

Phương pháp điều khiển bám tốc độ bền vững xe điện dựa trên dữ liệu

The data-driven robust tracking control method for electrical vehicle

> GS.TS LÊ HÙNG LÂN, PGS.TS NGUYỄN VĂN TIÊM*, THS MAI VẠN HẬU

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: nguyenvantiem@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Phương pháp điều khiển dựa trên dữ liệu, hay còn gọi là điều khiển phi mô hình, trực tiếp sử dụng dữ liệu vào/ra của đối tượng để thiết kế luật điều khiển. Do đó, chất lượng hệ thống điều khiển không phụ thuộc vào mô hình đối tượng. Bài báo đưa ra một kỹ thuật cải tiến mới cho tổng hợp luật điều khiển, tạo nên sự linh hoạt, dễ hiệu chỉnh các tham số cần thiết. Phương pháp điều khiển mới được áp dụng cho hệ thống điều khiển bám tốc độ của động cơ xe điện. Các kết quả mô phỏng xác nhận hiệu quả cao của phương pháp điều khiển này.

Từ khóa: Điều khiển dựa trên dữ liệu; điều khiển không phụ thuộc vào mô hình; bộ điều khiển PID thông minh; xe điện; điều khiển bám.

ABSTRACT

Data-driven control, also known as model-free control, directly uses the input/output data of the plant to design control laws. Therefore, the quality of the control system does not depend on the plant model. The paper presents a new improved technique for synthesizing control laws, creating flexibility and ease of adjusting the necessary parameters. A new control method is applied to the speed tracking control system of electric vehicle motors. Simulation results confirm the high efficiency of this control method.

Keywords: Data-driven control; model free control; intelligent PID controller; electrical vehicle; tracking control.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sản xuất xe điện (Electrical Vehicle - EV) phục vụ nhu cầu giao thông xanh đang là xu hướng phát triển mạnh mẽ trên thế giới và trong nước. Cùng với đó là sự cần thiết đẩy mạnh các nghiên cứu cải tiến, hoàn thiện các công nghệ liên quan, trong đó có các phương pháp điều khiển EV. Khi xe điện chuyển động, xe sẽ chịu các tác động của gió và tác động của điều kiện mặt đường khác nhau..., đó là nguyên nhân dẫn đến mô hình toán học của xe có tính phi tuyến với các tham số thay đổi [1]. Bản chất của bài toán điều khiển tốc độ của xe điện chính là bài toán điều khiển tốc độ của hệ truyền động động cơ điện [2, 3]. Các công trình đã công bố gần đây đã đưa ra các thuật toán điều khiển tốc độ xe điện với các mức độ đơn giản và phức tạp khác nhau, tất cả đều hướng tới việc điều khiển được tốc độ của xe theo giá trị đặt mong muốn, cao hơn nữa là tính toán đến tối ưu năng lượng tiêu thụ. Do tính đơn giản và hiệu quả của bộ điều khiển PID nên đa số các công trình đã công bố đều sử dụng bộ PID hoặc dạng biến thể của PID ở dạng PID phi tuyến. Công trình [1] đã đề xuất các bộ điều khiển PID kinh điển, bộ điều khiển phi tuyến dựa trên nền PID (NPID) và bộ PID thích nghi với mô hình mẫu là khâu dẫn tính bậc 1. Thông qua kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng điều khiển tốc độ xe của bộ điều khiển [1] là tốt, tuy nhiên việc ép mô hình mẫu là khâu bậc 1 và sử dụng mô hình tuyến tính của xe điện nên không phản ánh được tính phi tuyến của mô hình

EV. Bản chất là điều khiển thích nghi với đối tượng là tuyến tính áp đặt theo mô hình mẫu bậc 1. Trong [2] đưa ra phương án điều khiển bền vững tốc độ của xe bằng bộ điều khiển R-PID, tuy nhiên hạn chế của [2] là tham số k_p cho trước, tiếp sau đó là thực hiện phân miền tham số để tìm hai tham số còn lại đó là k_p và k_i nên còn hạn chế.

