

# TỐI ƯU HÓA BỘ ĐIỀU KHIỂN IMC TRONG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TẦNG BẰNG FRIT

Nguyễn Thị Hiền

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

*Tác giả liên hệ: nthien@vnua.edu.vn*

Ngày nhận bài: 01.06.2020

Ngày chấp nhận đăng: 21.08.2020

## TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm mục tiêu điều chỉnh đồng thời thông số của các bộ điều khiển IMC trong hệ thống điều khiển tầng bằng FRIT - một thuật toán sử dụng trực tiếp dữ liệu thực nghiệm - cho các đối tượng tuyến tính, bất biến theo thời gian và là hệ pha cực tiểu. Phương pháp yêu cầu chỉ duy nhất một tập dữ liệu vào/ra thu thập từ hệ thống mà không đòi hỏi mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Kết quả là có thể nhận được các bộ điều khiển với thông số tối ưu cho tín hiệu ra mong muốn của hệ thống, đồng thời nhận được mô hình toán học của đối tượng điều khiển.

Từ khóa: FRIT, điều khiển tầng, IMC, dữ liệu thực nghiệm.

## Optimum IMC Controllers in Cascade Control Systems Using FRIT

### ABSTRACT

The goal of this study was using a data-driven approach - FRIT, that simultaneously tunes IMC controllers in the cascade systems, in which the plants are linear, time-invariant and minimum phase. The algorithm does not require mathematical models of the controlled plants but only a set of input/output data collected from the closed-loop system. The results are not only optimal IMC controllers for the desired tracking property but also mathematical models of the actual plants.

Keywords: FRIT, cascade control, IMC, data - driven approach.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống điều khiển tầng được sử dụng rộng rãi trong điều khiển các quá trình công nghệ do có khả năng loại bỏ tác động của nhiễu, cho đáp ứng nhanh và tăng tính ổn định của hệ thống (Azar & cs., 2014). Thông thường, các bộ điều khiển trong hệ thống được thiết kế lần lượt, thiết kế cho vòng điều khiển trong trước rồi dựa trên kết quả đó để thiết kế cho bộ điều khiển ở vòng ngoài. Do vậy, việc thiết kế các bộ điều khiển trong hệ thống điều khiển tầng thường khó khăn và tốn thời gian hơn so với thiết kế hệ thống điều khiển vòng đơn.

Mặt khác, IMC (Morari & Rafiriou, 1989) là một cấu trúc điều khiển được sử dụng khá phổ biến trong đó bộ điều khiển có chứa mô hình của đối tượng điều khiển. Việc kết hợp cấu trúc IMC

trong hệ thống điều khiển tầng sẽ giúp hệ thống tăng tính bền vững và linh hoạt trong điều chỉnh (Cesca & cs., 2005). Theo nghiên cứu của Jeng & cs. (2012), để thiết kế hệ thống, đối tượng trước tiên được nhận dạng dựa vào khai triển chuỗi B-spline đáp ứng quá độ của hệ thống. Sau đó hai bộ điều khiển PID được xấp xỉ và điều chỉnh tự động dựa trên mô hình điều khiển IMC. Lee & cs. (1998) cũng đề xuất thuật toán điều chỉnh đồng thời các bộ điều khiển IMC - PID, dựa trên việc xấp xỉ đặc tính động học của vòng điều khiển trong tiến tới một mô hình mẫu, trên cơ sở đó điều chỉnh bộ điều khiển sơ cấp. Tuy nhiên, việc điều chỉnh này có thể gặp phải sai số do khi xấp xỉ bộ điều khiển IMC - PID cho vòng trong, rất khó để có thể đạt được chính xác mô hình mẫu cho vòng này. Trong nghiên cứu của Cesca & cs. (2005), các tác giả cũng đề xuất một phương pháp

sử dụng IMC dựa trên các mô hình cho sẵn của đối tượng, trong đó hằng số thời gian của bộ lọc được xác định để đảm bảo tính ổn định bên vững của hệ thống.

Có thể nhận thấy, tất cả các phương pháp thiết kế bộ điều khiển được đề xuất trong các nghiên cứu trên đều dựa trên mô hình toán học của đối tượng điều khiển (model-based methods), nghĩa là trước khi thiết kế bộ điều khiển, cần xây dựng mô hình toán học hoặc nhận dạng đối tượng, đây là việc khá khó khăn trong thực tế, đòi hỏi thời gian và công sức. Trong những năm gần đây xuất hiện một hướng nghiên cứu mới, sử dụng trực tiếp dữ liệu thực nghiệm thu thập từ hệ thống để tổng hợp thông số của bộ điều khiển (data-based methods), mà không đòi hỏi mô hình toán học của đối tượng, điều này giúp tránh được các khó khăn trong quá trình nhận dạng đối tượng. Có thể kể đến một số phương pháp điển hình, như IFT (Hjalmarsson & cs., 1998), VRFT (Campi & cs., 2002), FRIT (Souma & cs., 2004; Kaneko & cs., 2010) đã được áp dụng hiệu quả cho các hệ thống điều khiển vòng đơn. Trong những nghiên cứu gần đây, Nguyen & Kaneko đã phát triển thuật toán FRIT, sử dụng trực tiếp chỉ duy nhất một tập dữ liệu vào/ra của hệ thống để xác định đồng thời thông số của các bộ điều khiển PI trong hệ thống điều khiển tầng (Nguyen & Kaneko, 2015; 2016; Nguyễn Thị Hiền & Nguyễn Văn Đạt, 2016; Nguyễn Thị Hiền, 2017), mà không đòi hỏi mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Trong nghiên cứu của Nguyễn Thị Hiền (2017), tác giả đã mở rộng thuật toán FRIT cho điều chỉnh hệ thống điều khiển tầng có tính đến tác động của nhiễu. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chỉ cho kết quả là các bộ điều khiển tối ưu, mà không cho ra mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Trong thực tế, mô hình toán học nhận được của đối tượng mang nhiều ý nghĩa, có thể sử dụng trong các bài toán dự báo, phát hiện, chẩn đoán lỗi, hoặc tối ưu hóa,... (Kaneko & cs., 2010). Dựa trên đặc điểm cấu trúc bộ điều khiển IMC có chứa mô hình của đối tượng điều khiển, việc sử dụng thuật toán FRIT cho hệ thống với các bộ điều khiển IMC sẽ cho kết quả không những là bộ

điều khiển tối ưu mà còn cho mô hình toán học của đối tượng. Kết quả này đã được thể hiện trong nghiên cứu của Kaneko & cs. (2010) đối với hệ thống điều khiển vòng đơn.

