điều khiển phụ thuộc rất nhiều vào mô hình mô tả của đối tượng. Người ta thường sử dụng hai phương pháp mô hình hóa đối tượng: phương pháp lý thuyết và phương pháp nhận dạng. Hệ thống lái trợ lực điện trên trụ lái C-EPS đã có nhiều nghiên cứu được công bố [4-7] được các tác giả tập trung vào xây dựng mô hình phi tuyến phức tạp. Trong bài báo này, đề xuất phương pháp nhận dạng phi tuyến hệ thống lái trợ lực điện C-EPS nhằm mục tiêu đơn giản hóa mô hình điều khiển và mô phỏng bằng công cụ Matlab & Simulink.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT HỆ THỐNG LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN

2.1. Cấu trúc hệ thống lái trợ lực điện

Trong Hình 1a mô tả cấu tạo vật lý của hệ thống lái. Các thành phần trong cấu trúc của hệ thống lái bao gồm: vô lăng, cột lái, thanh răng và cơ cấu bánh răng. Mô-men xoắn từ vô

lăng được đo bằng cảm biến mô-men gắn trên cột lái và kết nối với bộ điều khiển điện tử ECU. Mô-men xoắn hỗ trợ được sinh ra bởi động cơ PMSM trợ lực lái thông qua bánh răng, thanh răng với các giá trị mô-men xoắn hỗ trợ khác nhau tùy thuộc vào vận tốc của xe, nó cung cấp mô-men xoắn hỗ trợ cho người lái điều hướng của xe ô tô.

2.2. Mô hình toán các phần tử trong hệ thống lái trợ lực điện C-EPS

a. Động học của hệ thống lái trợ lực điện C-EPS

Động học của hệ thống lái trợ lực điện trên cột lái C-EPS (Hình 1b) được thể hiện như sau [6]:

- Động học của vô lăng và cột lái:

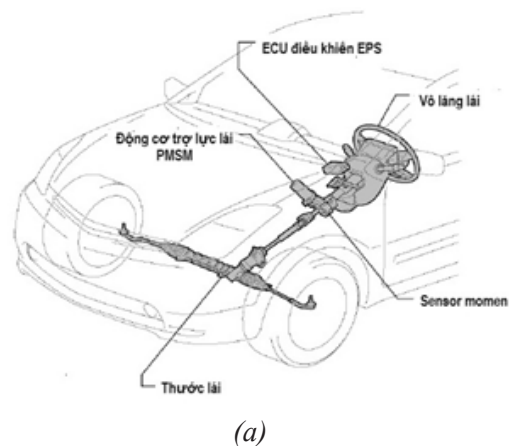
$$J_s \ddot{\theta}_s = T_d - K_s (\theta_s - \theta_r) - B_s \dot{\theta}_s \quad (1)$$

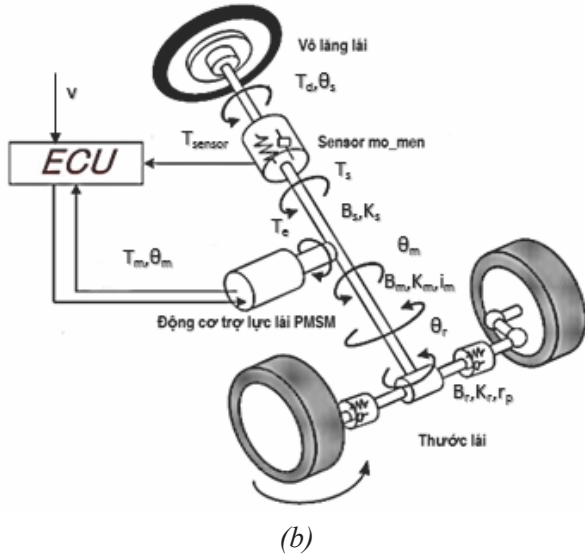
- Động học của hệ thống trợ lực lái:

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - K_m (\theta_s - i_m \theta_r) - B_m \dot{\theta}_m \quad (2)$$

