



Điều khiển thích nghi phi mô hình CFDL-MFAC bù trễ cho một lớp hệ phi tuyến SISO rời rạc có trễ đầu vào biến thiên

Lê Bá Yến¹, Vũ Quốc Huy^{1*}

¹ Viện Tự động hóa (CAPITI), 89B Lý Nam Đế, Hoàn Kiếm, Hà Nội

*Email liên hệ: maihuyvu@gmail.com

Tóm tắt

Bài báo này nghiên cứu bài toán điều khiển thích nghi phi mô hình cho một lớp hệ phi tuyến SISO rời rạc có trễ đầu vào biến thiên theo thời gian. Trên cơ sở phương pháp tuyến tính hóa động dạng nén (Compact Form Dynamic Linearization – CFDL), bài báo thiết lập một mô hình dữ liệu mới có xét đến trễ đầu vào, trong đó mối quan hệ giữa sai phân đầu ra và sai phân tín hiệu điều khiển được biểu diễn thông qua một đại lượng gọi là giả đạo hàm riêng phụ thuộc trễ (Delay-Pseudo Partial Derivative – Delay-PPD). Bài báo chứng minh sự tồn tại của Delay-PPD và từ đó tổng hợp được luật điều khiển thích nghi phi mô hình CFDL-MFAC có xét đến trễ đầu vào. Điều kiện đủ để đảm bảo tính bị chặn của tín hiệu vòng kín và tính hội tụ của sai số bám cũng được phân tích. Các kết quả mô phỏng trên một đối tượng phi tuyến có trễ đầu vào biến thiên cho thấy bộ điều khiển đề xuất cải thiện rõ rệt chất lượng bám so với các trường hợp bỏ qua trễ hoặc giả thiết trễ cố định sai. Điều này cho thấy hiệu quả của việc đưa trực tiếp thông tin trễ vào mô hình CFDL và cấu trúc điều khiển MFAC.

Từ khóa: Điều khiển thích nghi phi mô hình; CFDL; giả đạo hàm riêng; trễ thay đổi; DDC.

Abstract

This paper studies the problem of non-model adaptive control for a class of discrete SISO nonlinear systems with time-varying input delays. Based on the Compact Form Dynamic Linearization (CFDL) method, the paper establishes a new data model that considers input delays, in which the relationship between the output difference and the control signal difference is expressed through a quantity called the delay-dependent partial derivative (Delay-Pseudo Partial Derivative – Delay-PPD). The paper proves the existence of Delay-PPD and from it synthesizes a non-model adaptive control law, CFDL-MFAC, that considers input delays. Sufficient conditions to ensure the boundedness of the closed-loop signal and the convergence of the tracking error are also analyzed. Simulation results on a nonlinear system with variable input delays show that the proposed controller significantly improves tracking quality compared to cases that ignore delays or assume fixed delays. This demonstrates the effectiveness of directly incorporating delay information into the CFDL model and the MFAC control structure.

Keywords: Model-free adaptive control; CFDL; pseudo-partial derivative; variable delay; DDC.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong nhiều hệ thống điều khiển thực tế như robot, hệ servo cơ điện, hệ điều khiển qua mạng và các hệ cơ điện tử phức tạp, việc xây dựng mô hình động lực học chính xác của đối tượng thường gặp nhiều khó khăn do ảnh hưởng của phi tuyến mạnh, bất định tham số và nhiễu. Vì vậy, các phương pháp điều khiển dựa trên dữ liệu (Data-Driven Control – DDC) hoặc điều khiển phi mô hình (Model-Free Control – MFC) đã thu hút sự quan tâm đáng kể trong những năm gần đây. Một trong những hướng tiếp cận tiêu biểu là MFC do Fliess và Join đề xuất, trong đó bộ điều khiển được thiết kế trực tiếp từ dữ liệu vào–ra của hệ thống mà không cần mô hình toán học chi tiết của đối tượng [1].

