

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU CHO HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TẦNG DỰA TRÊN DỮ LIỆU THỰC NGHIỆM BẰNG PHƯƠNG PHÁP VIRTUAL REFERENCE FEEDBACK TUNING

Nguyễn Quang Huy^{1*}, Lê Vũ Quân¹, Vũ Thị Thu Giang²

¹*Khoa Cơ - Điện, Học viện Nông nghiệp Việt Nam*

²*Khoa Công nghệ thông tin, Học viện Nông nghiệp Việt Nam*

*Tác giả liên hệ: nghuy@vnua.edu.vn

Ngày nhận bài: 05.08.2021

Ngày chấp nhận đăng: 29.10.2021

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu kết quả của phương pháp thiết kế các bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống điều khiển tầng dựa trên các dữ liệu từ thực nghiệm Virtual Reference Feedback Tuning. Điểm đặc biệt của phương pháp này là không cần biết mô hình toán học của đối tượng, vật liệu duy nhất cần thiết là bộ dữ liệu thu thập được từ một lần thực nghiệm trên đối tượng để đạt được các tham số tối ưu cho các bộ điều khiển trong hệ thống điều khiển tầng. Trong nghiên cứu này, bằng cách sử dụng phương pháp Virtual Reference Feedback Tuning chúng ta sẽ đạt được các bộ điều khiển tối ưu cho vòng điều khiển bên trong và vòng điều khiển bên ngoài của hệ thống điều khiển tầng. Sử dụng các bộ điều khiển tối ưu này, mục đích của bài toán điều khiển sẽ đạt được đó là đầu ra của hệ thống điều khiển tầng sẽ bám sát theo đầu ra mong muốn. Nội dung của phương pháp sẽ được thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab/ Simulink, các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng với các bộ điều khiển tối ưu đạt được đã làm cho đầu ra của hệ thống điều khiển tầng tiệm cận với đầu ra mong đợi.

Từ khóa: Điều khiển tối ưu, điều khiển dựa trên dữ liệu, hệ thống điều khiển tầng phương pháp Virtual Reference Feedback Tuning.

Design the Optimal Controller for Cascade Control Systems Based on Experiment Data using Virtual Reference Feedback Tuning Approach

ABSTRACT

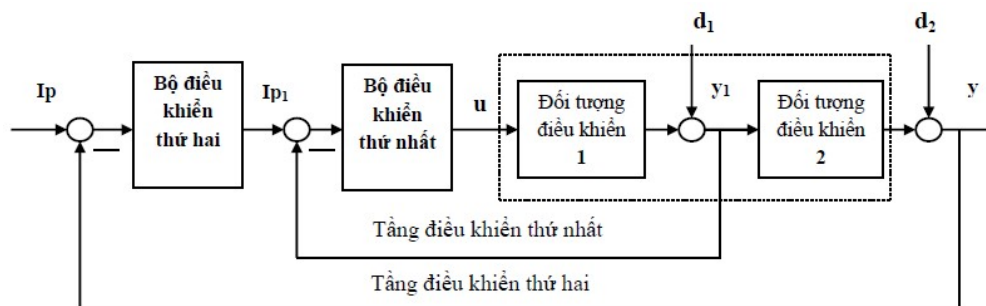
The paper introduces the method of designing optimal controllers for cascade control systems based on data obtained from an experiment, which is the Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) method. A special feature of this approach, a mathematical model of the actual plants is not required, only a data set achieved from the experiment is needed for acquiring the inner and outer controllers in cascade control systems. In this study, by using the VRFT method, we will achieve optimal inner and outer controllers of the cascade control system. Using these optimal controllers, the purpose of the control problem will be achieved such as the output of the cascade control system will be close to the desired output. The Matlab software is used for simulation, the simulation results show that with the achieved optimal controllers, the output of the cascade control system is asymptotic to the expected output.

Keywords: Optimal control, Data-driven control, cascade control systems, virtual reference feedback tuning.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo các nghiên cứu trong tài liệu của Yin & cs. (2019), hệ thống điều khiển tầng có nhiều ứng dụng trong thực tế sản xuất như trong các hệ thống điều khiển nhiệt độ, độ ẩm, áp suất chất lỏng, các khâu thanh trùng của ngành công

ng nghiệp bảo quản và chế biến thực phẩm, ngành công nghiệp khí đốt, hóa chất, lọc dầu... Một hệ thống điều khiển tầng được giới thiệu trong tài liệu bởi Anagha (2014) có thể bao gồm hai hoặc nhiều tầng điều khiển lồng vào nhau, sơ đồ cấu trúc của một hệ thống điều khiển tầng bao gồm hai tầng điều khiển được chỉ ra như trong hình 1.



