

# Nhận dạng trực tuyến quá trình nhiệt điện hệ SISO cấu trúc tầng

## Online identification of thermal power process in cascade SISO structure

Đỗ Cao Trung, Nguyễn Văn Mạnh<sup>†</sup>  
 ĐH Bách khoa Hà Nội  
 Email: trung.docao@hust.edu.vn

### Abstract

The paper presents an active online identification method of thermal power processes in cascade SISO structure. Firstly, the system will be energized by an input pulse to collect data. Secondly, the process will be identified by a "round disk" that comprises of a constant model described as a second order system with dead time and an uncertain component with a core-model is in a form of second order system. The Cleft-over-step optimal algorithm will be used to optimize the model parameters. Finally, an example is given for the illustration.

### Keywords

Closed-loop identification, cascade control system, thermal power process, uncertain process, uncertain model, cleft-over-step algorithm

### Tóm tắt<sup>1</sup>

Bài báo trình bày phương pháp nhận dạng trực tuyến đối tượng điều khiển quá trình nhiệt điện hệ SISO cấu trúc tầng. Trước tiên, hệ thống sẽ được kích thích bằng xung đầu vào để thu thập số liệu. Sau đó, đối tượng sẽ được nhận dạng bằng mô hình "đĩa tròn" bao gồm thành phần cố định là khâu quán tính bậc hai có trễ và thành phần bất định với "nhân" bất định là khâu quán tính bậc hai. Phương pháp tối ưu hóa "vượt khe" sẽ được sử dụng để tính toán tham số của mô hình.

### Chữ viết tắt

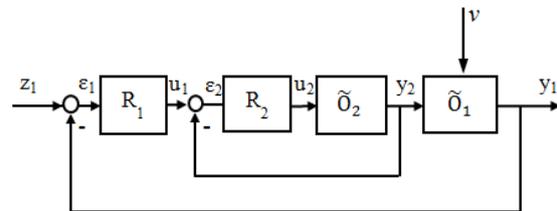
SISO	Single Input - Single Output
NMNĐ	Nhà máy nhiệt điện
PID	Proportional-Integral-Derivative
IMC	Internal Model Control
FOPDT	First order plus dead time
SOPDT	Second order plus dead time

### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\tilde{O}_2(s), \tilde{O}_1(s), \tilde{O}_2(s)$		Mô hình bất định
$O_1(s), O_2(s)$		Mô hình cơ sở
$\theta, T_1, T_2, a_0, a_1, a_2$	giây/phút	Hằng số quán tính
$\tau$	giây/phút	Trễ của đối tượng
$\omega$	rad/s	Tần số
$r$		Bán kính bất định
$\varphi$	Rad	Pha bất định
$t$	giây/phút	Biến thời gian
$s$		Toán tử Laplace
$j$		Đơn vị số ảo $j^2 = -1$
$V(s)$		"nhân" bất định
$\nabla J(\mathbf{x})$		Gradient của $J(\mathbf{x})$
$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$		Tích vô hướng véc tơ
$p_1, p_2$		Hệ số "phạt"
$s^k$		Hướng tìm kiếm của thuật toán "vượt khe"
$\alpha$		Bước "vượt khe"

### 1. Đặt vấn đề

Nhà máy nhiệt điện là một dây chuyền công nghệ biến đổi nhiệt năng khi đốt các nhiên liệu hữu cơ (than, dầu, khí...) thành điện năng [1]. Đối tượng điều khiển quá trình nhiệt điện là những công đoạn của NMNĐ được điều khiển đảm bảo thông số đầu ra theo yêu cầu. Trải qua thời gian dài phát triển, hệ thống điều khiển quá trình nhiệt hệ SISO với cấu trúc cascade hai vòng sử dụng các bộ điều khiển PI/PID (H. 1) là một trong những thiết kế rất phổ biến trong điều khiển NMNĐ. Các mạch vòng điều chỉnh điển hình có thể kể đến: điều khiển công suất lò hơi, điều khiển không khí cấp lò hơi, điều khiển áp suất buồng lửa, điều khiển mức nước bao hơi, điều khiển nhiệt độ hơi quá nhiệt, điều khiển tốc độ tua bin.



H. 1 Sơ đồ điều khiển quá trình nhiệt điện

Vấn đề nhận dạng đối tượng đang làm việc đã được quan tâm nhiều và nó thường gắn liền với công việc chỉnh định bộ điều khiển. Trong [2] nêu phương pháp nhận dạng đối tượng dựa trên pha và đặc tính tần

<sup>1</sup> Ngày nhận bài: 03/01/2018; Ngày nhận bản sửa: 12/05/2018; Ngày chấp nhận: 12/05/2018; Phản biện: Đào Phương Nam, Lại Khắc Lãi

số của đối tượng, [3] mô hình hóa các đối tượng bằng FOPDT. Trong [4] cũng nhận dạng đối tượng vòng trong bằng FOPDT và tính toán các bộ điều khiển bằng phương pháp mô hình nội (IMC). Nhìn chung, các phương pháp này đều là các phương pháp nhận dạng chủ động, kích thích xung bậc thang tại đầu vào hệ thống, đo đáp ứng tại đầu vào và đầu ra đối tượng, từ đó xác định đặc tính tần số của đối tượng làm thông tin nhận dạng mô hình. Hạn chế của các phương pháp này là sử dụng các mô hình tuyến tính, cố định, chưa tính đến yếu tố bất định của đối tượng nên sẽ có hạn chế khi áp dụng để nhận dạng đối tượng điều khiển quá trình nhiệt. Bài báo sẽ đề xuất một mô hình phù hợp để mô hình hóa quá trình nhiệt điện. Sử dụng phương pháp kích thích chủ động xung đầu vào để xác định đặc tính tần số của đối tượng, từ đó xác định tham số của mô hình.