Trên cơ sở đó, phương pháp điều khiển thích nghi phi mô hình (Model-Free Adaptive Control – MFAC) đã được phát triển như một khung lý thuyết điều khiển thích nghi cho các hệ phi tuyến rời rạc. Ý tưởng cốt lõi của MFAC là kỹ thuật tuyến tính hóa động, trong đó động lực học phi tuyến của hệ được biểu diễn dưới dạng quan hệ tuyến tính cục bộ giữa sai phân đầu ra và sai phân tín hiệu điều khiển thông qua đại lượng giả đạo hàm riêng (Pseudo Partial Derivative – PPD) [5]. Nhiều nghiên cứu tiếp theo đã phát triển các dạng tuyến tính hóa động khác nhau như dạng nén (Compact-Form Dynamic Linearization – CFDL), cho phép thiết kế bộ điều khiển thích nghi phi mô hình với cấu trúc đơn giản và hiệu quả cho các hệ phi tuyến rời rạc [8]. Những năm gần đây, MFAC tiếp tục được mở rộng và ứng dụng trong nhiều bài toán điều khiển thực tế như hệ điều khiển qua mạng có mất dữ liệu, hệ tự hành và các hệ phi tuyến phức tạp [6], [10]. Một số nghiên cứu cũng đề xuất các cải tiến trong quá trình cập nhật PPD nhằm nâng cao tốc độ hội tụ và khả năng thích nghi của thuật toán, chẳng hạn như MFAC với hệ số quên biến thiên hoặc các dạng tuyến tính hóa động cải tiến [9]. Ngoài ra, các công trình tổng quan gần đây cho thấy MFAC đang trở thành một hướng nghiên cứu quan trọng trong điều khiển dựa trên dữ liệu cho các hệ phi tuyến hiện đại [4].

Trễ đầu vào là hiện tượng phổ biến trong nhiều hệ thống điều khiển thực tế do quá trình truyền thông, xử lý tín hiệu hoặc động học cơ cấu chấp hành. Trong nhiều trường hợp, trễ đầu vào có thể biến thiên theo thời gian, làm cho việc phân tích và thiết kế bộ điều khiển trở nên phức tạp hơn. Các hệ có trễ đầu vào đã được nghiên cứu rộng rãi trong lý thuyết điều khiển và nhiều kết quả quan trọng đã được phát triển trong phân tích ổn định cũng như thiết kế điều khiển cho các hệ dạng này [2], [3]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay về MFAC chủ yếu xét các hệ không có trễ đầu vào hoặc trễ cố định đơn giản. Khi trễ đầu vào tồn tại hoặc biến thiên theo thời gian, quan hệ giữa sai phân đầu ra và sai phân tín hiệu điều khiển không còn



tuan theo dạng CFDL truyền thống. Nếu ảnh hưởng của trễ bị bỏ qua hoặc giả thiết trễ không chính xác, chất lượng điều khiển có thể bị suy giảm đáng kể.

Xuất phát từ vấn đề trên, bài báo này nghiên cứu mở rộng phương pháp CFDL-MFAC cho lớp hệ phi tuyến SISO rời rạc có trễ đầu vào biến thiên theo thời gian. Trên cơ sở kỹ thuật tuyến tính hóa động dạng nén, bài báo xây dựng một mô hình dữ liệu có xét đến trễ đầu vào và từ đó tổng hợp luật điều khiển thích nghi phi mô hình tương ứng. Các đóng góp chính của bài báo được tóm tắt như sau:

Thứ nhất, bài báo mở rộng mô hình tuyến tính hóa động dạng nén CFDL truyền thống sang trường hợp hệ phi tuyến SISO rời rạc có trễ đầu vào biến thiên theo thời gian, từ đó thiết lập mô hình dữ liệu mới dưới dạng Delay-CFDL. So với các nghiên cứu MFAC thông thường vốn chủ yếu xét tín hiệu điều khiển tác động tức thời hoặc trễ cố định, mô hình này phản ánh trực tiếp ảnh hưởng của trễ đầu vào lên quan hệ giữa sai phân đầu ra và sai phân điều khiển.

Thứ hai, bài báo đưa ra khái niệm giả đạo hàm riêng phụ thuộc trễ (Delay-PPD) và chứng minh sự tồn tại của đại lượng này. Đây là điểm mở rộng lý thuyết quan trọng so với CFDL-MFAC cổ điển, vì trong trường hợp có trễ đầu vào biến thiên, đại lượng PPD truyền thống không còn mô tả đúng quan hệ dữ liệu giữa đầu vào và đầu ra của hệ.

Thứ ba, trên cơ sở mô hình Delay-CFDL, bài báo tổng hợp luật điều khiển Delay-CFDL-MFAC và phân tích điều kiện để hệ kín duy trì tính bị chặn cũng như khả năng hội tụ sai số bám. Kết quả mô phỏng cho thấy khi trễ đầu vào thay đổi theo thời gian, việc đưa trực tiếp thông tin trễ vào mô hình CFDL và cấu trúc điều khiển giúp cải thiện chất lượng bám so với các trường hợp bỏ qua trễ hoặc giả thiết trễ cố định.

