

Tổng hợp hệ thống điều khiển truyền động điện với một số luật tiếp cận mặt trượt ứng dụng điều khiển chuyển động Quadcopter

Lê Khánh Thành, Vũ Quốc Huy*

Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: maihuyvu@gmail.com

Nhận bài: 04/9/2024; Hoàn thiện: 12/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.27-34>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu khảo sát tính ổn định của hệ thống điều khiển cấu trúc biến đổi hoạt động trong chế độ trượt bằng tiêu chuẩn Lyapunov với tốc độ tiếp cận mặt trượt khác nhau. Kết quả nghiên cứu mới cho phép lượng hóa tham số mặt trượt nhờ thời gian xác lập và sai số mong muốn của hệ thống. Bài báo cũng đề xuất phương pháp tổng hợp bộ điều khiển cấu trúc biến đổi bằng cách sử dụng luật tiếp cận mặt trượt tổng quát và cụ thể hóa một số dẫn xuất của luật tiếp cận mặt trượt tổng quát. Một số mô phỏng điều khiển giả định một kênh chuyển động của Quadcopter thực hiện trên Matlab minh chứng cho kết quả nghiên cứu đề xuất.

Từ khoá: Điều khiển cấu trúc biến đổi; Ổn định Lyapunov; Luật tiếp cận mặt trượt; UAV quadcopter.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trải qua nhiều thập kỷ, điều khiển cấu trúc biến đổi (VSC) và điều khiển chế độ trượt (SMC) đã được cộng đồng học thuật quan tâm nghiên cứu và làm sâu sắc thêm [1-3]. SMC hiện đang được ứng dụng như một giải pháp thiết kế chung cho rất nhiều hệ thống điều khiển như hệ tuyến tính, hệ phi tuyến; các hệ thống có nhiều đầu vào đầu ra (MIMO), hệ rời rạc, hệ ngẫu nhiên [2]. Đối với Quadcopter, đã có nhiều công trình nghiên cứu, trong đó các học giả đã phát triển ứng dụng kỹ thuật điều khiển mờ [7], điều khiển tuyến tính hóa phản hồi [8], điều khiển dựa trên hàm Lyapunov [9], và điều khiển trượt [10]. Quadcopter có tham số biến đổi trong mô hình động lực học, chịu tác động của gió và tải trọng mang. Trong điều kiện chịu tác động của nhiễu và sự thay đổi tham số, kỹ thuật điều khiển trượt là một giải pháp mang lại tính bền vững cho hệ thống. Hiện nay, cách tiếp cận tổng hợp hệ thống VSC dựa trên chế độ trượt thường được bắt đầu bằng khâu thiết kế mặt trượt S . Sau đó, một dạng hàm Lyapunov [4] được sử dụng để đảm bảo tính ổn định tiệm cận cho hệ thống, từ đó hình thành luật điều khiển tương ứng. Đối với hệ tuyến tính, do có mô hình danh định tường minh, người thiết kế có thể tách tín hiệu điều khiển thành 2 thành phần độc lập: thành phần điều khiển tương đương và thành phần điều khiển bền vững. Tuy nhiên, đối với hệ phi tuyến nói chung, các thành phần tương đương và bền vững thường lẫn vào nhau. Giải pháp tổng hợp luật điều khiển trong trường hợp này là lựa chọn tốc độ hội tụ \dot{S} có dạng hàm số nào đó, ví dụ luật Gaos [1], luật lũy thừa, luật tiếp cận hàm mũ [3]. Và đây thường được gọi chung là luật tiếp cận mặt trượt. Nghiên cứu các luật tiếp cận mặt trượt, nhóm tác giả nhận thấy rằng chúng có một quy luật chung, hoàn toàn có thể biểu diễn chúng dưới dạng một hàm giải tích toán học tổng quát. Tiếp theo, nếu lựa chọn một hệ tự trị mong muốn làm mặt trượt thì cần thiết lượng hóa được tham số của nó. Trong thực tế, hệ thống chỉ cần đảm bảo ổn định trong một miền sai số nhất định, giới hạn ở một vô cùng bé nào đó. Do vậy, đối với một hệ thống cụ thể, ta hoàn toàn có thể lượng hóa được tham số mặt trượt, từ đó giảm bớt siêu tham số trong luật điều khiển.

2. CHẾ ĐỘ TRƯỢT CỦA MỘT HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN

Xét hệ thống điều khiển bám với phương trình đặc tính cơ được mô tả như (1).

$$J\ddot{\theta}(t) = -f(\theta, \dot{\theta}, t) + bu(t) \quad (1)$$

Với θ là góc thực; $f(\theta, \dot{\theta}, t) = a\dot{\theta}$ là thành phần phụ thuộc tốc độ góc với hệ số ma sát nhớt a ; u là tín hiệu điều khiển; b là ma trận điều khiển; J là mô men quán tính của hệ thống.