Nguồn: Anagha (2014).

Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống điều khiển tầng

Vòng điều khiển bên trong (tầng điều khiển thứ nhất) bao gồm bộ điều khiển thứ nhất để điều khiển đối tượng điều khiển 1, vòng điều khiển bên ngoài (tầng điều khiển thứ hai) sẽ bao gồm bộ điều khiển thứ hai điều khiển cho đối tượng là sự kết hợp gồm tầng điều khiển thứ nhất nối tiếp với đối tượng điều khiển 2.

Như vậy, chúng ta thấy rằng khi kích thích hệ thống điều khiển tầng bằng tín hiệu I_p thì bộ điều khiển vòng ngoài (bộ điều khiển thứ hai) sẽ phát ra tín hiệu I_{p1} , tín hiệu này được sử dụng làm tín hiệu đầu vào cho tầng điều khiển thứ nhất và đầu ra của tầng điều khiển thứ nhất y_1 sẽ là đầu vào của đối tượng điều khiển 2, nó cũng trực tiếp ảnh hưởng đến đầu ra của hệ thống điều khiển tầng y .

Hệ thống điều khiển tầng có rất nhiều ưu điểm (Bhavina, 2013), bộ điều khiển vòng trong thường được thiết kế trước để loại bỏ sự ảnh hưởng của nhiễu (d_1, d_2) đồng thời cũng cải thiện tính động học cho vòng điều khiển bên ngoài. Vòng điều khiển bên ngoài sẽ được sử dụng để thiết kế theo yêu cầu điều khiển đặt ra. Chúng ta cũng có thể sử dụng hệ điều khiển tầng cho hai yêu cầu điều khiển khác nhau, yêu cầu điều khiển của vòng trong và yêu cầu điều khiển của vòng ngoài.

Thông thường, để thiết kế hai bộ điều khiển của hệ thống điều khiển tầng (Anagha, 2014; Bhavina, 2013), chúng ta sẽ tiến hành nhận dạng các đối tượng điều khiển 1 và 2, sau đó sử dụng các phương pháp thiết kế bộ điều khiển truyền thống như thiết kế PID... để tìm ra các bộ điều khiển thứ nhất và thứ hai, công việc này đòi hỏi nhiều thời gian, chi phí đôi khi ảnh hưởng đến độ

an toàn của hệ thống và đem lại kết quả không chính xác. Để khắc phục vấn đề trên, trong nghiên cứu này chúng ta sẽ sử dụng phương pháp thiết kế bộ điều khiển dựa trên dữ liệu từ duy nhất một lần thực nghiệm để tìm ra các bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống điều khiển tầng.

Phương pháp thiết kế bộ điều khiển dựa trên dữ liệu từ thực nghiệm Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) được đề xuất bởi Campi & cs. (2002). Đây là phương pháp tiến hành thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho các hệ thống điều khiển mà không cần biết mô hình toán học của đối tượng, có nghĩa là chúng ta có thể bỏ qua bước nhận dạng đối tượng điều khiển, chỉ cần duy nhất một bộ dữ liệu nhận được từ một lần thực nghiệm trên đối tượng, bộ dữ liệu này phản ánh chính xác tính động học của đối tượng.

Để phát triển và hoàn thiện phương pháp thiết kế bộ điều khiển dựa trên dữ liệu từ thực nghiệm, trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn áp dụng phương pháp VRFT để đạt được các bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống điều khiển tầng. Sử dụng các bộ điều khiển tối ưu này, mục đích của điều khiển sẽ đạt được đó là đầu ra của hệ thống điều khiển tầng sẽ bám sát theo đầu ra mong muốn, tín hiệu ra của hệ thống điều khiển tầng sẽ đạt được hay tuân theo các yêu cầu, mục đích điều khiển đề ra.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phạm vi

Trong phạm vi của nghiên cứu này, giả thiết rằng các đối tượng của hệ thống điều khiển

tầng là ổn định, tuyến tính, chúng ta không biết rõ mô hình toán học của các đối tượng điều khiển, hệ thống điều khiển là SISO (single input - single output) một vào - một ra và hệ thống không bị ảnh hưởng bởi nhiễu ngoài.