2. MÔ HÌNH DELAY-CFDL VÀ ĐỊNH LÝ TỒN TẠI DELAY-PPD

2.1. Lớp đối tượng nghiên cứu và giả thiết

Xét hệ phi tuyến SISO rời rạc có trễ đầu vào:

$$y(k+1) = f(y_k, u_{k-d(k)}) \quad (1)$$

Trong đó:

$$y_k = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y+1)] \quad (2)$$

$$u_{k-d(k)} = [u(k-d(k)), u(k-d(k)-1), \dots, u(k-d(k)-n_u+1)] \quad (3)$$

Trễ đầu vào chưa biết, có thể biến thiên theo thời gian, d_{max} là trễ lớn nhất:

$$d(k) \in D := \{0, 1, 2, \dots, d_{max}\} \quad (4)$$

Ký hiệu sai phân:



$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= y(k+1) - y(k) \\ \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \end{aligned} \quad (5)$$

Giả thiết:

(A1) - (Đặc tính trơn theo biến điều khiển tác động): Với mọi k, f khả vi theo đối số $u(k-d(k))$ và đạo hàm riêng theo đối số đó liên tục trên miền làm việc.

(A2) - (Điều kiện Lipschitz tổng quát theo sai phân điều khiển trễ): Tồn tại $L > 0$ sao cho

$$|\Delta y(k+1)| \leq L |\Delta u(k-d(k))|, \forall k \quad (6)$$

(A3) - (Trễ bị chặn và biến thiên chậm):

$$d(k) \in D, \quad |d(k+1) - d(k)| \leq 1 \quad (7)$$

2.2. Định lý về sự tồn tại Delay-PPD

Phát biểu:

Nếu hệ (1) thỏa mãn giả thiết A1, A2 thì tồn tại một đại lượng $\phi(k)$ (được gọi là Delay-PPD) sao cho:

$$\Delta y(k+1) = \phi(k) \Delta u(k-d(k)) \quad (8)$$

Và (k) bị chặn:

$$|\phi(k)| \leq L, \quad \forall k \quad (9)$$

Chứng minh:

a) *Chứng minh tồn tại $\phi(k)$*

Viết sai phân đầu ra dưới dạng chênh lệch hai giá trị của f . Từ (1) ta có:

$$y(k+1) = f(y_k, u_{k-d(k)}) \quad (10)$$

Tương tự:

$$y(k) = f(y_{k-1}, u_{k-1-d(k-1)}) \quad (11)$$

Suy ra:

$$\Delta y(k+1) = f(y_k, u_{k-d(k)}) - f(y_{k-1}, u_{k-1-d(k-1)}) \quad (12)$$

Tách phần biến thiên do riêng biến $u(k-d(k))$. Xây dựng một véc-tơ điều khiển lai $\tilde{u}_{k-d(k)}$ bằng cách thay phân tử đầu tiên của $u_{k-d(k)}$ từ $u(k-d(k))$ thành $u(k-d(k)-1)$, còn các phân tử khác giữ nguyên ta được:

$$\tilde{u}_{k-d(k)} := [u(k-d(k)-1), u(k-d(k)-1), \dots, u(k-d(k)-n_u+1)] \quad (13)$$

Ở đây chỉ cần đảm bảo $\tilde{u}_{k-d(k)}$ và $u_{k-d(k)}$ khác nhau đúng một biến là $u(k-d(k))$. Khi đó ta cộng-trừ $f(y_k, \tilde{u}_{k-d(k)})$ trong (12) nhận được:



$$\Delta y(k + 1) = A(k) + r(k) \quad (14)$$

Trong đó:

$$A(k) := f(y_k, u_{k-d(k)}) - f(y_k, \tilde{u}_{k-d(k)}) \quad (15)$$

$$r(k) := f(y_k, \tilde{u}_{k-d(k)}) - f(y_{k-1}, u_{k-1-d(k-1)}) \quad (16)$$

$A(k)$ là phần chênh lệch do thay đổi riêng $u(k - d(k))$; còn $r(k)$ gom mọi thay đổi còn lại (thay đổi y , các thành phần điều khiển khác và cả việc trễ có thể đổi).