Từ những cơ sở trên, bài báo đề xuất thuật toán FRIT cho việc điều chỉnh đồng thời thông số của các bộ điều khiển IMC trong hệ thống điều khiển tầng. Thuật toán không đòi hỏi mô hình toán học của đối tượng điều khiển, chỉ yêu cầu duy nhất một tập dữ liệu vào/ra thu thập từ hệ thống. Kết quả sẽ là các bộ điều khiển với thông số tối ưu cho phép hệ thống bám theo một mô hình mẫu cho trước, đồng thời còn cho mô hình toán học của đối tượng điều khiển.

*Một số kí hiệu:*  $\mathfrak{R}$  - tập các số thực;  $\mathfrak{R}^n$  - không gian vector thực, n chiều. Một tín hiệu w theo thời gian được kí hiệu là w(t). Tín hiệu ra y của hệ thống với hàm truyền đạt G có tín hiệu vào u sẽ được viết gọn là  $y = Gu$ . Với một dãy dữ liệu theo thời gian:  $w = \{w(\Delta), w(2\Delta), \dots, w(N\Delta)\}$ , định nghĩa:  $\|w\|_N^2 := \sum_{k=1}^N (w(k\Delta))^2$ .

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Phương pháp nghiên cứu

Kế thừa và sử dụng kết quả của các công trình nghiên cứu trước đó về hệ thống điều khiển tầng với bộ điều khiển IMC, bài báo phát triển thuật toán FRIT, sử dụng trực tiếp một bộ dữ liệu thực nghiệm trong điều chỉnh thông số của bộ điều khiển để xây dựng phương pháp xác định đồng thời thông số tối ưu của các bộ điều khiển IMC trong hệ thống điều khiển tầng và mô hình toán học của đối tượng điều khiển.

Để minh họa và kiểm nghiệm thuật toán đã xây dựng, bài báo sử dụng Matlab/Simulink viết chương trình mô phỏng với một hệ thống điều khiển cụ thể.

### 2.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là các bộ điều khiển IMC trong hệ thống điều khiển tầng nối tiếp với hai vòng điều khiển. Trong các hệ thống này, đối tượng điều khiển được giả thiết

là tuyến tính, bất biến theo thời gian (LTI) và là các hệ pha cực tiểu (minimum phase), không biết trước mô hình toán học (unknown plant). Phạm vi nghiên cứu của bài báo là các hệ thống điều khiển một vào - một ra SISO (single input - single output), cho phép thu thập được các tín hiệu vào/ra. Hệ thống được giả thiết làm việc trong điều kiện lý tưởng, không có tác động của nhiễu và các bộ điều khiển trong hệ thống có thể thay đổi được các thông số.

### 3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

#### 3.1. Hệ thống điều khiển tầng với các bộ điều khiển IMC

Xét hệ thống điều khiển tầng với các bộ điều khiển IMC được mô tả trong hình 1 (Cesca & Marchetti, 2005; Jeng & Lee, 2012), trong đó  $P_1$  và  $P_2$  là hàm truyền của đối tượng điều khiển trong các vòng,  $C_1$  và  $C_2$  là các bộ điều khiển,  $\tilde{P}_2$  là mô hình của đối tượng ở vòng trong và  $\tilde{P}_B$  là mô hình tương đương của hàm truyền vòng trong nối tiếp với đối tượng điều khiển của vòng ngoài. Các tín hiệu  $r$ ,  $u$  và  $y_2$ ,  $y_1$  lần lượt là các tín hiệu đặt, tín hiệu vào và tín hiệu ra của hệ thống. Hàm truyền đạt của vòng trong được xác định:

$$G_2 = \frac{C_2 P_2}{1 + C_2 (P_2 - \tilde{P}_2)} \quad (1)$$

Hàm truyền đạt  $\tilde{P}_B$  là mô hình tương đương của vòng điều khiển trong nối tiếp với đối tượng điều khiển của vòng ngoài:

$$\tilde{P}_B = G_2 P_1 = \frac{C_2 P_2}{1 + C_2 (P_2 - \tilde{P}_2)} P_1 \quad (2)$$

Hàm truyền đạt của hệ thống cho ở hình 1 được xác định:

$$G_{ry} = \frac{C_1 C_2 P_2 P_1}{(1 - C_1 \tilde{P}_B)(1 + C_2 (P_2 - \tilde{P}_2)) + C_1 C_2 P_2 P_1} \quad (3)$$

#### 3.2. Xây dựng bài toán

Giả thiết đối tượng điều khiển  $P_1$  và  $P_2$  là tuyến tính, bất biến theo thời gian và chưa biết mô hình toán học, ngoại trừ cấu trúc của chúng (biết bậc của đa thức tử và đa thức mẫu). Mô hình toán học  $\tilde{P}_1$  và  $\tilde{P}_2$  tương ứng của chúng

được tham số hóa bởi vector  $\rho_P = \begin{bmatrix} \rho_{P_1} \\ \rho_{P_2} \end{bmatrix}$  như sau:

$$\tilde{P}_1(\rho_{P_1}) = \frac{a_\mu s^\mu + \dots + a_1 s + a_0}{b_\gamma s^\gamma + \dots + b_1 s + 1}, \mu \leq \gamma \quad (4)$$

và:

$$\tilde{P}_2(\rho_{P_2}) = \frac{a_k s^k + \dots + a_1 s + a_0}{b_1 s^1 + \dots + b_1 s + 1}, k \leq 1 \quad (5)$$

trong đó:  $\rho_{P_1} = [a_\mu \dots a_0 \ b_\gamma \dots b_1]^T \in \mathfrak{R}^{\mu+\gamma+1}$  và