**2. Mô hình mô phỏng quá trình nhiệt điện**

Một đặc điểm nổi bật, điển hình của quá trình nhiệt đó là tính chất bất định tất yếu. Thứ nhất, là do bản chất phi tuyến và sự thay đổi đặc tính động của đối tượng theo phụ tải cũng như điều kiện làm việc gây ra. Thứ hai, là do sự hạn chế của phương pháp nhận dạng và mô hình hóa đối tượng.

Để mô hình hóa đối tượng bất định, trong [5] đề xuất mô hình kiểu “đĩa tròn” gồm thành phần cơ sở và thành phần bất định như sau:

$$\tilde{O}(s) = O(s) + |V(s)| r e^{j\phi} \tag{1}$$

Trong đó,  $r \in [0 \div 1]$  – bán kính bất định;  $\phi \in [-2\pi \div 0]$  – pha bất định;  $O(s)$  – thành phần mô hình cơ sở;  $V(s)$  – “nhân” bất định.

Thành phần cơ sở với hàm truyền tổng quát dạng:

$$O(s, \mathbf{X}) = \frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m}{1 + a_1 s + \dots + a_n s^n} \frac{e^{-\tau s}}{s^q} \tag{2}$$

Với  $(m, n, q)$  gọi là tham số cấu trúc của mô hình,  $\mathbf{X} = \{b_0, b_1, \dots, b_m, a_1, a_2, \dots, a_n, \tau\}$  là véc-tơ tham số. Mô hình này được sử dụng trong [6] để nhận dạng đối tượng công nghiệp đang làm việc từ dữ liệu là đặc tính tần số của đối tượng, ghi nhận khi có đáp ứng vào/ra từ sự chuyển trạng thái xác lập của hệ thống (do thay đổi giá trị đặt hoặc nhiễu lớn). Tuy nhiên, mô hình bất định với hàm truyền tổng quát (2) rất khó cho việc chỉnh định bộ điều khiển. Ngoài ra [6] cũng chưa giải quyết được vấn đề lựa chọn xung kích thích phù hợp để thu thập dữ liệu.

Để sử dụng cho quá trình nhiệt điện, phục vụ việc tổng hợp hệ thống, chỉnh định bộ điều khiển thì rõ ràng cần phải lựa chọn được mô hình cụ thể thích hợp. Mô hình cơ sở được đề xuất là khâu quán tính bậc hai có trễ (SOPDT), có hàm truyền là:

$$O(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} e^{-\tau s} \tag{3}$$

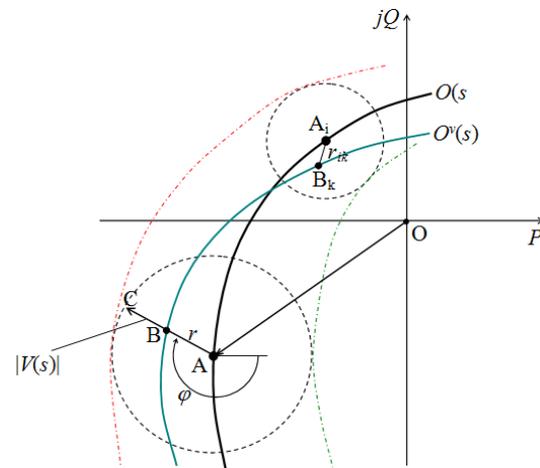
Mô hình này đã được chứng minh là đại diện cho các đối tượng nhiệt cơ bản [8]. Nó cho phép mô hình hóa rất chính xác lớp đối tượng nhiệt có tự cân bằng. Đối với lớp đối tượng không có tự cân bằng (tích

phân), bằng cách lựa chọn hằng số quán tính hợp lý ( $T_2 \gg T_1$ ) thì mô hình cũng cho kết quả chính xác [8].

Nhân bất định  $V(s)$  được lựa chọn có cấu trúc tương đồng với thành phần cơ sở đã bỏ trễ.

$$V(s) = \frac{a_0}{(1 + a_1 s)(1 + a_2 s)} \tag{4}$$

Mô hình (1) cho thấy, ứng với  $s = j\omega$  nhất định, ta có một điểm cố định (ví dụ điểm A trên H. 2) nằm trên đường cong cơ sở  $O(s)$ . Trong khi đó, một trường hợp biến thiên cụ thể nào đó của  $\tilde{O}(s)$  sẽ cho điểm B tương ứng. Nếu xét vô số các biến thiên, thì ứng với  $\omega$  cố định, đặc tính cơ sở vẫn chỉ xác định tại A, nhưng  $\tilde{O}(s)$  sẽ cho vô số điểm B tùy theo các giá trị cụ thể của  $r$  và  $\phi$ . Tập hợp những điểm B như vậy sẽ được bao bởi một đĩa tròn tâm A, bán kính AC =  $|V(s)|$ .