Các ký hiệu toán học được sử dụng: $\mathbb{R}$ định nghĩa cho tập các số thực, $\mathbb{R}^n$ là tập không gian vector thực n chiều. Một tín hiệu trong miền rời rạc ký hiệu là w , chuẩn của tín hiệu rời rạc được ký hiệu:

$$\|w\| = \sqrt{\sum_{t=1}^N w(t)^2}$$

Trong đó $w(t)$ là giá trị của tín hiệu w tại thời điểm t và N là giá trị chặn trên của dữ liệu.

Hàm truyền đạt của hệ thống điều khiển được định nghĩa như sau:

$$G(q) = \frac{A(q)}{B(q)}, \text{ với } A(q), B(q) \text{ là các đa thức}$$

nguyên tố cùng nhau. Đầu ra của hàm truyền $G(q)$, với đầu vào là u được ký hiệu là $y = G(q)u$.

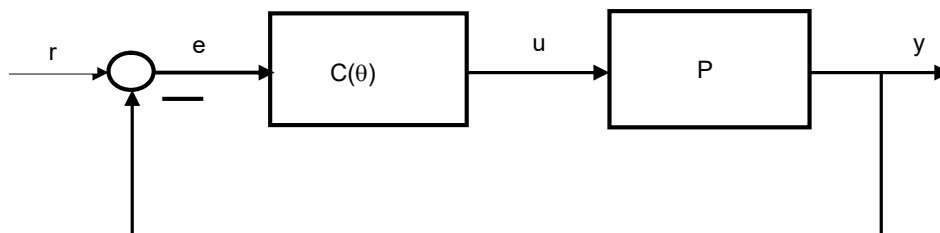
2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Giới thiệu phương pháp điều khiển VRFT

Trong phần này, chúng ta sẽ trình bày ngắn gọn nội dung chính của phương pháp điều khiển VRFT dựa trên nghiên cứu của Campi & cs. (2002).

Xem xét cấu trúc của hệ thống điều khiển cơ bản được chỉ ra như trong hình 2.

Trong sơ đồ cấu trúc trên bộ điều khiển $C(\theta)$ được tham số hóa bởi vector $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_v]^T$ như là:



Nguồn: Campi & cs. (2002).

Hình 2. Cấu trúc hệ điều khiển cơ bản

$$C(\theta) = \frac{\theta_{n+1}q^m + \dots + \theta_{v-1}q + \theta_v}{q^n + \theta_1q^{n-1} + \dots + \theta_{n-1}q + \theta_n}$$

Thực hiện duy nhất một lần thực nghiệm trên hệ thống, chúng ta thu được dữ liệu đầu vào u và đầu ra y . Hàm truyền đạt mong muốn từ đầu vào r tới đầu ra y là T_d , tín hiệu ảo $\bar{r}$ được đưa ra thỏa mãn điều kiện: $y = T_d \bar{r}$ sai lệch ảo được tính $\bar{e} = \bar{r} - y$. Hàm giá trị được đưa ra như sau:

$$J_v(\theta) = \|u - C(\theta)\bar{e}\| \quad (1)$$

Khi cực tiểu hóa hàm giá trị $J_v(\theta)$ chúng ta sẽ nhận được các tham số tối ưu cho bộ điều khiển $C(\theta)$ bộ điều khiển này sẽ làm cho đầu ra của hệ thống xấp xỉ với đầu ra mong muốn.

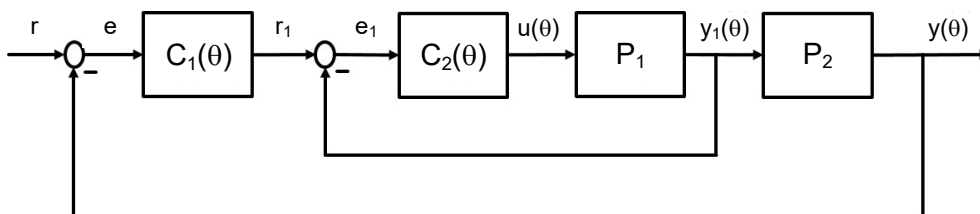
2.2.2. Mô hình hệ thống điều khiển tầng

Một hệ thống điều khiển tầng không bị ảnh hưởng bởi nhiễu được tham số hóa bởi véc tơ θ được giới thiệu trong (Bhavina, 2013) và chỉ ra như trong hình 3.

Tầng điều khiển bên trong bao gồm bộ điều khiển $C_1(\theta)$, đối tượng điều khiển P_1 , bộ điều khiển $C_2(\theta)$ sẽ thực hiện điều khiển phản hồi âm cho đối tượng P_1 .