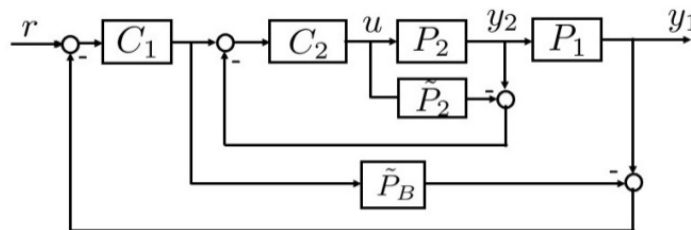
$$\rho_{P_2} = [a_k \dots a_0 \ b_1 \dots b_1]^T \in \mathfrak{R}^{k+1+1}.$$

Đối với vòng trong, theo Azar & cs. (2014) và Lee & cs. (1998), bộ điều khiển được xây dựng:

$$C_2 = \tilde{P}_2^{-1} F = \tilde{P}_2(\rho_P)^{-1} \frac{1}{(\lambda_2 s + 1)^{n_2}} \quad (6)$$

trong đó:  $F = \frac{1}{(\lambda_2 s + 1)^{n_2}}$  là bộ lọc với tham

số  $\lambda_2$  được điều chỉnh để đạt được đầu ra mong muốn, số mũ  $n_2$  được lựa chọn sao cho bộ điều khiển  $C_2$  là khả thi. Như vậy, có thể thấy bộ điều khiển vòng trong  $C_2$  phụ thuộc cả vào vector  $\rho_P$  và  $\lambda_2$  nên ta ký hiệu là  $C_2(\rho_P, \lambda_2)$ .



Hình 1. Hệ thống điều khiển tầng với các bộ điều khiển IMC

Bộ điều khiển  $C_1$  của vòng ngoài được thiết kế dựa trên mô hình tương đương  $\tilde{P}_B$  (nối tiếp của vòng điều khiển trong với đối tượng  $P_1$ ). Từ các biểu thức (2, 4-6) có thể nhận thấy  $\tilde{P}_B$  cũng phụ thuộc vào  $\rho_P$  và  $\lambda_2$ , do đó  $C_1$  cũng phụ thuộc vào các tham số này. Giả thiết rằng hệ thống được thiết kế để bám theo một mô hình mẫu  $T_d = \frac{1}{(\lambda_1 s + 1)^{n_1}}$  cho trước, bộ điều khiển  $C_1$  của vòng ngoài được xây dựng (Kaneko & cs., 2010):

$$C_1(\rho_P, \lambda_2) = \tilde{P}_B(\rho_P, \lambda_2)^{-1} T_d = \tilde{P}_B(\rho_P, \lambda_2)^{-1} \frac{1}{(\lambda_1 s + 1)^{n_1}} \quad (7)$$

trong đó  $n_1$  phải được chọn sao cho bộ điều khiển  $C_1$  là hợp thức, thông số  $\lambda_1$  thể hiện chất lượng mong muốn của hệ thống và được cho trước. Từ biểu thức (6) và (7), có thể thấy các bộ điều khiển  $C_1$  và  $C_2$  trong hệ thống đều phụ thuộc vào  $\rho_P$  và  $\lambda_2$ , để thuận tiện, chúng ta định nghĩa vector  $\rho := \begin{bmatrix} \rho_P \\ \lambda_2 \end{bmatrix}$ , từ đó ta có  $C_1(\rho)$  và  $C_2(\rho)$ .

Hệ thống điều khiển tầng với các bộ điều khiển được tham số hóa bởi vector  $\rho$  thể hiện trong hình 2. Các tín hiệu vào/ra của hệ thống cũng phụ thuộc vào  $\rho$  nên ký hiệu chúng là  $u(\rho)$  và  $y_2(\rho)$ ,  $y_1(\rho)$  tương ứng. Bài toán đặt ra là, bằng việc sử dụng trực tiếp tập dữ liệu vào/ra

thu thập được từ hệ thống, xác định bộ thông số  $\rho^*$  sao cho hệ thống điều khiển đạt được các chất lượng mong muốn, thể hiện qua tín hiệu ra  $y_1(\rho^*)$  của hệ thống kín bám theo tín hiệu ra mong muốn  $y_d := T_d r$ . Nghĩa là, hàm mục tiêu của bài toán:

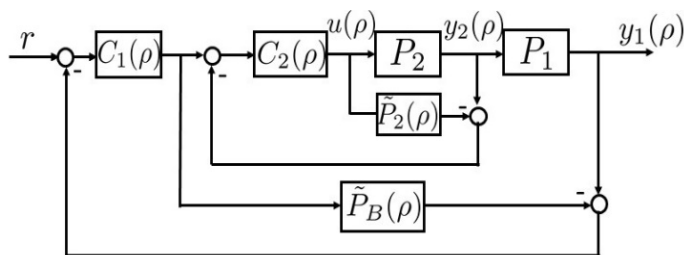
$$\min_{\rho} J(\rho) = \|y(\rho) - T_d r\|_N^2 \quad (8)$$

sẽ được tối ưu bằng việc sử dụng trực tiếp các dữ liệu thực nghiệm thu được từ hệ thống kín. Trên thực tế, việc tối ưu hàm mục tiêu (8) yêu cầu càng ít dữ liệu càng tốt. Thuật toán FRIT được trình bày dưới đây giúp chúng ta có thể tối ưu hàm mục tiêu (8) bằng cách chỉ sử dụng duy nhất một tập dữ liệu vào/ra của hệ thống.