Gần đây, [3] đã đề xuất phương án điều khiển bền vững phi tuyến NR-PID bằng cách sử dụng bộ điều khiển R-PID cộng thêm một thành phần phi tuyến. Bộ điều khiển NR-PID trong [3] đã cho chất lượng điều khiển tốc độ EV cao hơn rất nhiều so với bộ điều khiển trong [2]. Công trình [4] đã thiết kế bộ điều khiển NPID có xét đến sự hài hòa giữa các chỉ tiêu điều khiển như thời gian quá độ, độ quá điều chỉnh cũng như sai số xác lập, nhưng chưa xem xét đến các tham số của EV thay đổi. Trong [5] đề xuất bộ điều khiển dự báo theo cấu trúc phi tuyến (NMPC) nhưng lại dựa trên mô hình tham số thay đổi tuyến tính. Sử dụng logic mờ với mô hình Takagi-Sugeno để thiết kế bộ điều khiển dự báo PI cho điều khiển tốc độ của EV đã được [6] đề cập, bộ điều khiển trong [6] đã xem xét đến tham số của xe thay đổi. Sự kết hợp giữa tính toán hệ số tỷ lệ lực phanh hãm tái sinh trên tổng lực phanh với bộ PI đã cho chất lượng điều khiển tốc độ xe tốt, nhưng thuật toán phức tạp. Phương pháp sử dụng chuẩn H_∞ để thiết kế các bộ điều khiển tốc độ cho xe điện được [7] và [8] đề cập. Công trình [7] kết hợp giữa chuẩn H_∞ và LMI để thiết kế bộ điều khiển dòng điện và bộ điều khiển điệp áp độc lập áp dụng cho hệ

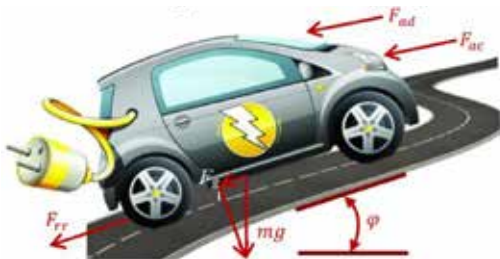
truyền động EV với động cơ điện PMSM. Trong khi đó, [8] áp dụng chuẩn H_∞ để thiết kế bộ điều khiển theo quan điểm giảm bậc thực hiện trên hệ truyền động động cơ PMSM với vòng điều khiển tốc độ và điều khiển mô-men.

Các bộ điều khiển trong [7, 8] cho đáp ứng điều khiển tốc độ EV tốt hơn so với phương án sử dụng bộ PID thông thường. Trong [9] đưa ra thiết kế bộ điều khiển tốc độ của xe mang tính tác động nhanh dựa trên logic mờ để áp dụng cho xe lai điện, mặc dù chất lượng điều khiển được nâng cao, tuy nhiên cấu trúc bộ điều khiển là phức tạp. Qua đó cho thấy để điều khiển được tốc độ của xe điện, có nhiều phương pháp khác nhau thiết kế bộ điều khiển khác nhau, phần lớn các công trình quan tâm đến việc thiết kế bộ điều khiển theo cấu trúc PID để điều khiển tốc độ của xe điện. Mô hình toán học của xe điện thuộc dạng phi tuyến phức tạp với nhiều yếu tố bất định. Do đó, khó có thể thiết kế bộ điều khiển PID thông dụng cho đối tượng này, mặt khác các bộ điều khiển theo dạng PID của các công trình đã công bố đa số chỉ dựa vào kinh nghiệm, sau đó thử nghiệm bằng mô phỏng. Trong [9], các tác giả đề xuất các giải pháp đánh giá ổn định bền vững hệ thống điều khiển kín sử dụng bộ điều khiển PID cho xe điện. Giải pháp thứ nhất dựa trên xấp xỉ mô hình phi tuyến xe điện bằng mô hình tuyến tính khoảng. Giải pháp thứ hai là xây dựng mô hình thay thế cho đối tượng phi tuyến, bất định sử dụng mô hình mờ Takagi-Sugeno, trên cơ sở đó đưa ra phương pháp đánh giá ổn định bền vững của bộ điều khiển PID được thiết kế. So sánh với thực tế, các nghiên cứu đã công bố cho thấy so với thực tế còn tồn tại hai bất cập cần giải quyết trong bài toán điều khiển tốc độ EV. Đó là, thứ nhất, chưa quan tâm đến khả năng bám tốc độ đặt thường thay đổi của hệ thống điều khiển tốc độ; thứ hai, tính bền vững của chất lượng bám của hệ thống điều khiển tốc độ chưa được đảm bảo, do phần lớn các nghiên cứu giả thiết làm việc với mô hình xe là tuyến tính không đổi quá trình điều khiển.