Áp dụng định lý giá trị trung bình cho $A(k)$. Theo giả thiết A1, ta có hàm $g(\alpha)$:

$$g(\alpha) = f(y_k, \tilde{u}_{k-d(k)} + \alpha(u_{k-d(k)} - \tilde{u}_{k-d(k)})), \alpha \in [0,1] \quad (17)$$

khả vi theo α . Vì $u_{k-d(k)} - \tilde{u}_{k-d(k)}$ chỉ có đúng một phần tử khác 0 tại vị trí $u(k - d(k))$, nên theo định lý giá trị trung bình tồn tại $\alpha_k \in (0,1)$ sao cho:

$$A(k) = g(1) - g(0) = g'(\alpha_k) \quad (18)$$

Mà $g'(\alpha)$ chính là đạo hàm riêng theo $u(k - d(k))$ nhân với $\Delta u(k - d(k))$.

Do đó tồn tại một điểm trung gian ξ_k trên đoạn $[u(k - d(k) - 1), u(k - d(k))]$ sao cho:

$$A(k) = \left. \frac{\partial f}{\partial u(k - d(k))} \right|_{\xi_k} \Delta u(k - d(k)) \quad (19)$$

Đặt:

$$\phi_0(k) := \left. \frac{\partial f}{\partial u(k - d(k))} \right|_{\xi_k} \quad (20)$$

Khi đó:

$$A(k) = \phi_0(k) \Delta u(k - d(k)) \quad (21)$$

Hấp thụ $r(k)$ vào hệ số nhân $\Delta u(k - d(k))$, từ (14) và (21):

$$\Delta y(k + 1) = \phi_0(k) \Delta u(k - d(k)) + r(k) \quad (22)$$

Ta xét hai trường hợp:

* Nếu $\Delta u(k - d(k)) \neq 0$:

Định nghĩa:

$$\phi(k) := \phi_0(k) + \frac{r(k)}{\Delta u(k - d(k))} \quad (23)$$

Thế (23) vào (22) suy ra ngay:

$$\Delta y(k + 1) = \phi(k) \Delta u(k - d(k)) \quad (24)$$

* Nếu $\Delta u(k - d(k)) = 0$:



Từ giả thiết A2, ta có $|\Delta y(k+1)| \leq 0 \Rightarrow \Delta y(k+1) = 0$. Khi đó chọn $\phi(k) = 0$ thì (24) vẫn đúng. Vậy (8) đúng với mọi k .

b) Chứng minh $\phi(k)$ bị chặn

Nếu $\Delta u(k-d(k)) \neq 0$, từ (8) và giả thiết A2:

$$|\phi(k)| = \frac{\Delta y(k+1)}{\Delta u(k-d(k))} \leq L \frac{|\Delta u(k-d(k))|}{|\Delta u(k-d(k))|} = L \quad (25)$$

Nếu $\Delta u(k-d(k)) = 0$, ta chọn $\phi(k) = 0$ nên cũng thỏa $|\phi(k)| \leq L$.

Suy ra (9) đúng.

Định lý 1 được chứng minh.

Nhận xét. Định lý 1 cho phép mô tả hệ (1) bằng mô hình dữ liệu Delay-CFDL dạng (8) tại mỗi thời điểm lấy mẫu mà không cần mô hình động lực học tường minh. Đây là nền tảng để ước lượng Delay-PPD và tổng hợp điều khiển bù trễ.

3. ƯỚC LƯỢNG TRỄ ĐẦU VÀO

Vì $d(k)$ chưa biết, ta xét tập ứng viên $l \in D$. Với mỗi l , giả sử tạm thời trễ bằng l , mô hình Delay-CFDL dự báo:

$$\Delta y(i+1) \approx \hat{\phi}_l(i) \Delta u(i-l) \quad (26)$$

Dùng luật cập nhật chuẩn hóa (tương thích MFAC):

$$\hat{\phi}_l(i) = \hat{\phi}_l(i-1) + \frac{\eta \Delta u(i-l)}{\mu + \Delta u^2(i-l)} (\Delta y(i+1) - \hat{\phi}_l(i-1) \Delta u(i-l)) \quad (27)$$

với $\eta \in (0,1], \mu > 0$. η là hệ số cập nhật của PPD, μ là tham số điều chỉnh trong luật cập nhật.