H. 2 Đặc tính cơ sở và biến thiên

Nếu  $|V(s)|$  đủ lớn, thì đĩa tròn này sẽ chứa được tất cả những điểm bất định có thể của đặc tính đối tượng thực, ứng với  $s = j\omega$ . Hay nói cách khác mô hình bất định nói trên sẽ thể hiện được tất cả các biến thiên có thể của đối tượng bất định.

**3. Xung kích thích hệ thống**

Phương pháp được đề xuất là phương pháp nhận dạng chủ động, trong đó hệ SISO tại H. 1 sẽ được kích thích bởi xung đầu vào để thu thập dữ liệu nhận dạng. Xung kích thích cần đảm bảo đo được thông số quá trình, không làm ảnh hưởng đến sự làm việc của hệ thống. Sau chu kỳ kích thích, xung phải tắt, trả hệ thống về trạng thái làm việc ban đầu. Xung được sử dụng là xung tam giác với hàm thời gian như sau:

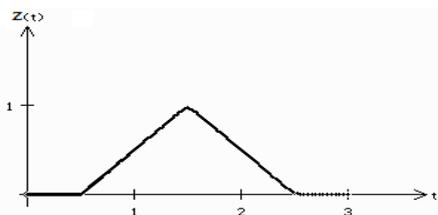
$$z_1(t) = u_0 [f_1(t) + f_2(t) + f_3(t)] \tag{5}$$

Trong đó:

$$f_1(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq \tau \\ t, & t > \tau \end{cases}, \quad f_2(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq \tau + T \\ -2t, & t > \tau + T \end{cases}$$

$$f_3(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq \tau + 2T \\ t, & t > \tau + 2T \end{cases}$$

Xung tam giác:  $\tau = 0.5$  (giây),  $T = 1$  (giây),  $u_0 = 1$  trên H. 3.



H. 3 Xung tam giác với  $\tau = 0.5, T = 1, u_0 = 1$

Ảnh tần số của xung tam giác này có dạng:

$$Z_1(s) = u_0 \left[ \frac{e^{-\tau s}}{s^2} - \frac{2e^{-(\tau+T)s}}{s^2} + \frac{e^{-(\tau+2T)s}}{s^2} \right] \quad (6)$$

Xung tam giác đảm bảo thông số quá trình tăng giảm đều, thời gian tắt nhanh, chủ động được quá trình thử nghiệm.

### 4. Xác định đặc tính tần số của đối tượng

#### 4.1 Công thức xác định

Từ sơ đồ H. 1, xác định được:

$$\tilde{O}_1(s) = \frac{Y_1(s)}{Y_2(s)} \quad (7)$$

$$\tilde{O}_2(s) = \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} \quad (8)$$

$$= \frac{Y_2(s)}{\{[Z_1(s) - Y_1(s)]R_1(s) - Y_2(s)\}R_2(s)} \quad (9)$$

Để tính  $\tilde{O}_2(s)$  có thể sử dụng công thức (8) hoặc công thức (9). Đối với quá trình nhiệt điện thì đối tượng vòng trong có thể là van điều khiển góc mở (nước cấp, phun giảm ôn...), cửa chắn (khói, gió...), máy cấp (nhiên liệu than) hoặc khớp nổi thủy lực, biến tần (bơm cấp, quạt gió/khói). Tín hiệu  $u_2(t)$  là tín hiệu đo độ mở của các cơ cấu chấp hành, thực tế tại các nhà máy cho thấy tín hiệu đo này thường kém tin cậy. Trong khi đó, các bộ điều khiển đã có trước nên việc tính toán theo công thức (9) thuận lợi hơn.

Từ các công thức (7), (9) nếu thay biến  $s = j\omega$ , ta thu được các công thức xác định đặc tính tần số của các đối tượng  $\tilde{O}_1(j\omega_i)$  và  $\tilde{O}_2(s) \tilde{O}_2(j\omega_i)$  như sau:

$$\tilde{O}_2(j\omega) = \frac{Y_2(j\omega)}{\{[Z_1(j\omega) - Y_1(j\omega)]R_1(j\omega) - Y_2(j\omega)\}R_2(j\omega)} \quad (10)$$

$$\tilde{O}_1(j\omega) = \frac{Y_1(j\omega)}{Y_2(j\omega)} \quad (11)$$

Các công thức (10) và (11) cho thấy tại mỗi điểm tần số  $\omega_i$  sẽ đều xác định được  $\tilde{O}_1(j\omega_i)$  và  $\tilde{O}_2(s)$   $\tilde{O}_2(j\omega_i)$  nếu đã biết  $Y_1(j\omega_i)$  và  $\tilde{O}_2(s) Y_2(j\omega_i)$ .

Giả sử hệ thống trên H. 1 đang làm việc tại một trạng thái ổn định nào đó, tiến hành kích thích một xung tam giác tại đầu vào  $z_1(t)$ , đo được các đặc tính thời gian đáp ứng của thông số quá trình  $y_1(t)$  và  $y_2(t)$ . Mỗi đặc tính này sẽ được xấp xỉ bởi đường gấp khúc

gồm nhiều đoạn thẳng, sau đó biến đổi sang dạng ảnh tần số để có đặc tính  $Y_1(j\omega)$  và  $Y_2(j\omega)$  của đối tượng [6, 7]. Sau đó, từ (10), (11) sẽ xác định được đường cong  $\tilde{O}_1(j\omega)$  và  $\tilde{O}_2(s) \tilde{O}_2(j\omega)$ . Thực hiện M lần thí nghiệm ở các chế độ xác lập khác nhau của hệ thống thu được M đường cong tần số  $\tilde{O}_1(j\omega)$  và  $\tilde{O}_2(s) \tilde{O}_2(j\omega)$  là dữ liệu để nhận dạng các đối tượng.