Gọi θ_d là góc đặt. Sai lệch góc và đạo hàm của sai lệch góc là:

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta(t); \quad \dot{e}(t) = \dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t) \quad (2)$$

Biểu diễn lại (1) dưới dạng phương trình của sai lệch góc bằng cách thay (2) vào (1):

$$J(\ddot{\theta}_d - \ddot{e}) = -a(\dot{\theta}_d - \dot{e}) + bu \quad (3)$$

$$J\ddot{e} + a\dot{e} + bu - (J\ddot{\theta}_d + a\dot{\theta}_d) = 0 \quad (4)$$

Đặt: $x_1 = e(t); x_2 = \dot{e}(t)$ (5)

Hệ thống (4), (5) được viết dưới dạng phương trình trạng thái (6):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{a}{J}x_2 - \frac{b}{J}u + \left(\ddot{\theta}_d + \frac{a}{J}\dot{\theta}_d\right) \end{cases} \quad (6)$$

Thiết kế mặt trượt $S = 0$ với hàm trượt tuyến tính: $S = x_1 + \lambda x_2$ (7)

Định lý 1: Điều kiện để một hệ thống điều khiển cấu trúc biến đổi hoạt động trong chế độ trượt trên mặt trượt $S = x_1 + \lambda x_2 = 0$, từ trạng thái ban đầu $x_{1s}|_{t=0} = x_{1s}(0)$ hội tụ về trạng thái xác lập vô cùng bé $x_{1s}|_{t=T_s} = x_{1s}(T_s)$ là tham số λ của mặt trượt $S = 0$ phải thỏa mãn điều kiện Hurwitz và $\lambda = \frac{-T_s}{\ln\left|\frac{x_{1s}(T_s)}{x_{1s}(0)}\right|}$.

Chứng minh:

a) Chứng minh điều kiện Hurwitz: Khi hệ thống hoạt động trong chế độ trượt, trạng thái của hệ thống sẽ hoàn toàn nằm trên mặt trượt $S = 0$.

$$S = x_1 + \lambda x_2 = 0 \Leftrightarrow x_1 = -\lambda x_2 \Leftrightarrow \dot{x}_1 = -\lambda \dot{x}_1 \quad (8)$$

$$\ln|x_1| = -\frac{1}{\lambda}t + C \quad (9)$$

Sử dụng điều kiện đầu $x_{1s}|_{t=0} = x_{1s}(0)$ ta có: $C = \ln|x_{1s}(0)|$

Từ đó nhận được: $\ln|x_1| = -\frac{1}{\lambda}t + \ln|x_{1s}(0)| \rightarrow x_1 = x_{1s}(0)e^{-\frac{1}{\lambda}t}$

Kết quả giải tích cho thấy x_1 là hàm đơn điệu và điều kiện để $x_1 \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ là $\lambda > 0$, do đó để hệ thống hội tụ về trạng thái xác lập vô cùng bé thì λ phải thỏa mãn điều kiện Hurwitz.

b) Xác định giá trị của λ : Ở thời điểm xác lập $t = T_s$ ta có:

$$|x_{1s}|_{t=T_s} = |x_{1s}(T_s)| \quad (10)$$

Từ đó nhận được phương trình (11):

$$|x_{1s}(0)|e^{-\frac{1}{\lambda}T_s} = |x_{1s}(T_s)| \Rightarrow \lambda = \frac{-T_s}{\ln\left|\frac{x_{1s}(T_s)}{x_{1s}(0)}\right|} \quad (11)$$

Vì $\lambda > 0$ nên công thức (11) cũng cho thấy $|x_{1s}(T_s)| < |x_{1s}(0)|$ để có $\ln\left|\frac{x_{1s}(T_s)}{x_{1s}(0)}\right| < 0$.

Ta có điều phải chứng minh ■

Như vậy, nếu tổng hợp được bộ điều khiển cấu trúc biến đổi để hệ thống có cấu trúc giảm bậc và trở thành một hệ tự trị thì trạng thái của hệ thống luôn nằm trên mặt trượt $S = 0$. Với việc chọn $\lambda > 0$ phù hợp theo (11), trạng thái của hệ thống luôn hội tụ về một vô cùng bé, có nghĩa hệ (1) và (2) có sai lệch bám $e(t) \rightarrow 0$.