Trên cửa sổ W mẫu gần nhất (W là kích thước cửa sổ dữ liệu), định nghĩa chỉ số lỗi:

$$J_l(k) = \sum_{i=k-W+1}^k \frac{(\Delta y(i+1) - \hat{\phi}_l(i) \Delta u(i-l))^2}{\epsilon + \Delta u^2(i-l)}, \epsilon > 0 \quad (28)$$

Chọn:

$$\hat{d}_{raw}(k) = \arg \arg J_l(k) \quad (29)$$

Dùng lọc đa số trên N_h bước (N_h là độ dài cửa sổ làm trơn):

$$\hat{d}(k) = \text{mode}\{\hat{d}_{raw}(k), \hat{d}_{raw}(k-1), \dots, \hat{d}_{raw}(k-N_h+1)\} \quad (30)$$

Chỉ cập nhật nếu $J_l(k) \leq J_{th}$, ngược lại giữ $\hat{d}(k) = \hat{d}(k-1)$.



4. LUẬT ĐIỀU KHIỂN CFDL-MFAC BÙ TRỄ: DELAY-CFDL-MFAC

Mục tiêu bám $y_d(k)$, sai số (9):

$$e(k) = y_d(k) - y(k) \quad (31)$$

Do điều khiển tại k tác động lên đầu ra sau $\hat{d}(k)$ bước, xét hàm mục tiêu (32), λ là tham số điều khiển.

$$J_u(k) = e^2(k + \hat{d}(k) + 1) + \lambda \Delta u^2(k), \lambda > 0 \quad (32)$$

Từ Delay-CFDL, với trễ $\hat{d}(k)$:

$$\Delta y(k + \hat{d}(k) + 1) \approx \hat{\phi}_{\hat{d}(k)}(k) \Delta u(k) \quad (33)$$

Suy ra xấp xỉ (34):

$$y(k + \hat{d}(k) + 1) \approx y(k + \hat{d}(k)) + \hat{\phi}_{\hat{d}(k)} \Delta u(k) \quad (34)$$

Đặt:

$$\underline{e}(k) := y_d(k + \hat{d}(k) + 1) - y(k + \hat{d}(k)) \quad (35)$$

Thay (34) vào (32), lấy đạo hàm theo $\Delta u(k)$ và giải điều kiện tối ưu, thu được (36), ρ là một tham số điều khiển.

$$\Delta u(k) = \rho \frac{\hat{\phi}_{\hat{d}(k)}(k)}{\lambda + \hat{\phi}_{\hat{d}(k)}^2(k)} \underline{e}(k), \rho \in (0,1] \quad (36)$$

Ta tổng hợp được luật điều khiển dạng truy hồi (37):

$$u(k) = u(k-1) + \rho \frac{\hat{\phi}_{\hat{d}(k)}(k)}{\lambda + \hat{\phi}_{\hat{d}(k)}^2(k)} (y_d(k + \hat{d}(k) + 1) - y(k + \hat{d}(k))) \quad (37)$$

5. PHÂN TÍCH TOÁN HỌC ỔN ĐỊNH HỆ KÍN

Từ (27) và giả thiết A2, $\phi(k)$ bị chặn bởi L . Với việc chọn $\mu > 0$ và cơ chế đặt lại như [7] (nếu $|\Delta u(i-l)| < \varepsilon_u$ hoặc $|\hat{\phi}_l(i)| < \varepsilon_\phi$ thì $\hat{\phi}_l(i) = \hat{\phi}_0$).

Suy ra tồn tại $M_\phi > 0$ sao cho:

$$|\hat{\phi}_l(k)| \leq M_\phi, \forall l \in D, \forall k \quad (38)$$

Giả sử tại thời điểm k : $\hat{d}(k) = d(k)$ và $\hat{\phi}_{\hat{d}(k)}(k) = \phi(k + d(k))$ (xấp xỉ lý tưởng). Khi đó từ (34)–(37) suy ra (39):

$$e(k + d(k) + 1) = \left(1 - \rho \frac{\phi^2}{\lambda + \phi^2}\right) \underline{e}(k) \quad (39)$$

với $\phi = \phi(k + d(k))$. Do $\lambda > 0, \rho \in (0,1]$ nên:



$$0 < \left| 1 - \rho \frac{\phi^2}{\lambda + \phi^2} \right| < 1 \quad (40)$$

Suy ra sai số tương lai giảm theo hệ số co.

Khi $\hat{d}(k)$ được chọn bởi (28) – (30), với giả thiết A3 và điều kiện kích thích đủ trên cửa sổ, tức $\Delta u(\cdot)$ không đồng nhất 0 trong W mẫu, $\hat{d}(k)$ sẽ đúng sau một khoảng quá độ quanh các thời điểm trễ đổi. Khi đó, trong các khoảng thời gian mà giá trị trễ được lựa chọn đúng, sai số bám thỏa tính chất co theo (39)–(40); còn trong các khoảng quá độ khi trễ thay đổi hoặc bị lựa chọn sai tạm thời, sai số vẫn bị chặn bởi các chặn hữu hạn của tín hiệu vòng kín. Vì vậy, sai số bám của hệ kín là bị chặn và hội tụ về một lân cận nhỏ của gốc.