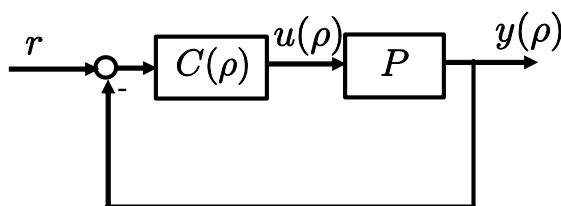
**3.3. FRIT (Souma & cs., 2004)**

Xét một hệ thống điều khiển kín SISO (vòng đơn) cho ở hình 3, trong đó:  $P$  là hàm truyền của đối tượng điều khiển LTI,  $C$  là bộ điều khiển,  $r$  là tín hiệu kích thích (tín hiệu đặt),  $u$ ,  $y$  lần lượt là các tín hiệu vào, ra của hệ thống. Với giả thiết người thiết kế không biết mô hình toán học của đối tượng, bộ điều khiển được tham số hóa bởi vector  $\rho$ , ví dụ, với bộ điều khiển PI, ta có:  $C(\rho) = \frac{K_P s + K_I}{s}$  thì  $\rho = \begin{bmatrix} K_P \\ K_I \end{bmatrix}$ .

Khi đó, tín hiệu vào/ra của hệ thống kín cũng sẽ phụ thuộc vào  $\rho$ , tương ứng được ký hiệu là  $u(\rho)$  và  $y(\rho)$  (Hình 3).



Hình 2. Hệ thống điều khiển tầng với các bộ điều khiển được tham số hóa



Hình 3. Hệ thống điều khiển vòng đơn với bộ điều khiển được tham số hóa

Trước tiên, giả thiết bộ thông số ban đầu  $\rho^0$  và tiến hành thực nghiệm để thu thập tập dữ liệu vào/ra  $\{u(\rho^0)/y(\rho^0)\}$  của hệ thống kín. Bộ điều khiển  $C(\rho^0)$  được giả thiết là có thể làm cho hệ thống kín ổn định BIBO (bounded input - bounded output). Sử dụng tập dữ liệu thực nghiệm này để xây dựng một tín hiệu đặt “ảo” (fictitious reference signal):

$$\tilde{r}(\rho) = C(\rho)^{-1}u(\rho^0) + y(\rho^0) \quad (9)$$

Chúng ta có thể thấy, với tín hiệu kích thích (9), tín hiệu ra của hệ thống kín với bất kỳ tham số  $\rho$  nào đều bằng với tín hiệu ra ban đầu  $y(\rho^0)$  của hệ thống, với chú ý rằng:  $y(\rho) = Pu(\rho)$

$$\begin{aligned} y(\rho) &= \frac{C(\rho)P}{1 + C(\rho)P} \tilde{r}(\rho) \\ &= \frac{C(\rho)P}{1 + C(\rho)P} \left( \frac{1}{C(\rho)} u(\rho^0) + y(\rho^0) \right) \equiv y(\rho^0) \end{aligned} \quad (10)$$

Từ đó xây dựng hàm mục tiêu trong miền ảo:

$$\min_{\rho} J_F(\rho) = \|y(\rho^0) - T_d \tilde{r}(\rho)\|_N^2 \quad (11)$$

và xác định thông số tối ưu  $\rho^* = \arg \min_{\rho} J_F(\rho)$  bằng các thuật toán tối ưu đã biết, tương ứng ta có bộ điều khiển  $C(\rho^*)$  tối ưu. Nghĩa là, hệ thống với bộ điều khiển  $C(\rho^*)$  có tín hiệu ra có thể bám theo đường đặc tính mẫu  $T_d r$  cho trước. Tính tương đương của các hàm mục tiêu (8) và (11) đã được chứng minh chi tiết bởi Souma & cs. (2004). Chú ý rằng, hàm mục tiêu  $J_F(\rho)$  chỉ phụ thuộc vào các dữ liệu ban đầu  $u(\rho^0)/y(\rho^0)$ , nên việc cực tiểu hóa  $J_F(\rho)$  có thể thực hiện *off-line* bằng các phương pháp tính toán tối ưu.

Như vậy, bằng việc chỉ sử dụng một tập dữ liệu vào/ra  $\{u(\rho^0)/y(\rho^0)\}$  của hệ thống kín, ta có thể tìm được thông số tối ưu của bộ điều khiển, nghĩa là khi sử dụng bộ điều khiển với thông số này, đáp ứng của hệ thống kín sẽ đạt được các yêu cầu mong muốn.

## 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### 4.1. FRIT với hệ thống điều khiển tầng

Xét hệ thống điều khiển tầng với các bộ điều khiển được tham số hóa ở hình 2. Giả thiết

một bộ thông số ban đầu  $\rho^0$  và tiến hành thực nghiệm để thu thập các dữ liệu  $\{u(\rho^0), y_2(\rho^0), y_1(\rho^0)\}$  từ hệ thống, tín hiệu kích thích ‘ảo’  $\tilde{r}(\rho)$  được đề xuất:

$$\begin{aligned} \tilde{r}(\rho) &= C_1(\rho)^{-1}C_2(\rho)^{-1}u(\rho^0) - C_1(\rho)^{-1}\tilde{P}_2u(\rho^0) \\ &\quad - C_2(\rho)^{-1}\tilde{P}_B u(\rho^0) + \tilde{P}_2\tilde{P}_B u(\rho^0) \\ &\quad + C_1(\rho)^{-1}y_2(\rho^0) - \tilde{P}_B y_2(\rho^0) + y_1(\rho^0) \end{aligned} \quad (12)$$

Nhận thấy, với tín hiệu kích thích (12), tín hiệu ra của hệ thống ứng với bộ thông số  $\rho$  bất kỳ luôn luôn bằng với tín hiệu ra  $y_1(\rho^0)$  ứng với bộ thông số  $\rho^0$  ban đầu. Thật vậy, sử dụng  $G_{ry}$  cho ở biểu thức (3), ta luôn có:

$$y_1(\rho) = G_{ry}(\rho)\tilde{r}(\rho) \equiv y_1(\rho^0) \quad (13)$$

với chú ý các mối quan hệ:  $y_2(\rho) = \frac{1}{P_1}y_1(\rho)$

và  $u(\rho) = \frac{1}{P_1 P_2}y_1(\rho)$  trong hệ thống.