Định lý 2 (Về luật tiếp cận mặt trượt tổng quát):

Họ các luật tiếp cận mặt trượt (12) và mặt trượt $S = x_1 + \lambda x_2 = 0$, $\lambda > 0$ đảm bảo cho hệ (6) hoạt động trong chế độ trượt và hội tụ về 0 với luật điều khiển (13)

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - y; \quad \varepsilon > 0 \quad (12)$$

$y = f_s(S)$ là hàm lẻ, liên tục và cùng dấu với đối số của nó.

$$u = \frac{1}{b\lambda} [(J - \lambda a)x_2 + \varepsilon J \operatorname{sgn}(S) + Jy + (J\lambda\ddot{\theta}_d + a\lambda\dot{\theta}_d)] \quad (13)$$

Chứng minh:

a) Chứng minh tồn tại chế độ trượt và sự hội tụ về 0:

Chọn một hàm Lyapunov có dạng $V = 0,5S^2$ và lấy đạo hàm của nó:

$$\dot{V} = S\dot{S} \quad (14)$$

Sau đây, ta sẽ tìm điều kiện để $\dot{V} < 0$. Như vậy, ta sẽ phải xem xét đến động học của mặt trượt S , hay nói cách khác tốc độ hội tụ của mặt trượt.

$$\text{Thay } \dot{S} \text{ từ (12) vào (14):} \quad \dot{V} = -\varepsilon S \operatorname{sgn}(S) - Sy \quad (15)$$

Vì $y = f(S)$ là hàm lẻ và cùng dấu với đối số S nên:

$$y = \begin{cases} f_s(S) = 0 & \text{khi } S = 0 \\ Sf_s(S) > 0 & \text{khi } S \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

Kết hợp (15) và (16) cho thấy $\dot{V} \leq 0 \forall S$ và \dot{V} là hàm bán xác định âm. Do vậy, V chưa phải là một hàm Lyapunov thực sự. Từ (15), xét đạo hàm cấp 2 của V theo thời gian:

$$\dot{V} = -\varepsilon|S| - Sy \Rightarrow \ddot{V} = -\varepsilon|\dot{S}| - \dot{S}y - \frac{\partial y}{\partial S} S\dot{S} \quad (17)$$

Từ (17) thấy rằng \ddot{V} là một hàm số phụ thuộc vào chỉ một đối số S , có nghĩa $\ddot{V} = g_s(S)$.

Do $\dot{V} \leq 0 \forall S$ nên V bị chặn, vì thế S bị chặn. Do S bị chặn nên từ (17) nhận được \ddot{V} bị chặn, từ đó khẳng định được \dot{V} là hàm liên tục đều.

Theo bổ đề Barbalat $\dot{V} = -\varepsilon|S| - Sy \rightarrow 0$, kéo theo $S \rightarrow 0$. Như vậy, chế độ trượt tồn tại.

Khi hệ (6) hoạt động trong chế độ trượt nó sẽ trở thành một hệ giảm bậc có phương trình trạng thái chính là phương trình của mặt trượt được thiết kế: $S = x_1 + \lambda x_2 = 0$

Đặt $x_{1|t=0} = x_1(0)$ là trạng thái ban đầu của hệ thống. Giải phương trình $S = 0$ nhận được:

$$x_1 = x_1(0)e^{-\frac{1}{\lambda}t}; \quad x_2 = -\frac{x_1(0)}{\lambda}e^{-\frac{1}{\lambda}t} \quad (18)$$

Công thức (18) cho thấy $x_1, x_2 \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$, có nghĩa trạng thái của hệ thống hội tụ về 0.

b) Chứng minh luật điều khiển:

Lấy đạo hàm bậc nhất hàm trượt và kết hợp với phương trình trạng thái (6):

$$\dot{S} = \dot{x}_1 + \lambda\dot{x}_2 = \left(1 - \frac{\lambda a}{J}\right)x_2 - \frac{\lambda b}{J}u + \left(\lambda\ddot{\theta}_d + \frac{\lambda a}{J}\dot{\theta}_d\right) \quad (19)$$

Kết hợp (19) với (12) nhận được luật điều khiển có dạng (13) như phát biểu định lý:

$$u = \frac{1}{b\lambda} [(J - \lambda a)x_2 + \varepsilon J \operatorname{sgn}(S) + Jy + (J\lambda\ddot{\theta}_d + a\lambda\dot{\theta}_d)]$$