Như vậy, so với CFDL-MFAC truyền thống, kết quả ổn định thu được trong bài báo cho thấy cấu trúc điều khiển đề xuất vẫn duy trì được tính chất ổn định đầu vào–đầu ra trong điều kiện có trễ đầu vào biến thiên, với cái giá phải trả là sai số bám chỉ hội tụ về một lân cận nhỏ thay vì triệt tiêu hoàn toàn trong mọi thời điểm.

6. MÔ PHỎNG SỐ VÀ BÌNH LUẬN

6.1. Kích bản mô phỏng

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất, bài báo thực hiện mô phỏng trên một đối tượng phi tuyến rời rạc có trễ đầu vào biến thiên theo thời gian. Trễ đầu vào được giả thiết thay đổi theo từng đoạn thời gian nhằm mô phỏng các tình huống trễ biến thiên trong thực tế. Các chỉ tiêu đánh giá gồm sai số RMS, chỉ tiêu tích phân IAE, năng lượng điều khiển E_u và độ quá chỉnh. Ba bộ điều khiển được so sánh gồm: C1: CFDL-MFAC bỏ qua trễ đầu vào ($d = 0$); C2: CFDL-MFAC với giả thiết trễ cố định ($d = 1$); C3: Bộ điều khiển đề xuất, trong đó thông tin trễ biến thiên được đưa trực tiếp vào cấu trúc điều khiển Delay-CFDL-MFAC.

6.2. Tham số mô phỏng

Chọn hệ mô phỏng (41):

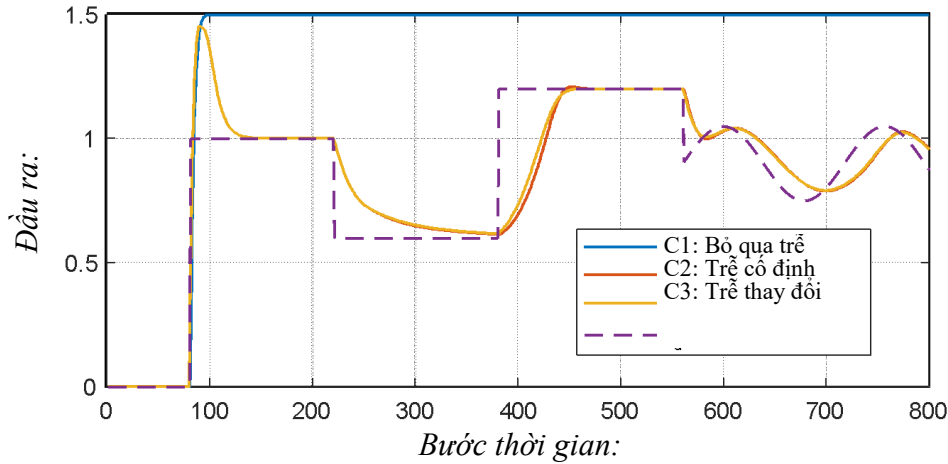
$$y(k+1) = 0.6y(k) + 0.2\sin(y(k)) + \frac{0.8u(k-d(k))}{1+u^2(k-d(k))} \quad (41)$$

Trễ biến thiên có dạng (42):

$$d(k) = \{1: 1 \leq k < 250 \quad 3: 250 \leq k < 500 \quad 2: 500 \leq k \leq 800 \quad (42)$$

Tín hiệu mong muốn và tham số mô phỏng có dạng (43), (44), (45):

đổi sang các giá trị khác, sai số bám của C2 tăng lên đáng kể, trong khi bộ điều khiển đề xuất vẫn duy trì chất lượng bám tốt hơn.