Hàm mục tiêu được xác định:

$$J_F(\rho) := \|y_1(\rho^0) - T_d \tilde{r}(\rho)\|_N^2 \quad (14)$$

Thay  $\tilde{r}(\rho)$  rút ra từ biểu thức (13) vào (14) ta có thể viết lại hàm mục tiêu:

$$J_F(\rho) = \left\| \left( 1 - \frac{T_d}{G_{ry}(\rho)} \right) y_1(\rho^0) \right\|_N^2 \quad (15)$$

Biểu thức (15) cho thấy, việc cực tiểu hóa hàm mục tiêu cũng là nhằm điều chỉnh để hệ thống bám theo một mô hình mẫu  $T_d$  cho trước. Chú ý rằng việc tối ưu hàm mục tiêu (14) với tín hiệu “ảo”  $\tilde{r}(\rho)$  trong biểu thức (12) chỉ yêu cầu một tập dữ liệu duy nhất  $\{u(\rho^0), y_2(\rho^0), y_1(\rho^0)\}$  nghĩa là chúng ta có thể thực hiện tối ưu hóa *off-line* hàm mục tiêu (14).

### 4.2. Sự đạt được đồng thời mô hình toán học của đối tượng điều khiển

Xét hệ thống điều khiển tầng với các đối tượng được tham số hóa như ở hình 2. Với các bộ điều khiển được xây dựng theo (6) và (7), biểu thức (3) cho thấy nếu chúng ta có thể điều chỉnh để đạt được  $P_1 = \tilde{P}_1$  và  $P_2 = \tilde{P}_2$  thì hàm truyền đạt

hệ thống hiển nhiên bằng với mô hình mẫu:  $G_{ry}(\rho) = T_d$ , chú ý rằng khi  $P_2 = \tilde{P}_2$  thì  $\tilde{P}_B = \tilde{P}_1 F$ . Ngược lại, nếu có thể điều chỉnh để hệ thống bám theo mô hình mẫu:  $G_{ry}(\rho) = T_d$ , sử dụng biểu thức (6) và (7) ta có hàm truyền đạt của hệ thống theo biểu thức (16) hay (17).

Với  $G_{ry}(\rho) = T_d$  ta có biểu thức 18.

Biểu thức (18) cho thấy, nếu chúng ta có thể đạt được  $P_2 = \tilde{P}_2$  thì cũng đồng thời nhận được  $P_1 = \tilde{P}_1$ . Từ các phân tích này có thể rút ra, với mô hình mẫu  $T_d$  cho trước, hệ thống điều khiển tầng với các bộ điều khiển được xây dựng bởi các biểu thức (6) và (7) sẽ bám theo mô hình mẫu, nghĩa là  $G_{ry}(\rho) = T_d$  khi và chỉ khi đồng thời đạt được  $P_1 = \tilde{P}_1(\rho)$  và  $P_2 = \tilde{P}_2(\rho)$ .

Như vậy, có thể thấy việc sử dụng thuật toán FRIT trong điều chỉnh tối ưu thông số của các bộ điều khiển IMC nhằm bám theo một mô hình mẫu  $T_d$  sẽ cho kết quả không những là các bộ điều khiển tối ưu mà còn có được mô hình toán học của đối tượng điều khiển.

### 4.3. Thuật toán

Thuật toán FRIT nhằm xác định thông số tối ưu của các bộ điều khiển IMC trong hệ thống điều khiển tầng có thể tóm lược như sau:

*Bước 1:* Tham số hóa mô hình của đối tượng điều khiển theo biểu thức (4) và (5). Bộ điều khiển được xác định theo các biểu thức (6) và (7).

*Bước 2:* Giả thiết bộ thông số ban đầu  $\rho^0$  và mô hình mẫu  $T_d$  đặc trưng cho chất lượng mong muốn của hệ thống.

Bộ thông số  $\rho^0$  được giả thiết là có thể làm hệ thống ổn định BIBO.

*Bước 3:* Tiến hành làm thực nghiệm và thu

$$G_y = \frac{T_d \tilde{P}_B^{-1} \tilde{P}_2^{-1} F P_2 P_1}{1 + \tilde{P}_2^{-1} F (P_2 - \tilde{P}_2) + T_d \tilde{P}_B^{-1} \tilde{P}_2^{-1} F P_2 P_1 - T_d - T_d \tilde{P}_2^{-1} F (P_2 - \tilde{P}_2)} \quad (16)$$

$$G_{ry} = \frac{T_d \tilde{P}_B^{-1} \tilde{P}_2^{-1} F P_2 P_1}{(1 - T_d) \left( 1 - F (1 - \tilde{P}_2^{-1} P_2) \right) + T_d \tilde{P}_B^{-1} \tilde{P}_2^{-1} F P_2 P_1} \quad (17)$$

$$(1 - T_d) \tilde{P}_B^{-1} \tilde{P}_2^{-1} F P_2 P_1 = (1 - T_d) \left( 1 - F (1 - \tilde{P}_2^{-1} P_2) \right) \quad (18)$$

thập tập các tín hiệu vào/ra của hệ thống  $\{u(\rho^0), y_2(\rho^0), y_1(\rho^0)\}$ .

*Bước 4:* Xây dựng tín hiệu kích thích ảo  $\tilde{r}(\rho)$  theo công thức (12).

*Bước 5:* Xây dựng hàm mục tiêu (14), và tiến hành cực tiểu hóa *off-line* theo các phương pháp tối ưu đã biết (ví dụ: phương pháp lặp Gauss-Newton) để xác định bộ thông số tối ưu  $\rho^*$ . Hệ thống với bộ điều khiển  $C_1(\rho^*)$  và  $C_2(\rho^*)$  có tín hiệu ra có thể bám theo đặc tính đầu ra  $T_d r$  mong muốn. Đồng thời các mô hình toán học nhận được  $P_1(\rho^*)$  và  $P_2(\rho^*)$  có thể phản ánh đặc tính động học của đối tượng điều khiển, nghĩa là đối tượng điều khiển cũng được nhận dạng.