Gần đây, xuất hiện một cách tiệm cận mới trong thiết kế hệ thống điều khiển là dựa trên dữ liệu (data driven) hay còn gọi là điều khiển phi mô hình (model free control), trong đó bộ điều khiển được tổng hợp từ dữ liệu vào/ra của đối tượng mà không cần đến nhận dạng mô hình toán học đối tượng [10, 11]. Bộ điều khiển PID sử dụng trong cách tiệm cận này có tên là i-PID (PID thông minh) [12]. Một số kết quả nghiên cứu ban đầu [13-15] cho thấy triển vọng hứa hẹn của hướng nghiên cứu mới này. Do không sử dụng mô hình toán học cố định trong quá trình điều khiển, mà thay vào đó là dữ liệu vào/ra thực của đối tượng nên hệ thống điều khiển có khả năng bền vững cao. Trong bài báo này xây dựng phương án tổng hợp sử dụng bộ điều khiển thông minh i-PID phi mô hình dựa trên dữ liệu vào/ra của động cơ, đánh giá tính bám bền vững của hệ thống. Mô hình toán học của động cơ EV chỉ là công cụ tạo ra dữ liệu vào/ra để điều khiển và mô phỏng thử nghiệm.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA ĐỘNG CƠ EV VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID

Hình 1 là mô hình các lực tác động lên xe khi xe đang chuyển động [1-3].



Hình 1. Các lực tác động khi xe chuyển động

Các phương trình diễn tả quan hệ giữa động lực học của động cơ điện và động lực học của xe [1-3] như sau:

$$F = F_r + F_{ad} + F_x + F_{ac} = \mu_r mg \cos \varphi + \frac{1}{2} \rho AC_d v^2 + mg \sin \varphi + m \frac{dv}{dt},$$

$$T_L = F(r/G),$$

$$\begin{cases} J \frac{dn}{dt} = L_q i_a^2 - Bn - T_L \\ (L_s + L_f) \frac{di_a}{dt} = u_a - (R_s + R_f) i_a - L_q i_a n \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \left(\frac{1}{J + m \left(\frac{r}{G} \right)^2} \right) \times \left[\begin{aligned} &L_q i_a^2 - Bn - \frac{r}{G} \times \\ &\times \mu_r mg \cos \varphi + \frac{1}{2} \rho AC_d \left(\frac{r}{G} \right)^2 v^2 \\ &+ mg \sin \varphi \end{aligned} \right] \\ \frac{di_a}{dt} &= \left(\frac{1}{L_s + L_f} \right) [u_a - (R_s + R_f) i_a - L_q i_a n] \end{aligned} \right.$$

$$v = (r/G)n.$$

Với: T_L - Mô-men tải, F - Tổng lực tác động.

Để thấy, mô hình động lực học (2) có tính phi tuyến cao và chịu tác động của nhiều yếu tố như ảnh hưởng của gió, độ dốc mặt đường, tham số của xe bất định.

Các giá trị tham số EV được sử dụng trong bài báo này từ các công trình [1-3], [9] như Bảng 1.

Bảng 1. Tham số của xe điện

Tham số động cơ DC			Tham số xe		
Ký hiệu	Bình thường	Bất định	Ký hiệu	Bình thường	Bất định
$L_s - L_f$	6,008 [mH]	-5%	m	800 [kg]	+25%
$R_s - R_f$	0,12 [Ω]	+10%	A	1,8 [m ²]	-
L_{af}	1,766 [mH]	-	p	1,25 [kg/m ³]	-
i_a	78 [A] (max 250)	-	C_d	0,3	-10%
u_a	[0 ÷ 48] [V]	-	r	0,25 [m]	+10%
B	0,0002 [m ² /s]	-	u_{rr}	0,015	-
n	2.800 [vòng/phút] ($v = 25$ km/h)	-	G	11	+15%
J	0,05 [kg.m ²]	-	φ	0 [°]	-

Dựa trên khảo sát mô hình xe tại mỗi dải làm việc của điện áp đầu vào có thể coi là tuyến tính với dạng hàm truyền bậc hai [3, 9] ở dạng (3), được biểu diễn lại như ở Bảng 2.