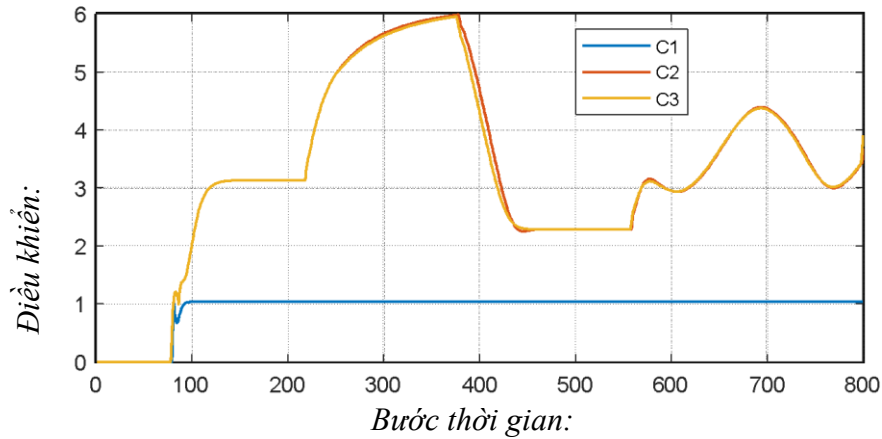
Hình 1. So sánh đáp ứng đầu ra của hệ với ba bộ điều khiển.

Hình 1 thể hiện đáp ứng đầu ra của hệ đối với ba chiến lược điều khiển. Có thể thấy bộ điều khiển C1, trong đó ảnh hưởng của trễ đầu vào bị bỏ qua, cho sai số bám lớn và độ quá chỉnh cao. Điều này cho thấy giả thiết không có trễ là không phù hợp đối với hệ có trễ đầu vào. Khi trễ đầu vào được xét đến dưới dạng cố định (C2), chất lượng điều khiển được cải thiện đáng kể so với C1. Tuy nhiên, do trễ thực của hệ thay đổi theo thời gian nên bộ điều khiển này chỉ cho kết quả tốt trong đoạn đầu khi $d(k) = 1$. Ngược lại, bộ điều khiển đề xuất (C3), trong đó thông tin trễ biến thiên được đưa trực tiếp vào cấu trúc điều khiển Delay-CFDL-MFAC, cho đáp ứng bám chính xác hơn trên toàn bộ miền mô phỏng. Sai số bám giảm rõ rệt khi trễ đầu vào thay đổi sang các giá trị khác nhau, thể hiện ưu thế của phương pháp đề xuất.

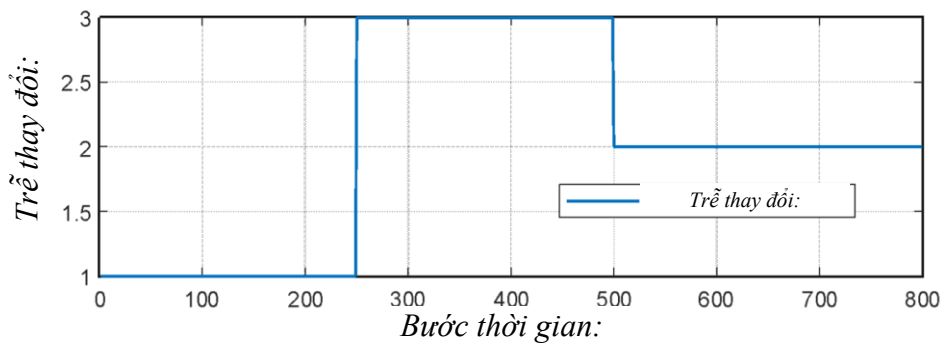
Hình 2 biểu diễn tín hiệu điều khiển tương ứng của ba bộ điều khiển. Có thể nhận thấy rằng tín hiệu điều khiển của phương pháp C1 dao động mạnh hơn do bộ điều khiển không xét đến trễ đầu vào của hệ. Trong trường hợp C2 và C3, tín hiệu điều khiển ổn định hơn do cấu trúc điều khiển đã xét đến ảnh hưởng của trễ. Mặc dù năng lượng điều khiển của phương pháp đề xuất (C3) tăng nhẹ so với trường hợp trễ cố định (C2), bộ điều khiển này đạt được chất lượng bám tốt hơn đáng kể. Điều này cho thấy việc đưa thông tin trễ vào mô hình dự báo của bộ điều khiển giúp cải thiện hiệu quả điều khiển mà không làm tăng đáng kể biên độ tín hiệu điều khiển.

Hình 3 mô tả sự thay đổi của trễ đầu vào theo thời gian trong kịch bản mô phỏng. Trễ đầu vào được giả thiết thay đổi theo ba đoạn với các giá trị lần lượt là $d = 1$, $d = 3$ và $d = 2$. Kịch bản này nhằm mô phỏng các tình huống thực tế trong đó trễ đầu vào có thể thay đổi do các yếu tố như độ trễ truyền thông, thời gian xử lý hoặc đặc tính động học của cơ cấu chấp hành. Việc

sử dụng trễ biến thiên cho phép đánh giá khả năng thích nghi của bộ điều khiển đề xuất khi điều kiện làm việc của hệ thay đổi. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển Delay-CFDL-MFAC duy trì chất lượng bám tốt ngay cả khi trễ đầu vào thay đổi theo thời gian.