## 5. Xác định tham số mô hình

### 5.1 Xây dựng bài toán tối ưu

a) Mô hình cơ sở

Mô hình cơ sở (3) có hàm tần số là:

$$O(j\omega) = \frac{K}{(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)} e^{-\tau j\omega} \quad (12)$$

$$= \frac{(1 - \omega^2 T_1 T_2) - j\omega(T_1 + T_2)}{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2(T_1 + T_2)^2} K (\cos \tau\omega - j \sin \tau\omega)$$

$$= P_1(\omega, \mathbf{X}) + jQ_1(\omega, \mathbf{X})$$

$$P_1(\omega, \mathbf{X}) = K \frac{(1 - \omega^2 T_1 T_2) \cos \tau\omega - \omega(T_1 + T_2) \sin \tau\omega}{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2(T_1 + T_2)^2},$$

$$Q_1(\omega, \mathbf{X}) = K \frac{(\omega^2 T_1 T_2 - 1) \sin \tau\omega - \omega(T_1 + T_2) \cos \tau\omega}{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2(T_1 + T_2)^2},$$

$\mathbf{X} = \{K, T_1, T_2, \tau\}$  là véc tơ tham số của mô hình cơ sở, sẽ được xác định từ bài toán tối ưu:

$$F_1(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M |\tilde{O}(j\omega_{i,k}) - O(j\omega_{i,k})|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{X}} \quad (13)$$

Trong đó, N là số điểm tần số  $\omega_i$  trong dải làm việc, M là số lượng dữ liệu đã đo tại mỗi tần số  $\omega_i$ . Các điều kiện giới hạn đối với véc tơ tham số  $\mathbf{X}$  là:

$$K, \tau, T_1, T_2 \geq 0 \quad (14)$$

Bài toán (13) với điều kiện ràng buộc (14) sẽ được đưa về bài toán cực tiểu hóa không ràng buộc sau:

$$J_1(\mathbf{X}) = F_1(\mathbf{X}) + p_1 \Psi_1(\mathbf{X}) \rightarrow \min_{\mathbf{X}} \quad (15)$$

Trong đó:

$$\Psi_1(\mathbf{X}) = [ |K| - K ]^2 + [ \tau | - \tau ]^2 + \sum_{i=1}^N (|T_i| - T_i)^2 \quad (16)$$

là “hàm phạt”,  $p_1$  là hệ số “phạt” chọn  $\in [10 \div 10^6]$ .

Để thấy rằng, nếu (14) không thỏa mãn, tức một tham số nào đó vượt giới hạn, thì  $\Psi_1(\mathbf{X}) > 0$  và  $J_1(\mathbf{X})$  sẽ có giá trị rất lớn (tùy vào độ lớn của  $p_1$ ) và không thể đạt cực tiểu tại đó. Ngược lại, điều kiện (14) thỏa mãn thì  $\Psi_1(\mathbf{X}) \equiv 0$  và  $J_1(\mathbf{X}) \equiv F_1(\mathbf{X})$ , tức là nghiệm của bài toán cực tiểu hóa (15) hoàn toàn trùng với nghiệm của bài toán (13)-(14).

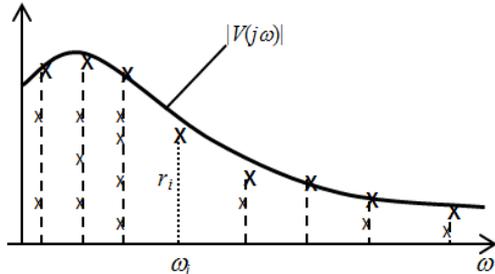
b) Mô hình bất định

Thành phần bất định của đối tượng  $\tilde{O}_1(s)$  và  $\tilde{O}_2(s)$  như đã nêu đều có dạng:

$$|V(s)| r e^{j\varphi}, r \in [0 \div 1], \varphi \in [-2\pi \div 0] \quad (17)$$

Từ (1), ký hiệu:  $r(\omega) = |\tilde{O}(j\omega) - O(j\omega)|$  là khoảng cách điểm từ đặc tính biến thiên  $\tilde{O}(j\omega)$  đến đặc tính cơ sở  $O(j\omega)$ , ứng với  $\omega$  xác định.

Yêu cầu đặt ra là phải tìm qui luật thay đổi các “đĩa tròn phủ trên” tốt nhất, tức xác định “nhân”  $V(s)$  để  $|V(j\omega)|$  là hàm phủ trên, nhưng gần nhất với  $r(\omega)$ .



H. 4 Đồ thị các bán kính bất định và đường phủ trên

Trên H. 2, xét điểm  $A_i$  tại tần số làm việc  $\omega_i$  của mô hình cơ sở  $O(s)$ , những biến thiên của đối tượng xung quanh điểm này là  $B_k$ , khoảng cách  $A_i B_k = r_{ik}$ . Với số lượng  $M$  điểm  $B_k$  trên các đặc tính tần số của  $O_1(s)O_1(s)$  hay  $O_2(s)$  và  $N$  điểm  $A_i$  được xét, tạo thành tập hợp  $r_{ik}$  ( $i = \overline{1, N}; k = \overline{1, M}$ ) bán kính bất định, là khoảng cách điểm giữa các đặc tính biến thiên bất định của đối tượng xung quanh đường cơ sở  $O(s)$ .