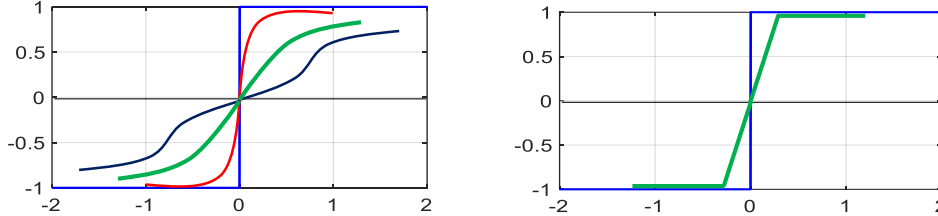
Ta có điều phải chứng minh ■

Nhận xét:

a) Định lý 2 giả thiết rằng $y = f_s(S)$ là một hàm lẻ, có giá trị cùng dấu với đối số S của nó. Như vậy, trên mặt phẳng tọa độ OSy , đồ thị hàm số $y = f_s(S)$ đối xứng qua gốc tọa độ và nằm trong

góc $\frac{1}{4}$ thứ nhất và góc $\frac{1}{4}$ thứ ba. Hình dáng đồ thị của $y = f_s(S)$ là dạng tổng quát hóa của đồ thị các hàm dấu $\text{sgn}(S)$, hàm bão hòa $\text{sat}(S)$ hay hàm tích phân bão hòa $\text{satPI}(S)$.

b) Biểu diễn toán học (12) đại diện cho một họ các luật tiếp cận mặt trượt được thể hiện trực quan trên hình 1 (bên trái). Trong từng thiết kế cụ thể, người tổng hợp hệ thống sẽ có những lựa chọn luật tiếp cận mặt trượt khác nhau với ý nghĩa vật lý khác nhau.



Hình 1. Biểu diễn đồ thị của các hàm số $y = f_s(S)$, $\text{sgn}(S)$ và $\text{sat}(S)$.

3. TỔNG HỢP LUẬT ĐIỀU KHIỂN VỚI MỘT SỐ LUẬT TIẾP CẬN MẶT TRƯỢT

3.1. Luật tiếp cận mặt trượt với tốc độ không đổi

Luật tiếp cận mặt trượt với tốc độ không đổi (20) là luật tiếp cận mặt trượt cơ bản và thường được sử dụng để minh họa nguyên lý điều khiển trượt. Luật tiếp cận này sử dụng hàm dấu $\text{sgn}(S)$ để tạo tín hiệu điều khiển chuyển mạch. Ưu điểm của luật này là sự đơn giản. Song nếu ε quá nhỏ thì thời gian tiếp cận mặt trượt sẽ rất lâu; còn khi ε quá lớn sẽ gây ra hiện tượng chattering. Để hạn chế chattering, một số nghiên cứu đã thay thế hàm dấu bởi hàm bão hòa, hàm tích phân bão hòa hay hàm bão hòa mờ, hoặc điều chỉnh thích nghi tham số ε [11].

$$\dot{S} = -\varepsilon \text{sgn}(S), \varepsilon > 0 \quad (20)$$

Chọn một hàm Lyapunov $V = 0,5S^2$ và lấy đạo hàm của V theo thời gian:

$$\dot{V} = S\dot{S} \quad (21)$$

Thay (20) vào (21) nhận được:

$$\dot{V} = -\varepsilon S \text{sgn}(S) = -\varepsilon |S| \leq 0 \quad (22)$$

Điều kiện (22) cho thấy \dot{V} là một hàm bán xác định âm nên chưa đảm bảo V là một hàm Lyapunov thực sự để khẳng định hệ thống ổn định tiệm cận.

Xét đạo hàm cấp hai của V theo thời gian:

$$\ddot{V} = -\varepsilon |\dot{S}| = -\varepsilon^2 |\text{sgn}(S)| = \{\pm \varepsilon^2, 0\} \quad (23)$$

Công thức (23) cho thấy \ddot{V} bị chặn nên \dot{V} là hàm liên tục đều. Bổ đề Barbalat đảm bảo $\dot{V} \rightarrow 0$, kéo theo $S \rightarrow 0$. Như vậy, khi hệ thống nằm trên mặt trượt thì trạng thái của hệ $e(t), \dot{e}(t) \rightarrow 0$.