Hình 2. So sánh tín hiệu điều khiển của ba phương pháp.



Hình 3. Trễ đầu vào biến thiên theo thời gian được sử dụng trong mô phỏng.

Nhận xét: Từ các kết quả trên có thể rút ra một số nhận xét như sau: Khi bỏ qua ảnh hưởng của trễ đầu vào, chất lượng điều khiển suy giảm đáng kể. Việc giả thiết trễ cố định chỉ cho kết quả tốt khi giá trị trễ thực gần với giá trị giả thiết. Bộ điều khiển Delay-CFDL-MFAC cho kết quả tốt nhất khi trễ đầu vào biến thiên theo thời gian, thể hiện ở sai số bám nhỏ hơn và khả năng thích nghi tốt hơn với sự thay đổi của trễ.

7. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu bài toán điều khiển thích nghi phi mô hình cho lớp hệ phi tuyến SISO rời rạc có trễ đầu vào biến thiên theo thời gian. Trên cơ sở phương pháp tuyến tính hóa động dạng nén CFDL, bài báo đã xây dựng một mô hình dữ liệu mới có xét đến trễ đầu vào và đưa ra khái niệm Delay-PPD. Sự tồn tại của đại lượng này đã được chứng minh, từ đó cho phép tổng hợp luật điều khiển CFDL-MFAC bù trễ cho hệ có trễ đầu vào biến thiên. Kết quả mô



phông cho thấy khi trễ đầu vào thay đổi theo thời gian, bộ điều khiển đề xuất cho chất lượng bám tốt hơn rõ rệt so với trường hợp bỏ qua trễ hoặc giả thiết trễ cố định sai. Điều này khẳng định tính cần thiết của việc đưa trực tiếp thông tin trễ vào mô hình CFDL và cấu trúc điều khiển MFAC. Trong các nghiên cứu tiếp theo, hướng mở rộng có thể là phát triển các cơ chế giám sát hoặc nhận dạng trễ trực tuyến nhằm cung cấp thông tin trễ cho bộ điều khiển trong các hệ thống thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Fliess, M. (2013). Model-free control. *International Journal of Control*.
<https://doi.org/10.1080/00207179.2013.810345>
- [2] Jean-Pierre Richard, Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems, *Automatica*, Volume 39, Issue 10, 2003, Pages 1667-1694, ISSN 0005-1098,
[https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(03\)00167-5](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(03)00167-5).
- [3] E. Fridman, *Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control*, Springer, 2014.
- [4] Zhang C, Cen C, Huang J. An Overview of Model-Free Adaptive Control for the Wheeled Mobile Robot. *World Electric Vehicle Journal*. 2024; 15(9):396.
<https://doi.org/10.3390/wevj15090396>
- [5] Z.-S. Hou, S.-T. Jin, *Model-Free Adaptive Control: Theory and Applications*, CRC Press, London, UK, 2013.
- [6] Z. S. Hou and X. H. Bu, “Model-free adaptive control with data dropouts”, *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 8, pp. 10709–10717, 2011.
- [7] Trần Ngọc Bình, Vũ Quốc Huy, “Tuyến tính hóa động dạng rút gọn CFDL và điều khiển thích nghi phi mô hình MFAC trong hệ SISO rời rạc”, *Tạp chí Nghiên cứu KH-CN quân sự*, số 98, 2024, 15-22.
- [8] Z. Hou and Y. Zhu, “Controller-Dynamic-Linearization-Based Model Free Adaptive Control for Discrete-Time Nonlinear Systems,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 4, pp. 2301-2309, Nov. 2013, doi: 10.1109/TII.2013.2257806.
- [9] Hoang-Anh Pham, Dirk Söffker, “Modified Model-Free Adaptive Control Using Compact-Form Dynamic Linearization Technique,” *IFAC World Congress*, 2020.



- [10] Yulei Liao, Tingpeng Du, Quanquan Jiang, “Model-free adaptive control method with variable forgetting factor for unmanned surface vehicle control,” Applied Ocean Research, Volume 93, 2019, 101945, ISSN 0141-1187, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101945>.