Để bao được các điểm  $B_k$  thì  $|V(j\omega)|$  phải là hàm phủ trên (xem H. 4) của tất cả các bán kính  $r_{ik}$ . Nếu xét bán kính bất định tối đa ( $r = 1$ ) và pha biến thiên bất định:  $-2\pi \leq \varphi \leq 0$ , thì thành phần bất định  $V(j\omega)re^{j\varphi}$  sẽ vẽ nên tập hợp các đường tròn bán kính là  $|V(j\omega)|$  và tâm nằm trên đường cơ sở. Các tham số của “nhân” bất định có thể xác định theo chỉ tiêu bình phương cực tiểu, như sau:

$$F_2(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^N \{|V(j\omega_i, \mathbf{A})| - r_i\}^2 \rightarrow \min_{\mathbf{A}} \quad (18)$$

Trong đó,  $\mathbf{W} = \{a_0, a_1, a_2\}$ ;  $r_i = \max_k \{r_{i,k}\}$  – các khoảng cách lớn nhất giữa các đặc tính biến thiên và đặc tính cơ sở tại tần số  $\omega_i$ ;  $\mathbf{A} = \{a_0, a_1, a_2\}$  – véc tơ tham số;  $\omega_i$

$$V(j\omega, \mathbf{A}) = \frac{a_0}{(1 + a_1 j\omega)(1 + a_2 j\omega)}$$

$$= P(\omega, \mathbf{A}) + jQ(\omega, \mathbf{A})$$

$$P(\omega, \mathbf{A}) = \frac{a_0(1 - \omega^2 a_1 a_2)}{(1 - \omega^2 a_1 a_2)^2 + \omega^2 (a_1 + a_2)^2}$$

$$Q(\omega, \mathbf{A}) = \frac{-\omega a_0 (a_1 + a_2)}{(1 - \omega^2 a_1 a_2)^2 + \omega^2 (a_1 + a_2)^2}$$

Để đảm bảo  $|V(j\omega, \mathbf{A})|$  là hàm phủ trên của các bán kính bất định ứng với các tần số  $\omega_i$ , ta có điều kiện:  $|V(j\omega_i, \mathbf{A})| \geq r_{i,k}$  hay

$$|V(j\omega_i, \mathbf{A})| \geq r_i, \quad r_i = \max_k \{r_{i,k}\} \quad (19)$$

Ngoài ra, các tham số cũng phải thỏa mãn:

$$a_0, a_1, a_2 \geq 0 \quad (20)$$

Bài toán (18) với các điều kiện (19)-(20) được đưa về bài toán cực tiểu hóa không ràng buộc, như sau:

$$J_2(\mathbf{A}) = F_2(\mathbf{A}) + p_2 [\Psi_r(\mathbf{A}) + \Psi_a(\mathbf{A})] \rightarrow \min_{\mathbf{A}} \quad (21)$$

Trong đó:

$$\Psi_r(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^N \{|V(j\omega_i, \mathbf{A})| - r_i\}^2 \quad (22)$$

- Hàm phạt đối với điều kiện (19);

$$\Psi_a(\mathbf{A}) = \sum_{i=0}^2 (|a_i| - a_i)^2 \quad (23)$$

- Hàm phạt đối với điều kiện (20) và  $p_2 = [10 \div 10^6]$  - hệ số phạt.

Tương tự như (15), dễ chỉ ra rằng bài toán (21) là tương đương với bài toán (18)-(19)-(20).

### 5.2 Thuật toán giải bài toán tối ưu hóa mô hình

Các hàm mục tiêu trong (15) và (21) thường có tính chất khe phức tạp, tuy nhiên có thể giải hiệu quả nhờ thuật toán vượt khe.

#### a) Thuật toán tối ưu hóa vượt khe [5]

Giả sử cần cực tiểu hóa hàm  $J(\mathbf{x})$ , viết như sau:

$$J(\mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in E^n}$$

Trong đó,  $\mathbf{x}$  là véc tơ tối ưu hóa trong không gian Ôclit  $n$  chiều  $E^n$ . Thuật toán vượt khe tạo ra một quá trình lặp tiến dần tới điểm cực tiểu của hàm mục tiêu  $J(\mathbf{x})$ . Giả sử  $\mathbf{x}^0$  ( $k=0$ ) là điểm xuất phát. Mỗi bước lặp thứ  $(k+1)$  thực hiện phương trình:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \alpha_{k+1}^v \mathbf{s}^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

Trong đó:  $\mathbf{x}^k$  là điểm đầu còn  $\mathbf{x}^{k+1}$  là điểm cuối, tức điểm tối ưu xấp xỉ nhận được của bước lặp thứ  $(k+1)$ ;  $\alpha_{k+1}^v$  - bước chuyển dịch theo điều kiện “vượt khe”:

$$h(\alpha_{k+1}^v) \leq \frac{h(0) + h_{\min}}{2}, \quad h'(\alpha_{k+1}^v) > 0 \quad (25)$$

$$h(\alpha) = J(\mathbf{x}^k + \alpha \mathbf{s}^k), \quad h_{\min} = \min_{\alpha} J(\mathbf{x}^k + \alpha \mathbf{s}^k);$$