Để tổng hợp luật điều khiển, từ (7) ta có:

$$\dot{S} = \left(1 - \frac{\lambda a}{J}\right) x_2 - \frac{\lambda b}{J} u + \left(\lambda \ddot{\theta}_d + \frac{\lambda a}{J} \dot{\theta}_d\right) \quad (24)$$

Kết hợp (20) với (24), từ đó luật điều khiển (25) tổng hợp được là:

$$u = \frac{1}{b\lambda} \left[(J - \lambda a)x_2 + \varepsilon J \text{sgn}(S) + (J\lambda \ddot{\theta}_d + a\lambda \dot{\theta}_d) \right] \quad (25)$$

3.2. Luật tiếp cận mặt trượt hàm mũ

Luật tiếp cận mặt trượt hàm mũ được sử dụng trong nghiên cứu [12]. Bản chất của luật tiếp cận này ở chỗ làm cho trạng thái của hệ thống tiếp cận mặt trượt nhanh khi S lớn, có nghĩa là làm cho tốc độ tiếp cận mặt trượt nhanh hơn khi trạng thái hệ thống ở xa mặt trượt.

$$\dot{S} = -\varepsilon \text{sgn}(S) - kS, \varepsilon > 0, k > 0 \quad (26)$$

Thay (26) vào (21):

$$\dot{V} = -\varepsilon|S| - kS^2 \leq 0 \quad (27)$$

Điều kiện (27) chỉ đảm bảo \dot{V} là một hàm bán xác định âm nên V chưa phải là một hàm Lyapunov thực sự. Từ (27), tính đạo hàm cấp hai của V :

$$\ddot{V} = -\varepsilon|\dot{S}| - 2kS\dot{S} \quad (28)$$

$$\ddot{V} = -\varepsilon|\text{sgn}(S) + kS| + 2\varepsilon k|S| + 2k^2S^2 \quad (29)$$

Do $\dot{V} \leq 0$ nên V bị chặn, vì thế S bị chặn, kéo theo \dot{V} bị chặn nên \dot{V} là hàm liên tục đều. Bổ đề Barbalat cho phép kết luận $\dot{V} \rightarrow 0$, kéo theo $S \rightarrow 0$. Như vậy, khi hệ thống nằm trên mặt trượt thì trạng thái của hệ $e(t), \dot{e}(t) \rightarrow 0$. Kết hợp (26) với (24) được luật điều khiển (30)

$$u = \frac{1}{b\lambda} [(J - \lambda a)x_2 + \varepsilon J \text{sgn}(S) + JkS + (J\lambda\ddot{\theta}_d + a\lambda\dot{\theta}_d)] \quad (30)$$

3.3. Luật tiếp cận mặt trượt với tốc độ lũy thừa

Luật tiếp cận mặt trượt với tốc độ lũy thừa của hàm trượt được sử dụng trong nghiên cứu [1]. Bản chất của luật tiếp cận này ở chỗ làm tăng tốc độ tiếp cận khi trạng thái hệ thống xa mặt trượt. Tuy nhiên, nó giảm tốc độ tiếp cận khi trạng thái hệ thống ở gần đến mặt trượt. Kết quả là hệ thống có chế độ trượt nhanh và hạn chế đáng kể chattering.

Luật tiếp cận mặt trượt với tốc độ lũy thừa có biểu diễn như (31).

$$\dot{S} = -\varepsilon \text{sgn}(S) - k|S|^\alpha \text{sgn}(S), \varepsilon > 0, k > 0, 1 > \alpha > 0 \quad (31)$$

Thay (31) vào (21):

$$\dot{V} = -\varepsilon|S| - k|S|^{\alpha+1} \leq 0 \quad (32)$$

Điều kiện (32) mới chỉ đảm bảo \dot{V} là một hàm bán xác định âm nên V chưa thể là một hàm Lyapunov thực sự. Từ (32), tính đạo hàm cấp hai của V :

$$\ddot{V} = \varepsilon^2 + \varepsilon k|S|^\alpha + \varepsilon k(\alpha + 1)|S|^{\alpha-1} \text{sgn}(S) + k^2(\alpha + 1)S^{2\alpha} \text{sgn}(S) \quad (33)$$

Do $\dot{V} \leq 0$ nên V bị chặn, vì thế S bị chặn, kéo theo \dot{V} bị chặn nên \dot{V} là hàm liên tục đều. Bổ đề Barbalat đảm bảo $\dot{V} \rightarrow 0$, kéo theo $S \rightarrow 0$. Như vậy, khi hệ thống nằm trên mặt trượt thì trạng thái của hệ $e(t), \dot{e}(t) \rightarrow 0$. Kết hợp (31) với (24) có được luật điều khiển (34):

$$u = \frac{1}{b\lambda} [(J - \lambda a)x_2 + \varepsilon J \text{sgn}(S) + kJ|S|^\alpha \text{sgn}(S) + (J\lambda\ddot{\theta}_d + a\lambda\dot{\theta}_d)] \quad (34)$$

4. MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG BÁM GÓC QUAY CỦA QUADROTOR

4.1. Tham số của đối tượng mô phỏng

Theo [5-7, 9, 10], động lực học của Quadcopter được biểu diễn bởi hệ 6 phương trình vi phân, mô tả các chuyển động tịnh tiến theo và quay quanh các trục tọa độ Descartes. Với UAV cấu trúc chữ thập, mô men quán tính theo trục OX_B và OY_B có thể thiết kế để bằng nhau ($I_x = I_y$). Thêm nữa, nếu chỉ xem các thay đổi góc roll ϕ và góc yaw ψ quanh lân cận 0 thì có thể rút gọn phương trình mô tả chuyển động góc pitch θ như sau:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} I_y - \dot{\phi} \dot{\psi} I_z \cos(\theta) + \dot{\psi}^2 (I_y - I_z) \cos(\theta) \sin(\theta) = u_\theta \\ u_\theta = (F_1 - F_3)/l \end{cases} \quad (35)$$

Ta thấy rằng hệ phương trình (35) có dạng giống hệ (1). Để mô phỏng minh họa chất lượng của các luật điều khiển trên, bài báo giả định phương trình chuyển động liên quan đến tư thế chúc góc θ của Quadcopter có mô tả (36):

$$\ddot{\theta}(t) = -25\dot{\theta}(t) + 133u_\theta(t) \quad (36)$$

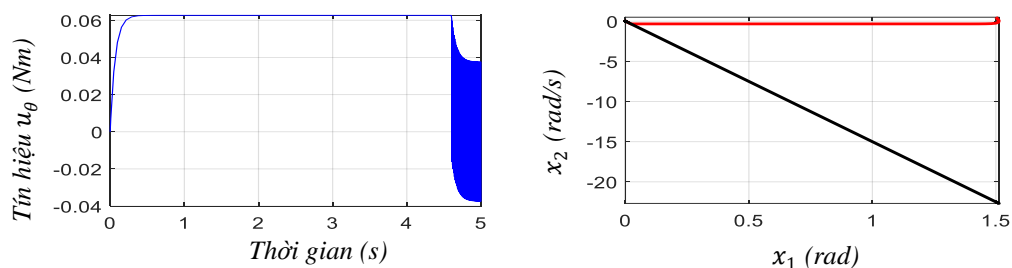
Đặt các trạng thái $x_1 = e(t); x_2 = \dot{e}(t)$ là sai lệch góc $e(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$ và đạo hàm của

sai lệch góc $\dot{e}(t) = \dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)$, hệ thống (36) được viết dưới dạng phương trình trạng thái (37):

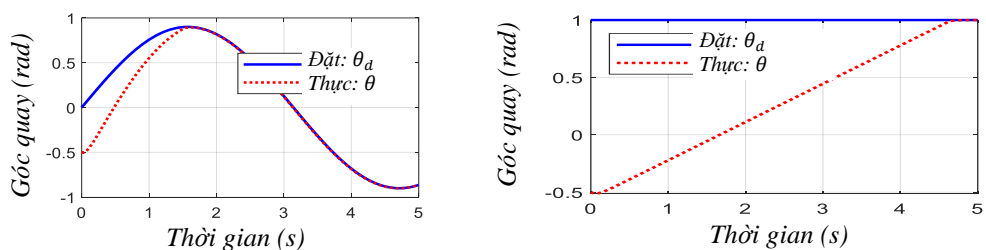
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -25x_2 - 133u_\theta + (\ddot{\theta}_d + 25\dot{\theta}_d) \end{cases} \quad (37)$$

4.2. Mô phỏng với bộ điều khiển (25)

Chọn tham số bộ điều khiển: $\lambda = 15$; $\varepsilon = 5$.



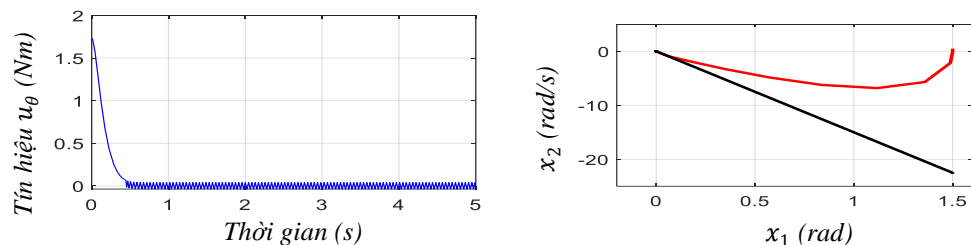
Hình 2. Tín hiệu điều khiển và quỹ đạo trạng thái hệ thống với luật (25).