- Động học của hệ thống thanh răng truyền lực lái:

$$m \ddot{x} = \frac{1}{r_p} [K_m (\theta_m - i_m \theta_r) i_m + K_s (\theta_s - \theta_r)] - B_r \dot{x} - K_r x \quad (3)$$





Hình 1. a – Cấu tạo hệ thống lái trợ lực điện C-EPS, b – Động học hệ thống lái trợ lực điện C-EPS

b. Tính toán mô-men đặt cho bộ điều khiển

Bộ điều khiển ECU có nhiệm vụ nhận tín hiệu mô-men xoắn từ vô lăng và vận tốc của xe ô tô. Hai tín hiệu đầu vào đó được đưa vào hàm thực hiện chức năng lựa chọn mô-men xoắn phù hợp [6].

$$T_M = \begin{cases} 0, & 0 \leq T_d \leq T_{d0} \\ \text{trq}(v), & T_{d0} \leq T_d \leq T_{dMax} \\ T_N & T_{dMax} \leq T_d \end{cases} \quad (4)$$

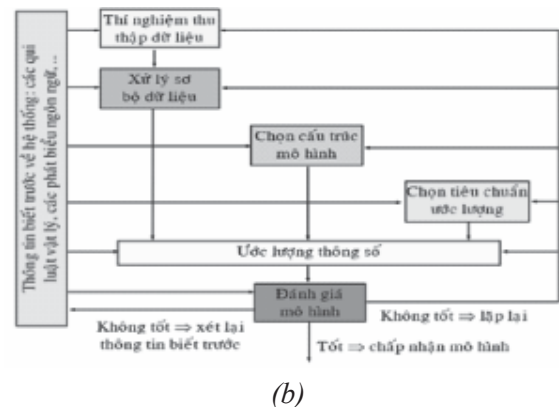
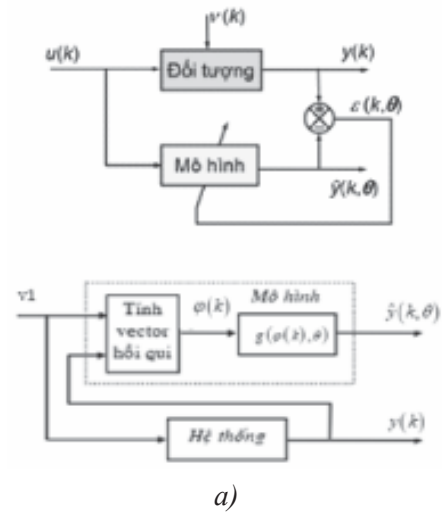
$$\text{trq}(v) = (4 - 0,0606 + 0,0003v^2)(T_d - T_{d0}) \quad (5)$$

Tùy vào vận tốc của xe ô tô, mô-men xoắn trợ lực được tính bằng (4), (5). Ngưỡng T_{d0} đặt ở mức 1Nm, nếu đầu vào từ vô lăng có mô-men xoắn nhỏ hơn ngưỡng này, mô-men trợ lực lái không được trợ lực lái và cho người lái cảm giác lái tốt hơn. Nếu mô-men xoắn từ vô lăng cao hơn ngưỡng tối đa T_{dMax} là 7Nm thì động cơ trợ lực lái sẽ cung cấp mô-men xoắn tối đa 24Nm.

3. CƠ SỞ NHẬN DẠNG HỆ THỐNG

3.1. Cấu trúc và các bước nhận dạng mô hình hệ thống

Nhận dạng hệ thống là phương pháp xây dựng mô hình toán của hệ thống dựa vào dữ liệu vào/ra quan sát được. Trong Hình 2 bao gồm $u(k)$ là tín hiệu vào, $y(k)$ là tín hiệu ra, $y(k, \theta)$ tín hiệu ra của mô hình nhận dạng, $v(k)$ tín hiệu nhiễu. Việc nhận dạng hệ thống bao gồm bốn bước: thí nghiệm thu thập số liệu, chọn cấu trúc mô hình, ước lượng các thông số và đánh giá mô hình. Hình 3 thể hiện quá trình nhận dạng dữ liệu [1].