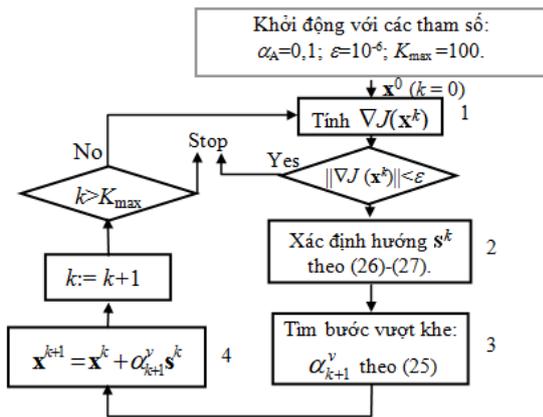
$\mathbf{s}^k$  - hướng tìm kiếm, chọn là hướng trực giao tựa nón (hướng chiếu Afine), xác định dưới dạng tổ hợp tuyến tính của tối đa  $n$  gradien ở các bước lặp cuối như sau:

$$\mathbf{s}^k = \sum_{i=1}^n \gamma_i \nabla^i, \quad \nabla^i = -\nabla J(\mathbf{x}^{k-i+1}) \quad (26)$$

Các trọng số  $\gamma_i$  xác định từ hệ phương trình tuyến tính (điều kiện trực giao) sau:

$$\left\{ \begin{aligned} \left\langle \sum_{i=1}^n \gamma_i \nabla^i, \nabla^t - \nabla^{t-1} \right\rangle &= 0, \quad t = \overline{1, n-1} \\ \sum_{i=1}^n \gamma_i &= 1 \end{aligned} \right. \quad (27)$$

Thuật toán tối ưu hóa vượt khe theo hướng trực giao tựa nón có lưu đồ dẫn trên H. 5. Các thông số cho trước của thuật toán, bao gồm:  $\alpha_A = 0,1$ ;  $\varepsilon = 10^{-6}$ ;  $K_{\max} = 100$ .



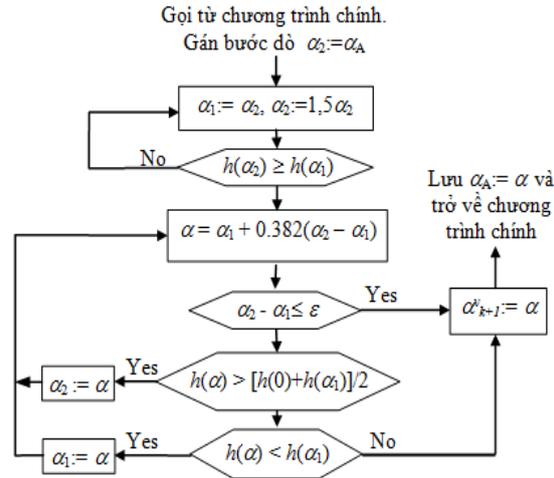
H. 5 Lưu đồ thuật toán tối ưu hóa vượt khe theo hướng trực giao tựa nón

Theo lưu đồ của thuật toán (H. 5), với  $\mathbf{x}^0$  đã chọn ( $k=0$ ) mỗi bước lặp thứ  $(k+1)$  xảy ra theo trình tự sau:

- 1) Tính và kiểm tra độ lớn của gradient tại  $\mathbf{x}^k$ . Nếu  $\|\nabla J(\mathbf{x}^k)\| \leq \varepsilon$  thì kết thúc quá trình tối ưu hóa. Trái lại, chuyển sang khối 2.
- 2) Xác định hướng chuyển động  $\mathbf{s}^k$ . Thay véc tơ đối  $\nabla^i = -\nabla J(\mathbf{x}^{k-i+1})$  vào (27) thì nhận được hệ phương trình tuyến tính theo  $\gamma_i$ . Hệ này giải dễ dàng bằng phương pháp biến đổi tương đương. Thay các nghiệm  $\gamma_i, i = \overline{1, n}$  nhận được vào (26) thì có  $\mathbf{s}^k$ .
- 3) Tìm bước vượt khe  $\alpha_{k+1}^v$ . Xác định độ dài chuyển dịch theo hướng  $\mathbf{s}^k$  sao cho thỏa mãn điều kiện vượt khe (25). Logic thuật toán tìm bước vượt khe có đặc thù riêng và thể hiện theo lưu đồ được thể hiện trên H. 6.
- 4) Xác định điểm cuối của bước lặp, tức điểm tối ưu xấp xỉ mới theo phương trình:  $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \alpha_{k+1}^v \mathbf{s}^k$ .
- 5) Nếu số bước  $k+1 > K_{\max}$  thì dừng quá trình. Trái lại, tiếp tục vòng lặp của bước sau.