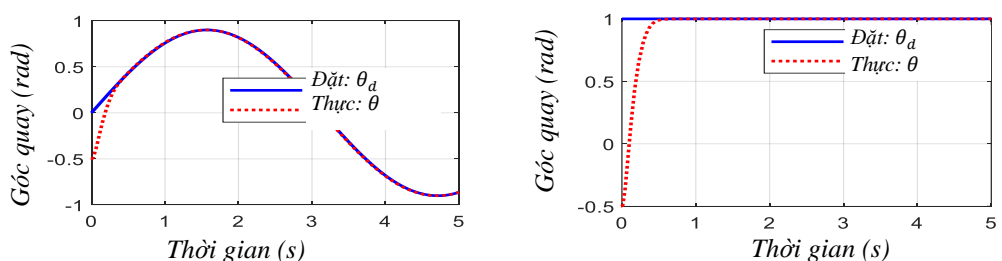
Hình 3. Đáp ứng của hệ thống với luật điều khiển (25).

4.3. Mô phỏng với bộ điều khiển (30)

Chọn tham số bộ điều khiển: $\lambda = 15$; $\varepsilon = 5$; $k = 10$.



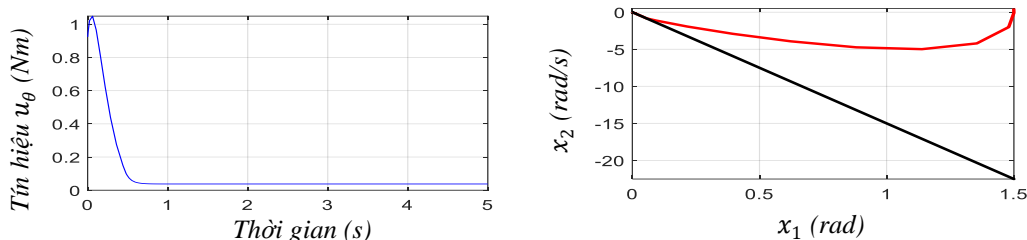
Hình 4. Tín hiệu điều khiển và quỹ đạo trạng thái hệ thống với luật (30).



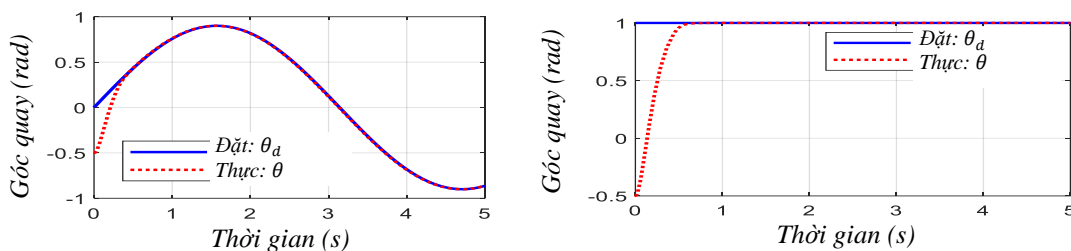
Hình 5. Đáp ứng của hệ thống với luật điều khiển (30).

4.4. Mô phỏng với bộ điều khiển (34)

Tham số bộ điều khiển: $\lambda = 15$; $\varepsilon = 5$; $\alpha = 0,5$; $k = 10$.



Hình 6. Tín hiệu điều khiển và quỹ đạo trạng thái hệ thống với luật (34).



Hình 7. Đáp ứng của hệ thống với luật điều khiển (34).

Nhận xét: Luật điều khiển (25), (30), (34) với luật tiếp cận (20), (26), (31) tương ứng đưa hệ thống vào chế độ trượt và đảm bảo trạng thái của hệ thống hội tụ về 0. Định lý 2 đã được kiểm chứng. Xem xét đáp ứng của hệ thống với $\theta_d = 1(t)$ thấy rằng trạng thái bắt đầu vào chế độ trượt $x_1 = 1,5 \text{ rad}$ hội tụ về trạng xác lập $x_1 = 0,005 \text{ rad}$. Theo Định lý 1 ta tính được $\lambda = 15$. Như vậy, Định lý 1 đã được kiểm chứng. Luật điều khiển (34) đảm bảo tín hiệu điều khiển trơn hơn luật (30) và (25); hiện tượng chattering được cải thiện hơn. Tuy nhiên, thời gian xác lập với luật (34) mặc dù nhanh hơn nhiều so với luật (25) song chậm hơn 0,8s so với luật (30). Như vậy, việc thỏa hiệp giữa chống rung và thời gian xác lập vẫn là bài toán cần được tiếp tục nghiên cứu.