Hình 2. a – Cấu trúc nhận dạng mô hình hệ thống, b – Các bước nhận dạng hệ thống

3.2. Ước lượng mô hình trong không gian trạng thái

Dự báo đáp ứng của hệ thống được mô tả trong Hình 2, bộ dự báo có dạng như sau:

$$\hat{y}(k, \theta) = \varphi(k, \theta) \theta \quad (6)$$

Phương trình (6) được gọi là bộ dự báo dạng hồi quy tuyến tính có cấu trúc như Hình 4, vì bộ dự báo tuyến tính theo tham số θ .

Hệ tuyến tính được mô tả bằng phương trình trạng thái [1], [2]:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) + v(k) \end{cases} \quad (7)$$

Cần ước lượng các ma trận A, B, C, D để mô tả được quan hệ giữa vào – ra của hệ thống. Vấn đề gây ra khó khăn ở đây là có vô số phương trình dạng (7) có thể mô tả được hệ thống tùy thuộc vào cách chọn biến trạng thái. Tuy nhiên, phương trình trạng thái (7) được rút ra từ mô hình vật lý thì các biến trạng thái hoàn toàn xác định. Giả sử trong thí nghiệm thu thập số liệu, ta không những đo được $y(k), u(k)$ mà còn đo được cả các biến trạng thái $x(k), k = 1, 2, \dots, N$. Do các biến trạng thái đã xác định nên phương trình (7) các ma trận A, B, C, D cũng đã xác định [1], [2]:

$$Y(k) = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

- Vector tham số: $\theta = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$, vector hồi

quy: $\varphi(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}$, vector nhiễu: $E(k) = \begin{bmatrix} w(k) \\ e(k) \end{bmatrix}$

3.3. Ước lượng tham số của mô hình

Nguyên tắc ước lượng tham số: giả sử chúng ta đã chọn được cấu trúc mô hình thích

hợp với hệ thống cần nhận dạng và đồng thời đã thu thập được N mẫu dữ liệu, đưa ra bộ dự báo $\hat{y}(k|\theta)$:

$$Z^N = \{u(1), y(1), \dots, u(N), y(N)\} \quad (9)$$

- Vấn đề đặt ra là xác định tham số θ_N dựa vào Z^N , chúng ta có thể tính được sai số dự báo:

$$\varepsilon(k, \theta) = y(k) - \hat{y}(k, \theta) \quad (10)$$

Ta cần xác định tham số θ_N sao cho sai số dự báo càng nhỏ càng tốt, có hai phương pháp xác định: một là, lọc sai số dự báo bằng bộ lọc tuyến tính $L(q)$, hai là sử dụng hàm đánh giá $V_N(\theta, Z^N)$ [1], [2].

- Phương pháp bình phương tối thiểu có bộ dự báo hồi quy tuyến tính có dạng:

$$\hat{y}(k, \theta) = \varphi^T(k) \theta + \mu(k) \quad (11)$$

Sai số dự báo là:

$$\varepsilon_F(k, \theta) = y(k) - \varphi^T(k) \theta - \mu(k) \quad (12)$$

Tiêu chuẩn bình phương tối thiểu:

$$v_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - \varphi^T(k) \theta - \mu(k)]^2 \quad (13)$$

Do V_N có dạng toàn phương nên chúng ta có thể tìm cực tiểu bằng cách cho đạo hàm bậc 1 theo tham số bằng 0 [1], [2]:

$$\Rightarrow \sum_{k=1}^N \varphi(k) [y(k) - \mu(k)] = \sum_{k=1}^N \varphi(k) [\varphi^T(k) \theta] \quad (14)$$

Suy ra, tham số ước lượng được xác định như sau:

$$\theta = \left[\sum_{k=1}^N \varphi(k) \varphi^T(k) \right]^{-1} \sum_{k=1}^N \varphi(k) [y(k) - \mu(k)] \quad (15)$$

4. NHẬN DẠNG HỆ THỐNG LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN C-EPS

Bộ công cụ nhận dạng (Identification Toolbox) của Matlab hỗ trợ đầy đủ các tiện ích để có thể dễ dàng giải bài toán nhận dạng mô hình [2]:

Một là, xử lý dữ liệu: Lọc nhiễu, phân đoạn dữ liệu, kết hợp dữ liệu từ nhiều thí nghiệm, lấy mẫu lại. Cấu trúc mô hình: Ident có thể nhận dạng mô hình không tham số và mô hình có tham số;

Hai là, ước lượng tham số: Các phương pháp ước lượng mô hình không tham số là phương pháp bình phương tối thiểu, phương pháp tương quan,... [2].