Bảng 2. Nhận dạng các mô hình cục bộ của EV

u_a	$P(s)$	k	a_2	a_1	a_0
9,6V	$P_1(s)$	0,0243	1	0,5186	0,0402
19,2V	$P_2(s)$	0,0208	1	0,4666	0,0243
28,8V	$P_3(s)$	0,0171	1	0,4325	0,0190
38,4V	$P_4(s)$	0,0155	1	0,4211	0,0173
48V	$P_5(s)$	85,2441	1	1.639,4	97,6864

$$P(s) = \frac{b}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (3)$$

Trong đó:

$$b = \begin{bmatrix} \underline{b} & \bar{b} \end{bmatrix} = [0,0155 \quad 85,2441],$$

$$a_1 = \begin{bmatrix} \underline{a}_1 & \bar{a}_1 \end{bmatrix} = [0,4211 \quad 1639,4],$$

$$a_0 = \begin{bmatrix} \underline{a}_0 & \bar{a}_0 \end{bmatrix} = [0,0173 \quad 97,6864].$$

Giả sử trong hệ thống điều khiển kín sử dụng bộ điều khiển PID truyền thống:

$$u = k_p e + k_i \int e dt + k_d \dot{e} \quad (4)$$

để điều khiển lớp đối tượng (3).

3. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN EV SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN i-PID THÔNG MINH

Bộ điều khiển i-PID được tổng hợp trên cơ sở điều khiển phi mô hình, một kỹ thuật dựa trên dữ liệu (data-driven), sử dụng dữ liệu vào-ra của đối tượng để thiết kế bộ điều khiển. Nó sử dụng xấp xỉ tuyến tính trực tuyến đối tượng và bộ đánh giá để cập nhật xấp xỉ hóa trực tuyến [12].

Thông thường, mô hình siêu cục bộ có dạng bậc nhất [10-12]:

$$\dot{y} = f + \beta u \quad (5)$$

Trong đó, thành phần f bao gồm động học không mô hình hóa được và nhiễu, hệ số β tùy chọn.

Để đánh giá \hat{f} của thành phần f có thể sử dụng tích phân lặp theo thời gian [13]:

$$\hat{f} = \frac{-6}{T^3} \int_{t_0-T}^{t_0} [(T-2\tau)y(\tau) + \beta\tau(T-\tau)u(\tau)] d\tau \quad (6)$$

Trong đó: T - Cửa sổ thời gian của bộ lọc.

Ngoài phương pháp đánh giá tham số trực tuyến sử dụng tích phân lặp theo thời gian (6) trên còn có thể áp dụng một số phương pháp khác như đánh giá tham số dựa trên mô hình thích nghi hay dựa trên bộ quan sát thích nghi [10].

Luật điều khiển i-PID (PID thông minh) trong các công trình công bố khá linh hoạt, thường có dạng [10].

$$u = \frac{\dot{y}_d - \hat{f} - u_c}{\beta} \quad (7)$$

hoặc [11]:

$$u = \frac{\dot{y}_d - \hat{f} + u_c}{\beta} \quad (8)$$

hoặc [12, 14]:

$$u = \frac{\dot{y}_d - \hat{f}}{\beta} - u_c \quad (9)$$

Trong đó: u_c - Thành phần luật điều khiển PID kinh điển.

$$u_c = k_p e + k_i \int e dt + k_d \dot{e} \quad (10)$$

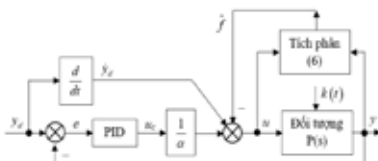
Trong bài báo này đề xuất sử dụng mô hình siêu cục bộ bậc nhất (5) cùng đánh giá (6) có hệ số $\beta = 1$, đồng thời xây dựng luật điều khiển thông minh có dạng sau:

$$u = \dot{y}_d - \hat{f} + \frac{u_c}{\alpha} \quad (11)$$

hay:

$$\dot{e} + \frac{1}{\alpha} (k_p e + k_i \int e dt + k_d \dot{e}) = \hat{f} - f \quad (12)$$

Rõ ràng, nếu có đánh giá \hat{f} tốt, có thể chọn các giá trị α , k_p , k_i , k_d phù hợp để về trái phương trình (12) ổn định tiệm cận về 0.