Tầng điều khiển bên ngoài của hệ thống điều khiển tầng gồm có bộ điều khiển tầng ngoài $C_1(\theta)$ thực hiện điều khiển phản hồi âm cho đối tượng bao gồm vòng lặp kín bên trong có hàm truyền tương đương là $\frac{P_1 C_2(\theta)}{1 + P_1 C_2(\theta)}$ kết hợp

với đối tượng điều khiển vòng ngoài P_2 . Như vậy, đối tượng điều khiển của tầng điều khiển bên ngoài sẽ là $\frac{P_1 C_2(\theta) P_2}{1 + P_1 C_2(\theta)}$.



Nguồn: Bhavina (2013).

Hình 3. Cấu trúc hệ điều khiển tầng với các bộ điều khiển được tham số hóa

Hàm truyền đạt từ đầu vào r tới đầu ra y của hệ thống điều khiển tầng với tham số θ là

$$T(\theta) = \frac{P_1 P_2 C_1(\theta) C_2(\theta)}{1 + P_1 C_2(\theta) + P_1 P_2 C_1(\theta) C_2(\theta)}.$$

Chúng ta đưa ra một hàm truyền đạt kín mong muốn của hệ điều khiển tầng theo yêu cầu điều khiển là T_d . Lựa chọn một bộ tham số ban đầu θ^0 và giả thiết rằng bộ tham số này làm ổn định hệ thống điều khiển tầng. Đầu ra của hệ điều khiển tầng với tham số ban đầu θ^0 là $y^0 = y(\theta^0)$ khác biệt với đầu ra mong muốn $y_d = T_d r$.

Mục đích điều khiển là tìm được bộ tham số tối ưu θ^* từ việc cực tiểu hóa sai lệch $\|y(\theta^*) - T_d r\|$.

Quá trình cực tiểu hóa sai lệch này chúng ta chỉ sử dụng dữ liệu ban đầu $u^0 = u(\theta^0)$, $y_1^0 = y_1(\theta^0)$ và $y^0 = y(\theta^0)$ (thu được từ duy nhất một lần thực nghiệm).

Với các bộ tham số tối ưu đạt được, đầu ra tối ưu của hệ thống điều khiển tầng sẽ bám sát theo đầu ra mong muốn có nghĩa là chúng ta đạt được.

2.2.4. Thiết kế các bộ điều tối ưu cho hệ thống điều khiển tầng dựa trên phương pháp VRFT

Trong sơ đồ cấu trúc của hệ thống điều khiển tầng (Hình 3), trước tiên chúng ta tập trung vào vòng lặp điều khiển bên trong, áp dụng phương pháp VRFT được giới thiệu bởi Campi & cs. (2002) cho vòng điều khiển này, chúng ta đạt được hàm giá trị của hệ thống điều khiển tầng là:

$$J_{VT}(\theta) = \|u^0 - C_2(\theta)e_1\| \quad (2)$$

Trong đó e_1 là sai lệch giữa đầu ra ban đầu y_1^0 và đầu vào ảo $\bar{r}_1$ của vòng điều khiển bên trong $e_1 = \bar{r}_1 - y_1^0$. Tiếp theo, chú ý vào vòng điều khiển bên ngoài, sai lệch giữa đầu ra ban đầu y^0 và tín hiệu vào ảo $\bar{r}$ là $e = \bar{r} - y^0$.

Tín hiệu ảo ở đầu vào của hệ thống điều khiển tầng được tính như sau:

$$y^0 = T_d \bar{r} \Leftrightarrow \bar{r} = \frac{1}{T_d} y^0 \quad (3)$$

Lưu ý rằng tín hiệu ảo $\bar{r}_1$ cũng là đầu ra của $C_1(\theta)$ nên chúng ta có: $\bar{r}_1 = C_1(\theta)e$. Từ các biểu thức phía trên chúng ta tính được sai lệch e_1 :

$$\begin{aligned} e_1 &= C_1(\theta)e - y_1^0 = C_1(\theta)(\bar{r} - y^0) - y_1^0 \\ &= C_1(\theta)\left(\frac{1}{T_d} - 1\right)y_1^0 - y^0 \end{aligned} \quad (4)$$

Thay e_1 trong công thức (4) vào công thức (2) chúng ta sẽ đạt được hàm giá trị của hệ thống điều khiển tầng:

$$J_{VT}(\theta) = \left\| u^0 + C_2(\theta)y_1^0 - C_1(\theta)C_2(\theta)\left(\frac{1}{T_d} - 1\right)y^0 \right\| \quad (5)$$

Trong biểu thức (5), khi cực tiểu hóa $J_{VT}(\theta)$ chỉ cần các dữ liệu $\{u^0, y_1^0, y^0\}$ thu được từ duy nhất một lần thực nghiệm trên hệ thống điều khiển tầng.