Giao diện của bộ công cụ System Identification thể hiện trên Hình 3. Giao diện này cho phép dễ dàng thực hiện các bước nhận dạng hệ thống như xử lý dữ liệu, ước lượng thông số, đánh giá mô hình [2].

Tùy vào vận tốc của xe ô tô, mô-men xoắn trợ lực được tính bằng (4), (5). Ngưỡng T_{d0} đặt ở mức 1Nm, nếu đầu vào từ vô lăng có mô-men xoắn nhỏ hơn ngưỡng này, mô-men trợ lực lái không được trợ lực lái và cho người lái cảm giác lái tốt hơn. Nếu mô-men xoắn từ vô lăng cao hơn ngưỡng tối đa T_{dMax} là 7Nm thì động cơ trợ lực lái sẽ cung cấp mô-men xoắn tối đa 24Nm.

Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp nhận dạng hệ phi tuyến thành hệ tuyến tính. Việc nhận dạng mô hình hệ C-EPS được tiến hành bằng việc thu thập dữ liệu vào/ra tác động vào mô hình là dạng hình sin với hệ C-EPS tín hiệu vào Input = Td, tín hiệu ra Output = Ts, với động cơ trợ lực PMSM tín hiệu vào Input =

Tm, tín hiệu ra Output = Te.

Khi cập nhật tập tín hiệu vào/ra vào giao diện Hình 3, ta tiến hành chọn cấu trúc của mô hình. Theo (1), (2), (3) của C-EPS và mô hình động cơ PMSM, nhóm tác giả lựa chọn cấu trúc mô hình nhận dạng của hai thành phần là mô hình không gian trạng thái tuyến tính có dạng:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (17)$$

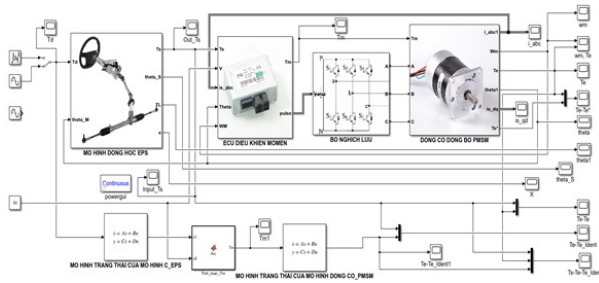


(a)



(b)

Hình 3. a – Giao diện nhận dạng hệ lái trợ lực C-EPS; b – Giao diện nhận dạng động cơ PMSM



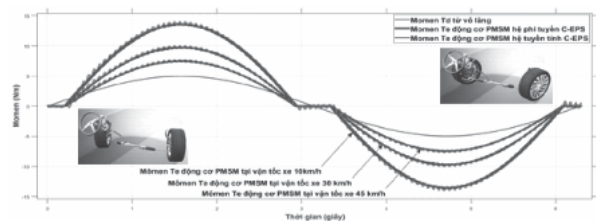
Hình 4. Mô hình mô phỏng và nhận dạng hệ thống lái trợ lực điện C-EPS

Việc ước lượng các tham số do Matlab thực hiện bằng phương pháp hồi quy như thể hiện trong Hình 2a, mô hình cần nhận dạng hệ C-EPS dạng phi tuyến như phương trình (1), (2), (3) nên chọn bậc của mô hình là bậc 3. Ta tiến hành chạy mô phỏng với các thông số từ Bảng 1, sơ đồ Simulink Hình 4 và thu thập dữ liệu, sử dụng giao diện công cụ nhận dạng Hình 3 tiến hành nhận dạng, ta thu được các ma trận

hệ thống trong mô hình không gian trạng thái của hệ C-EPS, với độ chính xác của mô hình đạt $B_{\text{bestfit}} = 97\%$.