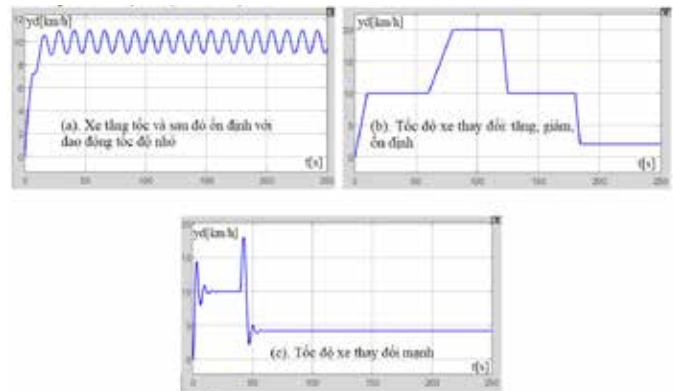


Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển EV phi mô hình

Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển EV như trên Hình 2. Đối tượng (3) được mô phỏng tạo ra các giá trị đầu vào $u(t)$ và $y(t)$ phục vụ điều khiển.

4. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ

Để làm rõ hiệu quả về chất lượng bám theo tín hiệu đặt của phương pháp đề ra, hệ thống điều khiển được mô phỏng với các dạng tín hiệu đặt sau: (a) xe tăng tốc và sau đó ổn định với dao động tốc độ nhỏ; (b) tốc độ xe thay đổi tăng, giảm, ổn định; (c) tốc độ xe thay đổi mạnh (Hình 3).



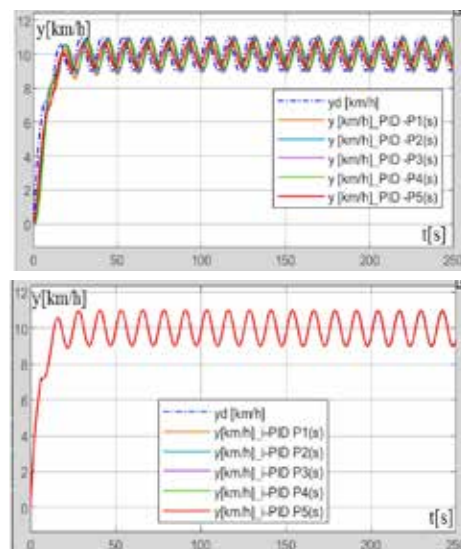
Hình 3. Các dạng tín hiệu cần bám

Để lượng hóa sai số bám của hệ thống, chỉ tiêu $MSE = \frac{1}{n} \sum e^2$ được sử dụng.

Đầu tiên, một bộ PID truyền thống được chọn với đối tượng P5 trong (3): $k_p = 10, 5$; $k_i = 0, 5$; $k_d = 0, 03$ [2]. Theo [2], bộ điều khiển này đảm bảo tính ổn định bền vững cho lớp đối tượng khoảng (3). Bộ PID này được sử dụng để đánh giá chất lượng bám và so sánh với phương án bộ điều khiển thông minh i-PID. Các tham số mô phỏng gồm: Thời gian trích mẫu $T_0 = 0,0001$ s; cửa sổ thời gian bộ lọc $T = 25$ s; $\beta = 1$, $\alpha = 0,0001$.

- Trường hợp 1: Tín hiệu đặt dạng (a) (Hình 3).

Kết quả mô phỏng trên Hình 4, thể hiện các đáp ứng điều khiển bám tốc độ của bộ điều khiển PID và bộ điều khiển i-PID. Chỉ tiêu sai lệch MSE như Bảng 3. Trên Hình 4 có thể thấy với i-PID các đường đặc tính bám gần như trùng với tín hiệu đặt, sai số giảm cỡ 10^4 lần so với PID.