2.2.5. Phân tích ý nghĩa khi cực tiểu hóa hàm giá trị $J_{VT}(\theta)$

Trong phần này chúng ta sẽ làm rõ tại sao khi cực tiểu hóa hàm giá trị của hệ thống điều

khuyến tầng (5) sẽ đạt được các tham số tối ưu cho các bộ điều khiển vòng trong và vòng ngoài. Nếu T_d là hàm truyền đạt kín mong muốn của hệ điều khiển tầng, thì $1 - T_d$ sẽ là hàm nhảy mong muốn của hệ thống điều khiển tầng.

Hàm truyền đạt hở mong muốn của hệ điều khiển tầng là tỉ số giữa hàm truyền đạt kín mong muốn T_d và hàm nhảy mong muốn $1 - T_d$ được ký hiệu là:

$$H_{T_d} : \frac{T_d}{1 - T_d} = H_{T_d}$$

Một cách tương tự, với tham số θ chúng ta có hàm truyền đạt hở của hệ điều khiển tầng là:

$$\frac{T(\theta)}{1 - T(\theta)} = H_T(\theta).$$

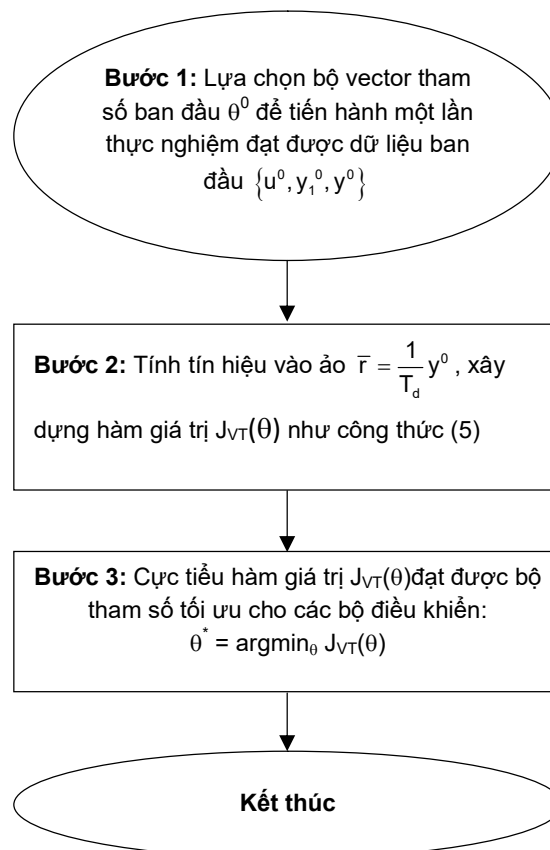
Mặt khác, từ cấu trúc hệ điều khiển tầng hình 3, tính được hàm truyền đạt hở $H_T(\theta)$ như là:

$$H_T(\theta) = \frac{P_1 P_2 C_1(\theta) C_2(\theta)}{1 + P_1 C_2(\theta)}.$$

Từ biểu thức của hàm giá trị (5), sau vài phép biến đổi hàm giá trị của hệ thống điều khiển tầng được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} J_{VT}(\theta) &= \left\| \left((1 + P_1 C_2(\theta) - P_1 P_2 C_1(\theta) C_2(\theta) \left(\frac{1}{T_d} - 1 \right)) u^0 \right) \right\| \\ &= \left\| \left((1 + P_1 C_2(\theta)) \left(1 - \frac{P_1 P_2 C_1(\theta) C_2(\theta)}{1 + P_1 C_2(\theta)} \frac{1}{H_{T_d}} \right) u^0 \right) \right\| \\ &= \left\| \left((1 + P_1 C_2(\theta)) \left(1 - \frac{H_T(\theta)}{H_{T_d}} \right) u^0 \right) \right\| \end{aligned} \quad (6)$$

Như vậy, nhìn vào biểu thức (6) chúng ta thấy rằng cực tiểu hóa hàm giá trị tương ứng với việc cực tiểu hóa sai lệch giữa hàm truyền hở $H_T(\theta)$ và hàm truyền hở mong muốn H_{T_d} . Nếu chúng ta đạt được sự tuyệt đối của việc cực tiểu hóa hàm giá trị (6), nghĩa là $J_{VT}(\theta) \approx 0$ thì có thể đạt được $H_T(\theta) \approx H_{T_d}$.