Trình tự logic xác định bước vượt khe theo lưu đồ H. 6, như sau:

- 1) Cho  $\alpha_1=0, \alpha_2=\alpha_A$  và tăng liên tiếp theo qui tắc:  $\alpha_1:=\alpha_2, \alpha_2:=1.5\alpha_2$  cho đến khi  $h(\alpha_2) \geq h(\alpha_1)$ , được đoạn  $(\alpha_1, \alpha_2)$  chứa điểm vượt khe, chuyển tiếp sang bước 2.
- 2) Nếu  $\alpha_2 - \alpha_1 \leq \varepsilon$ , tức không tìm được bước vượt khe với độ chính xác  $\varepsilon$ . Nhận  $\alpha_{k+1}^v := \alpha$  và quay về chương trình chính. Trái lại, chuyển sang bước 3.
- 3) Tính  $\alpha := \alpha_1 + 0.382(\alpha_2 - \alpha_1)$  và chuyển sang bước 4.
- 4) Nếu  $h(\alpha) > [h(0) + h(\alpha_1)]/2$  thì gán  $\alpha_2 := \alpha$  hoặc  $h(\alpha) < h(\alpha_1)$  thì gán  $\alpha_1 := \alpha$  và quay lại bước 2. Trong trường hợp còn lại,  $\alpha$  thỏa mãn điều kiện vượt khe, nhận  $\alpha_{k+1}^v := \alpha, \alpha_A := \alpha$  và trở về chương trình chính.

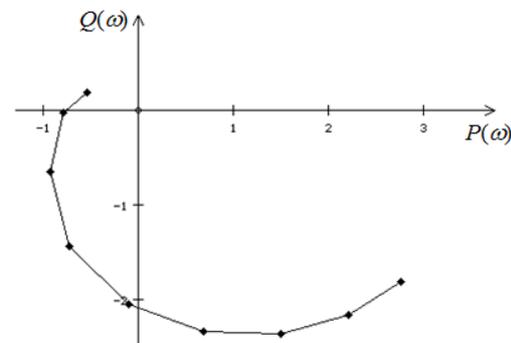


H. 6 Lưu đồ xác định bước vượt khe

b) Xác định dải tần số bản chất của đặc tính tần số

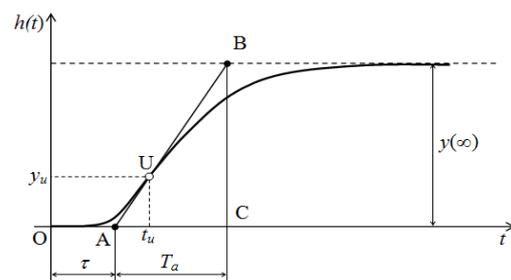
Để tìm được mô hình chính xác, tức là xác định được các nghiệm tối ưu của các bài toán (15) và (21) thì dải tần số  $\omega$  cần được xác định hợp lý đúng bản chất vật lý của quá trình nhiệt.

Nếu đối tượng cần nhận dạng là có tự cân bằng thì dải tần  $(\omega_1 \div \omega_N)$  tính toán trong các hàm mục tiêu (15) và (21) thường chọn sao cho đoạn đặc tính tần số tương ứng bao trùm một phần góc phần tư thứ II, cả góc phần tư thứ III và một phần góc phần tư thứ IV của hệ tọa độ phức (H. 7). Nếu đối tượng là không có tự cân bằng thì dải tần sẽ được chọn là một phần góc phần tư thứ II và một phần hoặc hầu hết góc phần tư thứ III của hệ tọa độ phức.



H. 7 Xác định dải tần số hợp lý

Các giá trị tần số nên phân bố theo quy luật cấp số nhân:  $\omega_{i+1} = \omega_i q, i = 1, 2, \dots, N-1$ , trong đó  $N$  là số tần số chọn trong lưới;  $q = (\omega_N / \omega_1)^{1/(N-1)}$ .



H. 8 Đặc tính động của đối tượng nhiệt có tự cân bằng

c) *Xác định vectơ xuất phát*

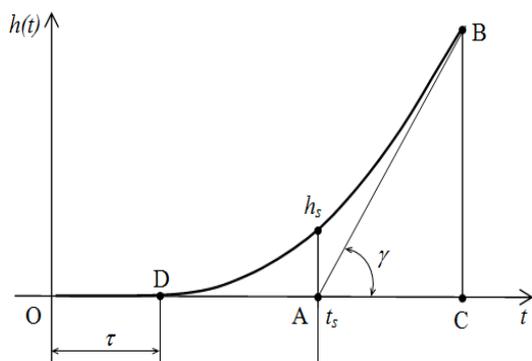
Thuật toán tối ưu hóa yêu cầu véc tơ xuất phát  $x^0$ , véc tơ này cũng quyết định đến độ chính xác nghiệm của các bài toán tối ưu (15) và (21). Để xác định được  $x^0$  hợp lý, lấy đáp ứng xung bậc thang đơn vị của đối tượng với một đường cong trong M đường dữ liệu. Đặc tính của đối tượng có tự cân bằng sẽ có dạng như trên H.8 [8, 9], với  $U(t_u, y_u)$  là điểm uốn. Tham khảo phương pháp nêu trong [9], chọn vectơ xuất phát  $X_0 = \{K_0, T_{10}, T_{20}, \tau_0\}$  như sau:

- Xác định  $g = y_u/(y(\infty))$ ,  $g_m = 1 - 2e^{-1} \approx 0.264$ , nếu
- +  $g \leq g_m$ , chọn:  
 $K_0 \approx y(\infty)$ ,  $\tau_0 \approx OA$ ,  $T_{10} \approx 0.6T_a$ ,  $T_{20} \approx 0.2T_a$
- +  $g > g_m$ , chọn:  
 $K_0 \approx y(\infty)$ ,  $\tau_0 \approx OA$ ,  $T_{10} = T_{20} \approx 0.3T_a$

Trong trường hợp đối tượng là không có tự cân bằng, đặc tính sẽ có dạng như trên H. 9. Đây là lớp đối tượng mức chất lỏng (ví dụ mức nước bao hơi), ít gặp hơn trong nhà máy nhiệt điện.