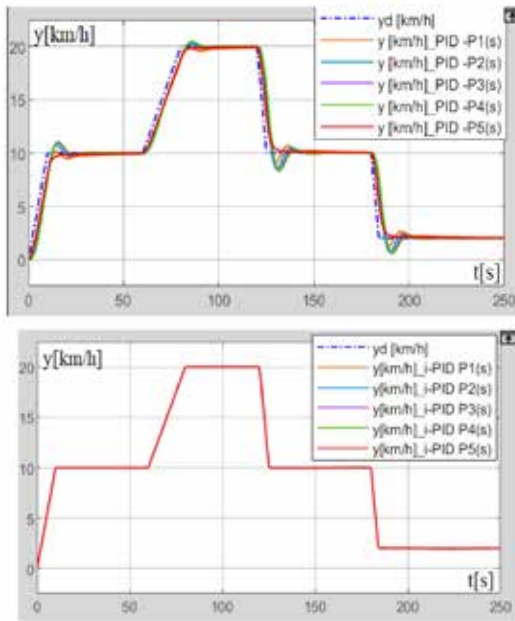
Hình 4. Đáp ứng tốc độ xe với bộ điều khiển PID và i-PID trường hợp 1

Bảng 3. Chỉ tiêu MSE trường hợp 1

P(s)	MSE	
	Bộ điều khiển PID	Bộ điều khiển i-PID
P ₁ (s)	0,0001115	2,715e-08
P ₂ (s)	0,0001289	2,184e-08
P ₃ (s)	0,000134	2,509e-08
P ₄ (s)	0,000133	2,795e-08
P ₅ (s)	3,198e-05	1,087e-08

- Trường hợp 2: Tín hiệu đặt dạng (b) (Hình 3).

Kết quả mô phỏng trên Hình 5, thể hiện các đáp ứng điều khiển bám tốc độ của bộ điều khiển PID và bộ điều khiển i-PID. Chỉ tiêu sai lệch MSE như Bảng 4.



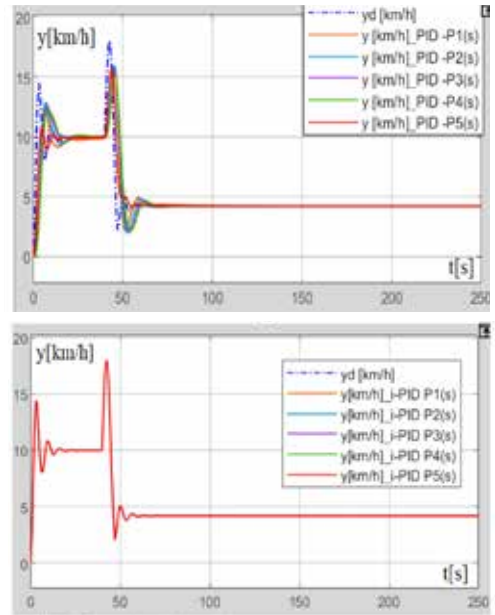
Hình 5. Đáp ứng tốc độ xe với bộ điều khiển PID và i-PID trường hợp 2
Bảng 4. Chỉ tiêu MSE trường hợp 2

P(s)	MSE	
	Bộ điều khiển PID	Bộ điều khiển i-PID
P ₁ (s)	0,0001024	1,514e-08
P ₂ (s)	0,0001094	1,458e-08
P ₃ (s)	0,0001309	1,785e-08
P ₄ (s)	0,000144	2,039e-08
P ₅ (s)	5,142e-05	1,108e-08

Tương tự trường hợp 1, trên Hình 5 có thể thấy với i-PID các đường đặc tính bám gần như trùng với tín hiệu đặt, sai số giảm cỡ 10⁴ lần so với PID.

- Trường hợp 3: Tín hiệu đặt dạng (c) (Hình 3).

Kết quả mô phỏng các đáp ứng điều khiển tốc độ của bộ điều khiển PID và bộ điều khiển i-PID thể hiện trên Hình 6. Chỉ tiêu sai lệch MSE như Bảng 5.