### 4.4. Ví dụ

Để minh họa cho thuật toán đã xây dựng, chúng tôi áp dụng cho hệ thống điều khiển tầng với các đối tượng chưa biết trước mô hình được

$$\text{giả thiết: } P_1 = \frac{0,8s+1}{2s^2+3s+1} \text{ và } P_2 = \frac{1,5s+0,7}{2s^2+2,5s+1}.$$

Mô hình của chúng được tham số hóa bởi:

$$\tilde{P}_1 = \frac{\rho_1 s + \rho_2}{\rho_3 s^2 + \rho_4 s + 1} \text{ và:}$$

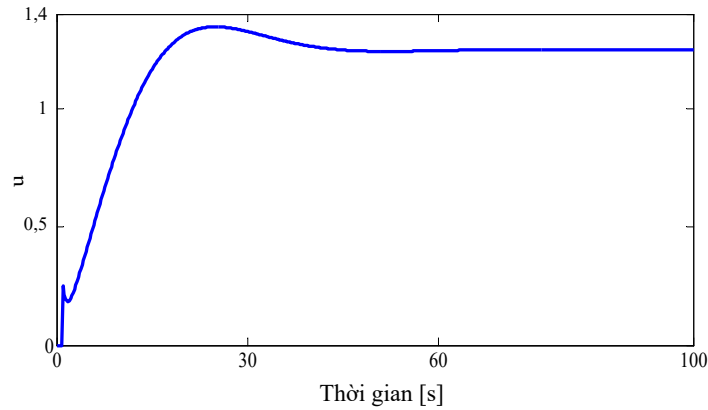
$$\tilde{P}_2 = \frac{\rho_5 s + \rho_6}{\rho_7 s^2 + \rho_8 s + 1}$$

$$\text{Giả thiết sử dụng bộ lọc } F_2 = \frac{1}{\lambda_2 s + 1} \text{ với}$$

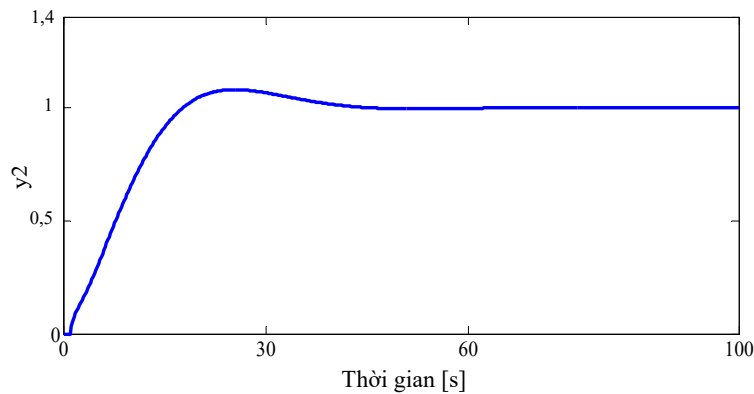
tham số  $\lambda_2$  có thể điều chỉnh được cho vòng điều khiển trong và mô hình mẫu của hệ thống:

$$T_d = \frac{1}{(2s+1)^2}. \text{ Nếu chúng ta có thể đạt được}$$

$P_2 = \tilde{P}_2$  cho vòng điều khiển trong thì hàm truyền  $\tilde{P}_B$  có thể được tham số hóa:



Hình 4. Tín hiệu  $u(\rho^0)$  thu thập từ hệ thống



Hình 5. Tín hiệu  $y_2(\rho^0)$  thu thập từ hệ thống

$$\tilde{P}_B = \frac{1}{\lambda_2 s + 1} \frac{\rho_1 s + \rho_2}{\rho_3 s^2 + \rho_4 s + 1}$$

như vậy vector tham số cần xác định trong trường hợp này:  $\rho = [\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \rho_4 \ \rho_5 \ \rho_6 \ \rho_7 \ \rho_8]^T$ . Sử dụng bộ tham số ban đầu  $\rho^0 = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]^T$ , tiến hành mô phỏng bằng Matlab/Simulink để thu thập các tín hiệu vào/ra  $\{u(\rho^0), y_2(\rho^0), y_1(\rho^0)\}$  của hệ thống, kết quả được thể hiện trong các hình 4, hình 5 và hình 6. Trong hình 6, tín hiệu đặt r được biểu diễn bằng đường chấm - gạch, tín hiệu ra  $y_1(\rho^0)$  của hệ thống ứng với bộ thông số ban đầu  $\rho^0$  và tín hiệu ra mong muốn  $T_{dr}$  được lần lượt thể hiện bằng đường nét liền và đường chấm. Hình 6 cho thấy tín hiệu ra của hệ thống ứng với bộ thông số giả thiết ban đầu có độ quá điều chỉnh, thời gian quá độ dài và sai lệch khá nhiều so với tín hiệu ra mong muốn, và như vậy việc điều chỉnh thông số của bộ điều khiển sao cho hệ thống bám theo đường đặc tính mẫu là cần thiết.

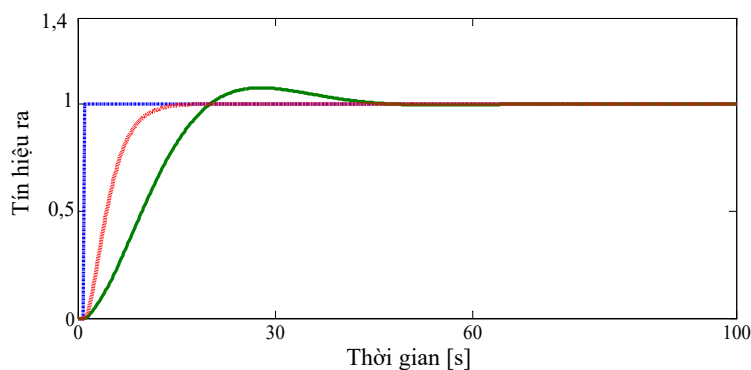
Áp dụng thuật toán FRIT đã xây dựng cho hệ thống điều khiển tầng thu được kết quả  $\rho^* = [0,818 \ 1,001 \ 2,221 \ 2,745 \ 1,434 \ 0,540 \ 2,156 \ 2,221 \ 2,216]^T$ . Với bộ thông số này, hệ thống cho đầu ra  $y_1(\rho^*)$  (đường nét liền) được mô tả trong hình 7. So sánh với đặc tính mẫu  $T_{dr}$  (đường chấm), có thể nói đặc tính đầu ra của hệ thống với bộ thông số  $\rho^*$  có thể bám sát theo đặc tính mong muốn, nghĩa là hệ thống với các bộ điều khiển  $C_1(\rho^*)$  và  $C_2(\rho^*)$  có thể đạt được các yêu cầu chất lượng đặt ra của hệ thống.