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày những kết quả nghiên cứu mới cho phép tham số mặt trượt tuyến tính được lượng hóa bằng thời gian xác lập và sai số mong muốn trong hệ thống điều khiển có cấu trúc biến đổi. Bài báo cũng đã đề xuất luật tiếp cận mặt trượt tổng quát và chứng minh điều kiện tồn tại chế độ trượt bằng tiêu chuẩn ổn định Lyapunov và bổ đề Barbalat. Một số luật tiếp cận mặt trượt cụ thể được viện dẫn và chứng minh chặt chẽ về mặt toán học, đảm bảo tồn tại chế độ trượt và trạng thái của hệ thống hội tụ về 0. Mô phỏng điều khiển một kênh chuyển động giả định của Quadcopter được thực hiện trên Matlab đã thể hiện trực quan, có so sánh một số luật tiếp cận mặt trượt khác nhau. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy hoàn toàn có thể tổng hợp bộ điều khiển cấu trúc biến đổi với luật tiếp cận mặt trượt phù hợp. Những nghiên cứu tiếp theo có thể phát triển các luật tiếp cận mặt trượt mới, kết hợp với kỹ thuật điều khiển trượt thời gian hữu hạn để đảm bảo sự hội tụ hữu hạn cho hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hung JY, Gao W, Hung JC., "Variable Structure Control: A Survey", IEEE Transaction on Industrial Electronics, 40(1): 2-22, (1993).
- [2]. Edwards C, Spurgeon S., "Sliding Mode Control: Theory and Applications", London: Taylor and Francis, (1998).
- [3]. Jinkun Liu and Xinhua Wang, "Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems: Design, Analysis and MATLAB Simulation", Tsinghua University Press, Beijing, (2012).
- [4]. Vu Quoc Huy, "Asymptotic stability of dynamical systems with Barbalat's Lemma and Lyapunov function", Journal of Military Science and Technology, No. CSCE6, pp. 122-30, (2022).

- [5]. Hoàng Văn Huy, “Nghiên cứu, xây dựng hệ điều khiển cho một lớp hệ truyền động điện phi tuyến chứa nhiều động cơ có liên hệ ràng buộc ứng dụng điều khiển quadrotor”, Luận án TSKT, Học viện KTQS, (2019).
- [6]. Đào Văn Hiệp, Trần Xuân Diệu, Phùng Thế Kiên, “Mô hình hóa động lực học Quadrotor”, Hội nghị toàn quốc về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA-2011, (2011).
- [7]. Hoàng Văn Huy, Nguyễn Đăng Toàn, Nguyễn Văn Lành, “Điều khiển logic mờ Quadrotor”, Tạp chí Khoa học và công nghệ, Tập 59, Số 4, (2023).
- [8]. A. Melboues, Y.Tami, A.Guessoum and M.Hadjsadok, “UAV Controller Design and Analysis Using Sliding mode Control”, (2010).
- [9]. Holger Voos, “Nonlinear Control of a Quadrotor Micro-UAV using Feedback-Linearization”, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, Malaga, Spain, (2009).
- [10]. S.Bouabdallah, P.Murrieri, and R.Siegwart, “Design and control of an indoor micro quadrotor”, in Proceedings of The 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 5, New Orleans, LA, pp. 4393 – 4398, (2004).
- [11]. Huy, V.Q., Binh, T.N, “Adaptive Terminal Sliding Mode Control by Identifying Uncertain and Mutated Disturbance with Reference Model”, J. Electr. Eng. Technol. Vol. 15, pp. 1789–1796, (2020).
- [12]. Nguyen Thi Thu Thao, Vu Quoc Huy, “Sliding mode control with exponent sliding surface-reaching law in the tracking drive systems using synchronous servo at torque-position mode”, Journal of Military Science and Technology, No. 80, pp. 31-38, (2022).

ABSTRACT

Synthesizing electrical drive control system with several sliding surface reaching laws applied to manipulate Quadcopter

This paper studies the stability of a variable structure control system operating in sliding mode using Lyapunov criteria and different sliding surface reaching speeds. This is a new research result that allows quantifying sliding surface parameters thanks to the system's settling time and desired error. The paper also proposes a method for synthesizing a variable structure controller using a general sliding surface approach law and specifying some derivatives of the general sliding surface reaching law. Some simulations of controlling a Quadcopter motion channel have been performed in Matlab to demonstrate the proposed research results.

Keywords: Variable structure control; Lyapunov stability; Sliding surface reaching law; UAV Quadcopter.