Hình 6. Đáp ứng tốc độ xe với bộ điều khiển PID và i-PID trường hợp 3
Bảng 5. Chỉ tiêu MSE trường hợp 3

P(s)	MSE	
	Bộ điều khiển PID	Bộ điều khiển i-PID
P ₁ (s)	0,0002793	3,233e-09
P ₂ (s)	0,0003056	2,835e-09
P ₃ (s)	0,0003239	3,219e-09
P ₄ (s)	0,0003314	3,495e-09
P ₅ (s)	0,0001013	6,734e-10

Các đồ thị và giá trị MSE rất nhỏ cho thấy dù tín hiệu đặt thay đổi gấp, đáp ứng của hệ thống vẫn bám tốt với sai số nhỏ.

- Trường hợp 4: Tín hiệu đặt dạng (b) (Hình 3) và có bổ sung nhiễu đều ra $k(t) = \sin(0,5t)$.

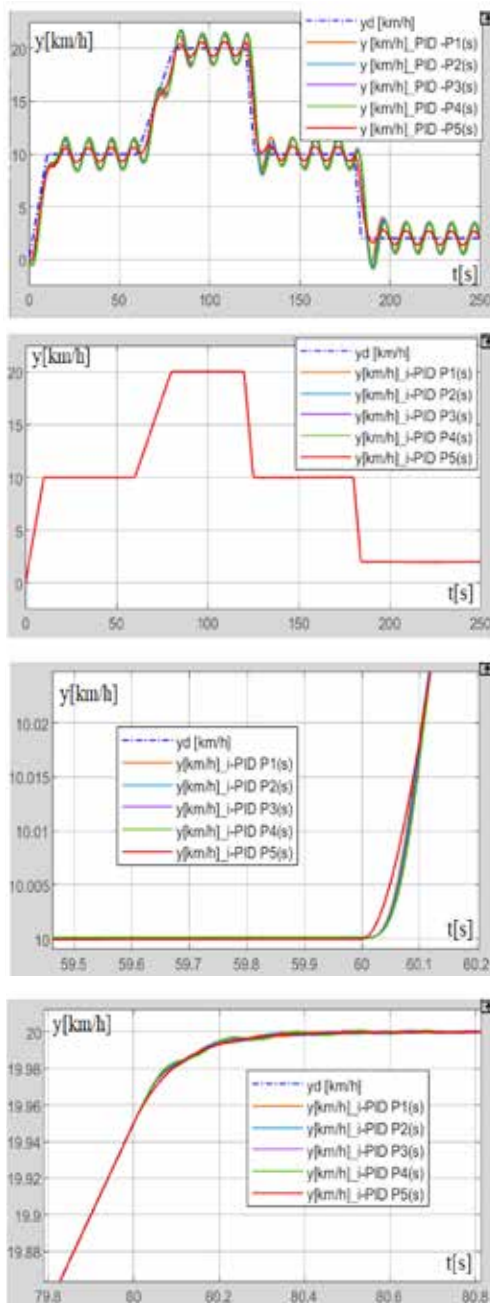
Kết quả mô phỏng các đáp ứng điều khiển tốc độ của bộ điều khiển PID và bộ điều khiển i-PID như Hình 7. Chỉ tiêu sai lệch MSE như Bảng 6.

Bảng 6. Chỉ tiêu MSE trường hợp 4.

P(s)	MSE	
	Bộ điều khiển PID	Bộ điều khiển i-PID
P ₁ (s)	0,0002154	1,148e-08
P ₂ (s)	0,0002443	1,337e-08
P ₃ (s)	0,0002672	1,679e-08
P ₄ (s)	0,0002757	2,077e-08
P ₅ (s)	7,729e-05	9,333e-09

Các kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển tốc độ của EV cho thấy dù có nhiễu, bộ i-PID vẫn có chất lượng bám tốt, sai số rất nhỏ.

Đánh giá chung, kết quả mô phỏng các trường hợp trên cho thấy bộ điều khiển i-PID (12) được thiết kế tạo ra chất lượng bám theo tín hiệu đặt của hệ thống điều khiển tốc độ xe là rất tốt, hơn hẳn khi sử dụng bộ PID thông thường: Sai số bám nhỏ, bền vững với sự thay đổi của các dạng tín hiệu đặt, của mô hình đối tượng hay khi có nhiễu.