$$A = \begin{bmatrix} -0,0003919 & -1,725 & 0,06243 \\ 1,723 & 0,03386 & 10,49 \\ 0,08449 & -8,967 & -9,593 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -11,05 \\ 9,242 \\ -63,7 \end{bmatrix} \quad C = [-0,8428 \quad 0,0173 \quad 0,001734] \quad D = [0] \quad (18)$$



Hình 5. Đặc tính mô-men hệ phi tuyến và tuyến tính của hệ thống lái trợ lực điện C-EPS

Bảng 1. Bảng thông số của hệ thống lái trợ lực điện C-EPS

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Công suất của động cơ	P_{dm}	[kW]	2,2	Mô-men quán tính vô lăng lái	J_s	[Kg.m ²]	0,0012
Tốc độ định mức động cơ	n_{dm}	[v/p]	1000	Hệ số ma sát của cột lái	B_s	[Nm/rad]	0,26
Điện áp định mức động cơ	U	[V]	13	Độ cứng cột lái	K_s	[Nm.rad ^{-1.s}]	115
Dòng điện của động cơ	I_{dm}	[A]	175	Góc lái của vô lăng lái	θ_s	[rad]	
Mô-men quán tính động cơ	J_m	[Kg.m ²]	0,00048	Góc lái trên cột lái	θ_r	[Rad]	
Hệ số ma sát	B_m	[Nm/rad]	0,0198	Mô-men đặt từ vô lăng	T_d	[Nm]	
Điện cảm phản ứng	L_{dq}	[mH]	150	Mô-men của động cơ	T_m	[Nm]	
Điện trở phản ứng	R_s	[Ω]	0,02	Tỷ số truyền của hộp giảm tốc	i_m		7,225

Số cực từ của Rotor động cơ	p		4	Góc quay của động cơ	θ_m	[Rad]	
Mô-men định mức	T_N	[Nm]	24	Hệ số ma sát trên thước lái	B_r	[Nm.s]	653,203
Độ cứng trục động cơ trợ lực	K_m	[Nm.rad ⁻¹]	125	Bán kính bánh răng thước lái	r_p	[m]	0,007783
Độ cứng của thước lái	K_r	[N/m]	91061,4	Trọng lượng của thước lái	m	[kg]	32

Với mô hình cần nhận dạng là động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM [3] dạng phi tuyến nên chọn bậc của mô hình là bậc 3. Chạy mô phỏng sơ đồ Simulink Hình 4 và thu thập dữ liệu, sử dụng giao diện công cụ nhận dạng Hình 3, ta thu được các ma trận hệ thống trong mô hình không gian trạng thái của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM với độ chính xác của mô hình đạt $B_{\text{bestfit}} = 97\%$.

$$A = \begin{bmatrix} -1.761 & -99.91 & -3.772 \\ 98.51 & 1.029 & -0.6899 \\ -2.099 & -0.5494 & -6.687 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 66.28 \\ -30.31 \\ 2.008 \end{bmatrix}$$

$$C = [-1.311 \quad 2.333 \quad -0.8302] \quad D = [0] \quad (19)$$

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sau khi nhận dạng lái trợ lực điện C-EPS dạng phi tuyến thành hệ lái trợ lực điện C-EPS dạng tuyến tính như trong Hình 4. Dữ liệu của động cơ PMSM và hệ thống lái trợ lực điện C-EPS (Bảng 1) được thay vào trong Hình 4 vận tốc của xe, mô-men lái từ vô lăng đặt cho hệ thống dạng sin tại các thời điểm như thể hiện trong Hình 5. Sơ đồ mô phỏng Hình 4 được chạy đồng thời trong môi trường Simulink tại thời điểm là 0 giây đến 6,3 giây với các giá trị vận tốc của xe khác nhau: 10km/h, 30km/h, 45km/h, mô-men lái dạng hình sin biên độ lớn nhất là $\pm 5\text{Nm}$, từ đó có kết quả so sánh mô-men trợ lực lái ứng với vận tốc xe khác nhau của hệ