Hình 4. Thuật toán sử dụng phương pháp VRFT cho hệ thống điều khiển tầng

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thuật toán sử dụng phương pháp VRFT thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống điều khiển tầng

Nội dung của phương pháp VRFT để thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống điều khiển tầng được tóm tắt theo thuật toán chỉ ra như hình 4.

Lưu ý trong bước 1 của thuật toán phương pháp VRFT cho hệ thống điều khiển tầng, việc lựa chọn vector tham số ban đầu dựa trên kinh nghiệm, bộ tham số này thường được lựa chọn sao cho các giá trị bị chặn trên ở một giới hạn nhất định. Trong bước 3 của thuật toán để cực tiểu hóa hàm giá trị, có thể sử dụng các thuật toán tối ưu đối với hàm phi tuyến như phương pháp bình phương nhỏ nhất và phương pháp bình phương tối thiểu.

3.2. Kết quả mô phỏng

Để thể hiện tính đúng đắn và hiệu quả của phương pháp nghiên cứu, chúng ta xem xét một ví dụ cụ thể. Sử dụng phần mềm Matlab/Simulink tiến hành mô phỏng phân tích kết quả.

Trong lĩnh vực điều khiển tự động, đối tượng điều khiển được phân thành nhiều loại như đối tượng ổn định, không ổn định, đối tượng có pha cực tiểu, pha không cực tiểu, đối tượng có chứa thành phần thời gian trễ... Đối với mỗi loại đối tượng, chúng ta sẽ có các chiến lược thiết kế bộ điều khiển phù hợp. Trong khuôn khổ nội dung nghiên cứu của bài báo này chỉ tập trung vào nghiên cứu sử dụng phương pháp VRFT cho

lớp các đối tượng điều khiển ổn định có pha cực tiểu.

Hai đối tượng của hệ thống điều khiển tầng với cấu trúc như trong hình 3 được giả thiết như sau:

$$P_1 = \frac{s+7}{s^2+3s+2}$$

$$P_2 = \frac{9}{s^2+7s+5}$$

Nhiệm vụ điều khiển ở đây là phải tìm các bộ điều khiển tối ưu $C_1(\theta^*)$ và $C_2(\theta^*)$ để sao cho với các bộ điều khiển này, đầu ra của hệ thống điều khiển tầng $y(\theta^*)$ sẽ bám sát theo đầu ra mong muốn y_d , nghĩa là $y(\theta^*) \approx y_d$

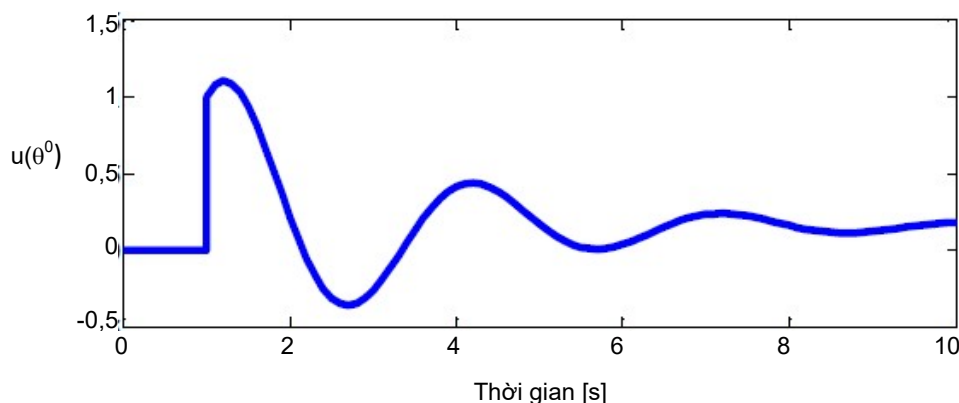
Với tham số: $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$, bộ điều khiển vòng trong và vòng ngoài của hệ thống điều khiển tầng được lựa chọn với cấu trúc như sau:

$$C_1(\theta) = \frac{\theta_1 s + \theta_2}{s}$$

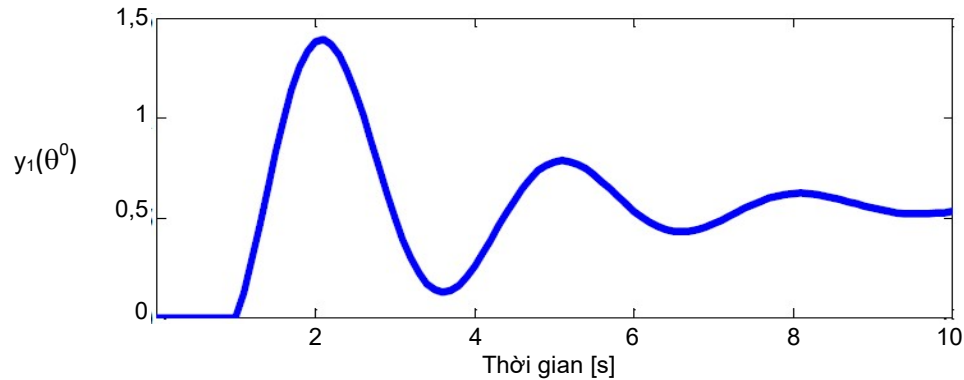
$$C_2(\theta) = \frac{\theta_3 s + \theta_4}{s}$$

Lựa chọn mô hình mẫu $T_d = \frac{1}{s+1}$. Bộ vector

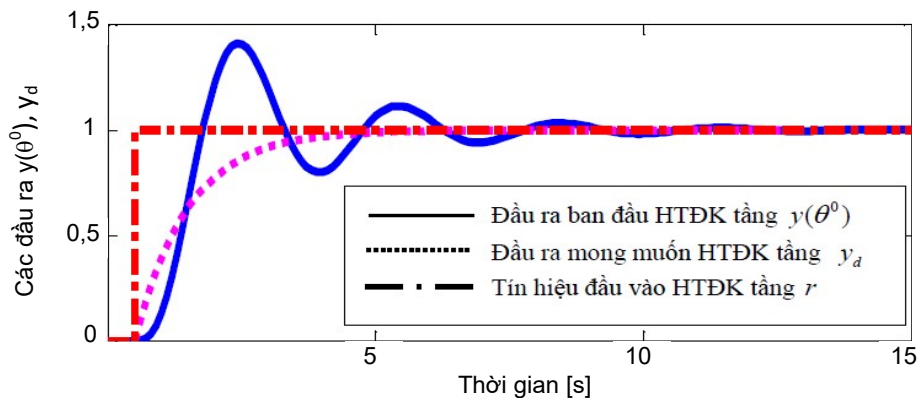
tham số ban đầu được lựa chọn là: $\theta^0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, sử dụng bộ tham số ban đầu này để tiến hành một lần thực nghiệm trên hệ thống điều khiển tầng có cấu trúc như trong hình 3, sẽ thu được đồ thị của các dữ liệu ban đầu $\{u(\theta^0), y_1(\theta^0), y(\theta^0)\}$ như trong các hình 5, 6, 7.



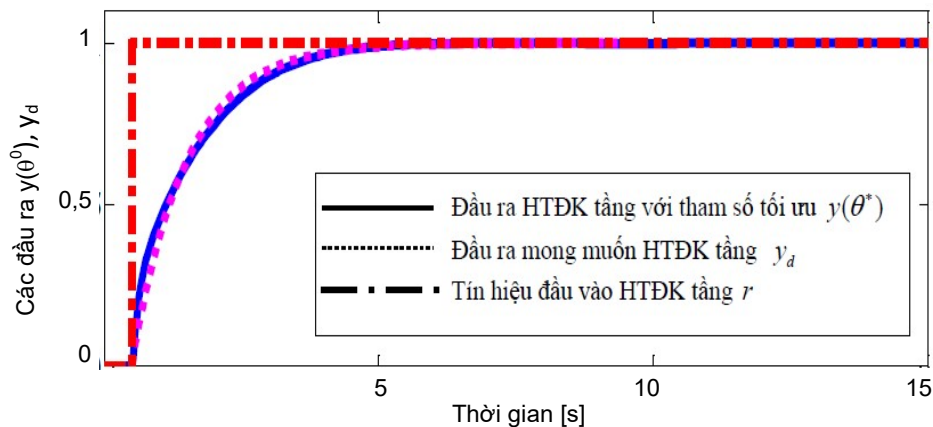
Hình 5. Tín hiệu vào với tham số ban đầu $u(\theta^0)$



Hình 6. Đầu ra ban đầu của vòng điều khiển trong $y_1(\theta^0)$



Hình 7. Tín hiệu ra ban đầu HTĐK tầng $y(\theta^0)$, tín hiệu vào tham chiếu r , tín hiệu ra mong muốn y_d



Hình 8. Tín hiệu ra tối ưu $y(\theta^*)$, tín hiệu tham chiếu r , tín hiệu ra mong muốn y_d

Hình 7 minh họa đồ thị của các tín hiệu ra ban đầu hệ thống điều khiển tầng, tín hiệu ra ban đầu $y(\theta^0)$ được thể hiện bằng nét đậm, tín hiệu đầu vào tham chiếu r được minh họa bằng nét gạch - chấm, tín hiệu đầu ra mong muốn $y_d = T_d r$ được vẽ bằng nét chấm.