Mặt khác, sử dụng bộ thông số  $\rho^*$  cho ta mô hình toán học của đối tượng điều khiển:

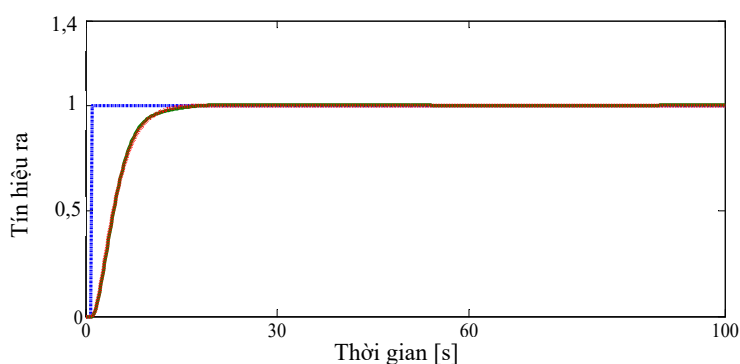
$$\tilde{P}_1 = \frac{0,818s + 1,001}{2,221s^2 + 2,745s + 1}$$

và:

$$\tilde{P}_2 = \frac{1,434s + 0,546}{2,156s^2 + 2,221s + 1}$$



**Hình 6. Tín hiệu ra của hệ thống**  
 (Tín hiệu ra thực tế  $y_1(\rho^0)$  (đường nét liền),  
 tín hiệu ra mong muốn  $T_{dr}$  (đường chấm) và tín hiệu kích thích  $r$  (đường chấm - gạch))



**Hình 7. Tín hiệu ra của hệ thống sau khi điều chỉnh**  
 (Tín hiệu ra thực tế  $y_1(\rho^0)$  (đường nét liền), tín hiệu ra mong muốn  $T_{dr}$  (đường chấm)  
 và tín hiệu kích thích  $r$  (đường chấm - gạch))

So sánh với mô hình thực  $P_1$  và  $P_2$  (được sử dụng để mô phỏng), chúng ta có thể thấy mô hình toán học của đối tượng điều khiển khá gần với mô hình thực của đối tượng, nghĩa là đối tượng điều khiển đã được nhận dạng. Hình 8 và hình 9 lần lượt thể hiện đặc tính tần số của đối tượng thực  $P_i$  ( $i = 1, 2$ ) và các mô hình của chúng, trong đó đặc tính của đối tượng thực, mô hình tối ưu  $\tilde{P}_i(\rho^*)$  và mô hình giả thiết ban đầu  $\tilde{P}_i(\rho^0)$  được mô tả bởi các đường nét liền, đường chấm và đường nét đứt tương ứng. Chúng ta có thể thấy  $\tilde{P}_i(\rho^*)$  có đặc tính tần số khá gần với đặc tính tần của đối tượng thực  $P_i$ , nghĩa là mô hình toán học  $\tilde{P}_i(\rho^*)$  phản ánh tốt đặc tính động học của đối tượng thực.

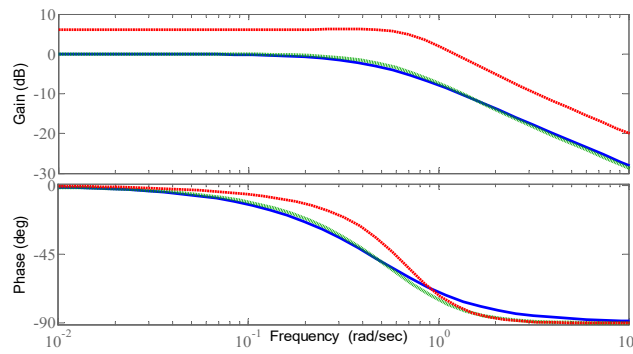
Kết quả trên cho thấy thuật toán đề xuất đối với hệ thống điều khiển tầng không những

cho ta các bộ điều khiển tối ưu mà còn cho mô hình toán học của đối tượng điều khiển.

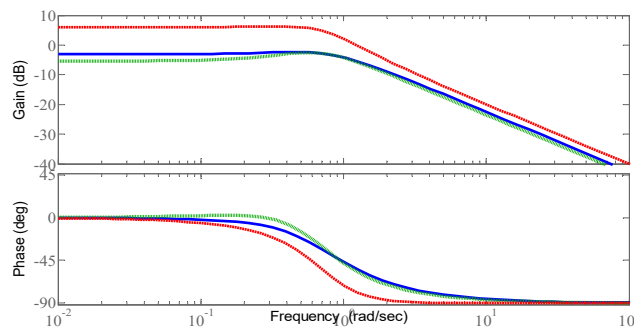
#### 4.5. Nhận xét

Thuật toán FRIT điều chỉnh tối ưu các bộ điều khiển IMC trong hệ thống điều khiển tầng tỏ ra khá hiệu quả khi chỉ yêu cầu một tập dữ liệu vào/ra của hệ thống mà không đòi hỏi mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Kết quả nhận được là các bộ điều khiển với thông số tối ưu cho tín hiệu ra mong muốn của hệ thống. Ngoài ra, thuật toán đồng thời cho ta mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Kết quả mô phỏng cho thấy, hệ thống với bộ điều khiển tối ưu tìm được có tín hiệu ra bám sát theo tín hiệu ra mong muốn và mô hình toán học của đối tượng có đặc tính động học khá gần với đặc tính của đối tượng điều khiển. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng:





**Hình 8. Đặc tính tần của đối tượng điều khiển vòng ngoài** ( $P_1$  (đường nét liền),  $\tilde{P}_1(\rho^*)$  (đường chấm) và  $\tilde{P}_1(\rho^0)$  (đường nét đứt))