phi tuyến và hệ tuyến tính (Hình 5). Kết quả mô phỏng trong Hình 8 với hệ lái trợ lực điện C-EPS hệ phi tuyến cho thấy, mô-men lái đặt ban đầu là hình sin với biên độ $\pm 5\text{Nm}$ với vận tốc xe nhỏ 10km/h thì mô-men trợ lực lái là lớn nhất 14Nm; với vận tốc xe lớn 45km/h thì mô-men trợ lực lái là nhỏ 7,5Nm. Mô-men trợ lực lái chỉ được hỗ trợ khi mô-men đặt từ vô lăng lớn hơn 1Nm. Kết quả mô phỏng hệ lái trợ lực điện C-EPS hệ tuyến tính cho thấy đặc tính đầu ra mô-men trợ lực lái bám sát với mô-men trợ lực lái của hệ C-EPS hệ phi tuyến tại các thời điểm và vận tốc của xe khác nhau.

6. KẾT LUẬN

Hệ thống lái trợ lực điện C-EPS hệ phi tuyến sử dụng trợ lực lái bằng động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu PMSM được nhận dạng gần đúng về hệ tuyến tính. Trong kết quả nghiên cứu cho thấy việc nhận dạng được tiến hành bằng công cụ Identification Toolbox cho ra được mô hình nhận dạng tuyến tính là các phương trình trạng thái với các ma trận thông số A, B, C, D, kết quả so sánh độ chính xác của mô hình tuyến tính và phi tuyến đạt $B_{\text{bestfit}} = 97\%$. Các đặc tính mô phỏng tại các thời điểm và vận tốc khác nhau của đồng thời hai hệ lái trợ lực điện C-EPS hệ tuyến tính và C-EPS phi tuyến cho thấy đặc tính đầu ra mô-men trợ lực lái C-EPS hệ tuyến tính bám sát với

mô-men trợ lực lái của hệ C-EPS hệ phi tuyến. Vấn đề nghiên cứu phương pháp nhận dạng hệ phi tuyến lái trợ lực điện C-EPS trên xe ô tô là hướng nghiên cứu mới cho việc giải các bài toán điều khiển hệ phi tuyến phức tạp trên xe ô tô.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT23-24.46.❖

Ngày nhận bài: **25/02/2024**

Ngày phản biện: **15/3/2024**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Phương Hà, Huỳnh Thái Hoàng (2005); *Lý thuyết điều khiển thông minh*, NXB. Đại học Quốc gia.
- [2]. Lennart Ljung (2015); *System Identification Toolbox user's guide – Matlab & Simulink*, The MathWorks, Inc.
- [3]. Đào Quang Khanh, Hứa Xuân Long, Tống Lâm Tùng (2024); *Nghiên cứu mô phỏng hệ thống lái trợ lực điện C-EPS cho xe ô tô sử dụng trợ lực điện bằng hệ biến tần SVPWM – động cơ điện đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu (PMSM) áp dụng phương pháp điều khiển PI -Fuzzy logic*, Tạp chí Giao thông Vận tải, Số 740, 4-2024.
- [4]. Vũ Văn Tuấn, Mai Đức Anh, Đặng Đình Huy, Đỗ Trọng Tú (2023); *Thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống lái trợ lực điện dạng C-EPS trên ô tô con*, Tạp chí Khoa học Công nghệ, Đại học Công nghiệp Hà Nội, tập 59 – số 4.
- [5]. Lê Văn Nghĩa, Đàm Hoàng Phúc (2021); *Nghiên cứu ứng dụng bộ điều khiển PID trong trợ lực lái điện trên ô tô*, Hội nghị Khoa học & Công nghệ Cơ khí – Động lực, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải.
- [6]. Raul-Octavian Nemes, Mircea Ruba, Claudia Martis (2018), *Integration of Real-Time Electric Power Steering System Matlab/Simulink Model into National Instruments VeriStand Environment*, Conference Paper, EPEPEMC, 2018.
- [7]. Bustanul Arifin, Bhakti Yudho Suprpto, (2022), *Steering control in electric power steering autonomous vehicle using Type-2 Fuzzy logic control and PI control*, World Electric Vehicle Journal.