Trong hình 7, thấy rằng khi chưa có các bộ điều khiển tối ưu chỉ với bộ tham số ban đầu θ^0 , tín hiệu ra ban đầu của hệ thống điều khiển tầng $y(\theta^0)$ có sai lệch lớn, không bám sát tín hiệu ra mong muốn y_d , sai lệch giữa chúng là: $\Delta y^0 = |y(\theta^0) - y_d| = 3,5568$.

Tiếp theo bằng cách sử dụng thuật toán vừa trình bày như chỉ ra trong mục 3.1, cực tiểu hàm mục tiêu $J_{VT}(\theta)$ (biểu thức (5)) bằng thuật toán CMA-ES (Hansen, 2011) viết trên phần mềm Matlab. Sau khi chạy phần mềm, đạt được các tham số tối ưu cho các bộ điều khiển như sau:

$$\theta^* = [0,7368 \quad 0,5101 \quad 3,4334 \quad 0,0621]^T$$

Đây là các tham số tối ưu cho các bộ điều khiển vòng trong $C_2(\theta^*)$ và vòng ngoài $C_1(\theta^*)$ của hệ thống điều khiển tầng. Các tham số tối ưu này sẽ được sử dụng để tiến hành thực nghiệm lại trên hệ thống điều khiển tầng (Hình 3) để thu được kết quả như trong hình 8.

Trong hình 8 là các đầu ra hệ thống điều khiển tầng sử dụng các bộ điều khiển với vectơ tham số tối ưu θ^* , chúng ta thấy rằng đầu ra của hệ thống điều khiển tầng với tham số tối ưu $y(\theta^*)$ – nét đậm bám rất sát với đầu ra mong muốn y_d – nét chấm, sai lệch giữa chúng là: $\Delta y^* = |y(\theta^*) - y_d| = 0,1127$.

Điều đó cho thấy rằng chúng ta hoàn toàn đạt được mục đích điều khiển với các tham số tối ưu các bộ điều khiển làm cho đầu ra của hệ thống điều khiển tầng bám sát theo đầu ra mong muốn.

Kết quả trong hình 7 và hình 8 cho thấy, khi chưa có các bộ điều khiển tối ưu, đầu ra ban đầu của hệ thống điều khiển tầng không bám sát theo đầu ra mong muốn (Hình 7), sai lệch giữa chúng lớn. Với các tham số tối ưu đạt được, các bộ điều khiển tối ưu làm cho đầu ra của hệ thống điều khiển tầng bám sát theo đầu ra mong muốn, sai lệch giữa chúng rất nhỏ. Điều đó cho thấy hiệu quả của phương pháp trình bày

trong việc thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống điều khiển tầng.

4. KẾT LUẬN

Phương pháp nghiên cứu này giúp chúng ta đạt được các bộ điều khiển tối ưu (bộ điều khiển vòng trong và vòng ngoài) của hệ thống điều khiển tầng. Phương pháp được thực hiện mà không cần trải qua khâu nhận dạng đối tượng điều khiển. Kết quả mô phỏng cho chúng ta thấy rằng, các bộ điều khiển tối ưu đạt được đã làm cho đầu ra của hệ thống điều khiển tầng bám sát với đầu ra mong muốn.

Trong thời gian tới hướng mở rộng và phát triển phương pháp nghiên cứu này sẽ là áp dụng cho các lớp đối tượng điều khiển không ổn định và có pha không cực tiểu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Anagha (2014). Cascade speed control of DC motor. *International Journal of Electrical, Electronics and data communication*. 2(6): 78-81.
- Bhavina R. (2013). Cascade control of DC motor with advance controller. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*. 1(1): 18-20.
- Campi M.C., Lecchini A. & Savaresi M.S. (2002). Virtual reference feedback tuning : a direct method for the design of feedback controllers. *Automatica Magazine*. 38(8): 1337-1346.
- Hansen N. (2011). The CMA Evolution Strategy, A Tutorial. Retrieved from <http://www.lri.fr/hansen/cmatutorial.pdf> on August 15, 2021.
- Yin Q.C., Wang T.H., Sun Q. & Zhao L. (2019). Improved Cascade Control System for a Class of Unstable Processes with Time Delay. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 17(1): 126-135.