**Hình 9. Đặc tính tần của đối tượng điều khiển vòng trong** ( $P_2$  (đường nét liền),  $\tilde{P}_2(\rho^*)$  (đường chấm) và  $\tilde{P}_2(\rho^0)$  (đường nét đứt))

i) Hệ thống ở đây giả thiết là hoạt động ở điều kiện lý tưởng, không có nhiễu tác động. Trong trường hợp hệ thống chịu tác động của nhiễu, để tăng độ tin cậy của kết quả, có thể tiến hành thu thập tập dữ liệu của hai lần độc lập trong cùng một điều kiện (cùng bộ thông số  $\rho^0$ ) và sử dụng hàm mục tiêu tương ứng (Campi & cs., 2002; Kaneko & cs., 2010; Nguyễn Thị Hiền, 2017):

$$J_F(\rho) := \left( y_1(\rho^0)^{(1)} - T_d \tilde{r}(\rho)^{(1)} \right)^T \left( y_1(\rho^0)^{(2)} - T_d \tilde{r}(\rho)^{(2)} \right) \quad (19)$$

trong đó,  $\tilde{r}(\rho)^{(i)}$  (với  $i = 1, 2$ ) là tín hiệu kích thích ảo ứng với mỗi lần thu thập dữ liệu, xác định theo biểu thức (12).

ii) Việc xác định thông số tối ưu  $\rho^*$  hoàn toàn phụ thuộc vào tập các dữ liệu  $\{u(\rho^0), y_2(\rho^0), y_1(\rho^0)\}$  với giả thiết ban đầu  $\rho^0$  (do hàm mục tiêu là phi tuyến), cơ sở của việc lựa chọn bộ thông số  $\rho^0$  cũng như xem xét ảnh

hưởng của bộ dữ liệu ban đầu đến kết quả tối ưu của bài toán cần được quan tâm nghiên cứu.

iii) Thuật toán đề xuất ở đây chỉ áp dụng đối với các đối tượng LTI, không trễ, trong khi hầu hết quá trình (đối tượng) trong thực tế đều là các quá trình có trễ. Việc mở rộng thuật toán cho các đối tượng có trễ sẽ được nhóm tác giả xây dựng trong các nghiên cứu tiếp theo.

## 5. KẾT LUẬN

Bằng việc sử dụng FRIT, thuật toán dùng trực tiếp một tập dữ liệu vào/ra của hệ thống để điều chỉnh thông số tối ưu các bộ điều khiển, bài báo đã xây dựng một thuật toán cho phép điều chỉnh đồng thời thông số của các bộ điều khiển IMC trong hệ thống điều khiển tầng, mà không đòi hỏi mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Hệ thống với các bộ điều khiển được tổng hợp có tín hiệu ra bám khá tốt theo đường đặc tính mẫu. Ngoài các bộ điều khiển tối ưu, thuật

toán còn cho phép nhận được các mô hình toán học của đối tượng điều khiển, điều này mang ý nghĩa to lớn trong các bài toán thực tế như: dự báo, phát hiện, chẩn đoán lỗi hay tối ưu hóa... Tuy nhiên, thuật toán đề xuất ở đây mới chỉ áp dụng được cho đối tượng LTI và pha cực tiểu. Nghiên cứu mở rộng thuật toán đối với các hệ pha không cực tiểu, hay các quá trình có trễ, cũng như xem xét cơ sở lựa chọn bộ thông số ban đầu sẽ được quan tâm trong các nghiên cứu tiếp theo.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Azar A.T. & Serrano F.E. (2014). Robust IMC-PID tuning for cascade control systems with gain and phase margin specifications. *Neural Computing and Applications*, Springer. 25: 983-995.
- Campi M.C., Lecchini A. & Savaresi S.M. (2002). Virtual reference feedback tuning: a direct method for design of feedback controllers. *Automatica*. 38(8): 1337-1346.
- Cesca M.R. & Marchetti J.L. (2005). IMC design of cascade control. *Proceedings of the European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 15*. 20: 1243-1248.
- Hien Thi Nguyen & Kaneko O. (2015). Fictitious reference iterative tuning for cascade control systems. *Proceedings of the SICE Annual Conference*, CDROM. pp. 774-777.
- Hien Thi Nguyen & Kaneko O. (2016). Fictitious reference iterative tuning for cascade PI controllers of DC motor speed control systems. *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*. 136(5): 710-714.
- Nguyễn Thị Hiền & Nguyễn Văn Đạt (2016). Thuật toán mới điều chỉnh tối ưu hệ thống điều khiển tầng. *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam*. 14(3): 469-476.
- Nguyễn Thị Hiền (2017). Điều chỉnh tối ưu hệ thống điều khiển tầng bằng FRIT. *Tạp chí Công nghiệp nông thôn*. 24: 63-70.
- Hjalmarsson H., Gevers M., Gunnarsson S. & Lequin O. (1998). Iterative Feedback Tuning: Theory and Applications. *IEEE Control Systems Magazine*. 18(4): 26-41.
- Jeng J. & Lee M. (2012). Simultaneous automatic tuning of cascade control systems from closed-loop step response data. *Journal of Process Control*. 22: 1020-1033.
- Kaneko O., Wadagaki Y. & Yamamoto S. (2010). Fictitious reference iterative tuning for internal model controller. *Proceedings of the 10th IFAC Workshop on Adaption and Learning Control and Signal Processing (ALCOSP 2010)*, CDROM.
- Lee Y. & Park S. (1998). PID controller tuning to obtain desired closed loop responses for cascade control systems. *Ind. Eng. Chem. Res.* 37: 1859-1865.
- Morari M. & Rafiriou E. (1989). *Robust Process Control*. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Souma S., Kaneko O. & Fujii T. (2004). A new method of controller parameter tuning based on input-output data - fictitious reference iterative tuning (FRIT). *Proceedings of the 8th IFAC Workshop on Adaption and Learning Control and Signal Processing*. pp. 788-794.