Hình 7. Đáp ứng tốc độ xe với bộ điều khiển PID và i-PID trường hợp 4

5. KẾT LUẬN

Cách tiếp cận điều khiển dựa trên dữ liệu là hướng đi mới, cho phép trực tiếp sử dụng dữ liệu vào/ra, không phụ thuộc vào mô hình toán học, của đối tượng để thiết kế luật điều khiển. Do đó, chất lượng điều khiển có tính bền vững trước các bất định có thể xảy ra. Bài báo đưa ra một kỹ thuật cải tiến trong phương pháp thiết kế điều khiển tổng hợp bộ i-PID thông minh, trong đó tạo ra sự độc lập giữa hệ số β của mô hình siêu cục bộ và hệ số α hiệu chỉnh thành phần tín hiệu tham gia điều khiển từ bộ điều khiển phản hồi PID, từ đó dễ dàng xác định được các giá trị tham số phù hợp. Các kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển tốc độ EV sử dụng bộ i-PID thiết kế cho thấy hiệu quả cao trong chất lượng bám tín hiệu đặt. Có sai số bám rất nhỏ và bền vững trước bất định về mô hình đối tượng, thay đổi tín hiệu đặt hay có nhiễu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Shamseldin M.A (2023), Design of Auto-Tuning Nonlinear PID Tracking Speed Control for Electric Vehicle with Uncertainty Consideration, *World Electric Vehicle Journal*, 14, 78. <https://doi.org/10.3390/wevj14040078>.
- [2]. Hải NV (2024), Điều khiển tốc độ xe điện trên cơ sở bộ điều khiển bền vững PID, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, tập 75, số 08, 2154-2166. <https://doi.org/10.47869/tcsj.75.8.1>.
- [3]. Tiêm NV, Hải NV (2025), Thiết kế bộ điều khiển phi tuyến cho điều khiển tốc độ xe điện, *Tạp chí Giao thông vận tải*, tập 65, số 1+2, 96-101, e-ISSN 2615-9791.
- [4]. Shamseldin M.A, Ghany M.A, Hossamel-din Y.H (2021), Optimal Nonlinear PID Speed Control Based on Harmony Search for An Electric Vehicle, *Future Engineering Journal*, 2, pp.2314-7237. <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/fej/vol2/iss1/4>.
- [5]. Vafamand N, Arefi M.M, Khooban M.H, Dragicevic T, Blaabjerg F (2019), Nonlinear Model Predictive Speed Control of Electric Vehicles Represented by Linear Parameter Varying Models with Bias terms, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7, pp.2081-2089. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2884346>.
- [6]. Khooban M.H, Vafamand N, Niknam T (2016), T-S fuzzy model predictive speed control of electrical vehicles, *ISA Transactions*, 64, pp.231-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2016.04.019>.
- [7]. Oudjama F, Boumediene A, Saidi K, Boubekeur D (2023), Robust Speed Control in Nonlinear Electric Vehicles Using H-Infinity Control and the LMI Approach, *Journal of Intelligent Systems and Control*, 2, pp.170-182. <https://doi.org/10.56578/jisc020305>.
- [8]. Pourseif T, Mohajeri M (2020), Design of robust control for a motor in electric vehicles, *IET Electrical Systems in Transportation*, 10, pp.68-74. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2018.5084>.
- [9]. Tiêm NV, Lân LH (2024), Thiết kế bộ điều khiển tốc độ bền vững cho xe lai điện trên cơ sở logic mờ, *Tuyển tập báo cáo Hội nghị VCCA 2024*, tr.640-645.
- [10]. Fliess M, Join C (2013), Model Free Control, *International Journal of Control*, vol.86, no.12, pp. 2228-2252.
- [11]. Radu-Emil Precup, Rau-Cristian Roman, Ali Safaei (2022), Data-Driven Model-Free Controllers, CRC Press.
- [12]. Fliess M, Join C (2008), Intelligent PID controllers, In 2008 16th Mediterranean conference on control and automation, vol.44. pp.326-331, IEEE.
- [13]. Fliess M, Sira-Ramírez H (2003), An algebraic framework for linear identification, *ESAIM. Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 9, pp.151-168.
- [14]. Polack P, Delprat S, Andrea-Novel B. (2019), Brake and velocity model-free control on an actual vehicle, *Control Engineering Practice* 92.
- [15]. Laid S, Boubekeur B (2020), Model-free and Adaptive Control of a DC Motor: A Comparative Study, *International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. doi: 10.1109/ICEE49691.2020.9249886.