$X_0$  sẽ được lựa chọn như sau:

- $K_0 \approx BC/AC$ ,  $\tau_0 \approx OD$ ,  $T_{10} \approx t_s - \tau_0 = DA$ ,
- và  $T_{20} \approx 10\omega_{\min}$  [8] để hàm truyền  $O(s)$  là khâu SOPDT trong (3) có tính chất tích phân.



H. 9 *Đặc tính động đối tượng nhiệt không có tự cân bằng*

Sau khi đã xác định được thành phần cơ sở theo (3) cho cả hai lớp đối tượng có tự cân bằng và không có tự cân bằng, thì véc tơ xuất phát  $A_0 = \{a_{00}, a_{10}, a_{20}\}$  cho (21) sẽ được chọn là:

$$a_{00} = K, a_{10} = T_1, a_{20} = T_2$$

**6. Ví dụ minh họa**

Xét đối tượng điều khiển quá trình nhiệt của Yali Xue và cộng sự [10], là hàm của áp suất lò hơi đốt than theo nhiên liệu cung cấp, như sau:

$$O_1(s) = \frac{3.9551s^2 + 1.5823s + 0.1582}{G(s)} e^{-43s} \quad (28)$$

Trong đó:

$$G(s) = 2.5833 \cdot 10^8 s^6 + 1.4637 \cdot 10^8 s^5 + 2.9062 \cdot 10^7 s^4 + 2.4438 \cdot 10^6 s^3 + 7.5588 \cdot 10^4 s^2 + 562.387s + 1$$

Đây là số liệu đo thực tế tại một tổ máy nhiệt điện đốt than 300MW tại Sơn Đông, Trung Quốc [10]. Sự bất định của áp suất lò hơi được ghi nhận khi tăng lưu lượng nhiên liệu ở các mức tải 60%, 73%, 87% và 100% định mức như trên H. 10.

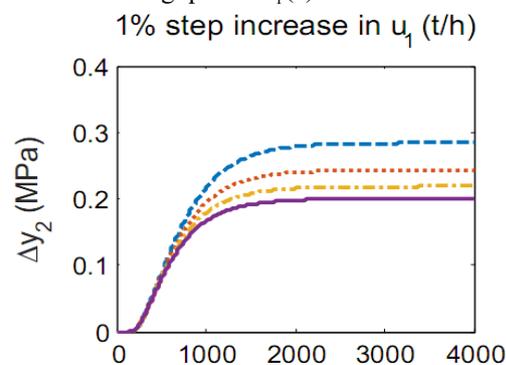
Mức tăng áp suất hơi đầu ra của lò hơi khác nhau ở mỗi mức tải, độ tăng áp suất càng giảm khi mức tải càng lớn.

Để mô phỏng dải bất định của quá trình nhiệt này, bài báo sẽ xem mô hình  $O_1(s)$  có tham số biến thiên.

Cụ thể  $\tilde{O}_1(s)$  sẽ có cấu trúc mô hình như của  $O_1(s)$  nhưng các tham số tương ứng sẽ biến thiên xung quanh tham số của mô hình gốc 30%, nghĩa là:

$$0.7c_i \leq \tilde{c}_i \leq 1.3c_i \quad (29)$$

Trong đó,  $c_i$  là các tham số của  $O_1(s)$ , còn  $\tilde{c}_i$  là tham số tương ứng của  $\tilde{O}_1(s)$ . Tập hợp tất cả các giá trị biến thiên tham số  $\tilde{c}_i$  của  $\tilde{O}_1(s)$  sẽ tạo ra một dải biến thiên xung quanh  $O_1(s)$ .



H. 10 *Mức biến đổi áp suất hơi theo nhiên liệu cấp*

Đối tượng vòng trong là máy cấp than bột vào lò hơi. Đối tượng này thường là khâu quán tính bậc nhất có trễ. Mô hình sẽ được chọn như sau:

$$O_2(s) = \frac{0.43}{1 + 65.8s} e^{-9.5s} \quad (30)$$

Mô hình bất định  $\tilde{O}_2(s)$  cũng sẽ có được khi cho các tham số của nó biến thiên 30% so với tham số của  $O_2(s)$ . Giả sử các bộ điều khiển được cài đặt là:

$$R_2(s) = 15.833 \left( 1 + \frac{1}{88.723s} \right) \quad (31)$$

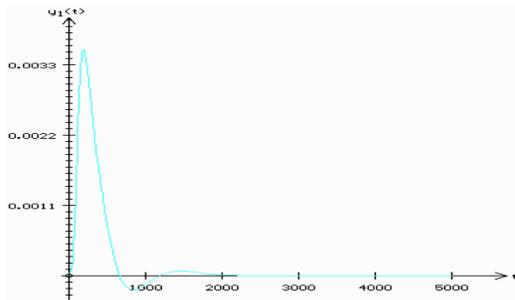
$$R_1(s) = 3.132 \left( 1 + \frac{1}{469.243s} + 117.311s \right) \quad (32)$$

Tín hiệu xung kích thích được chọn là xung tam giác, có hàm truyền:

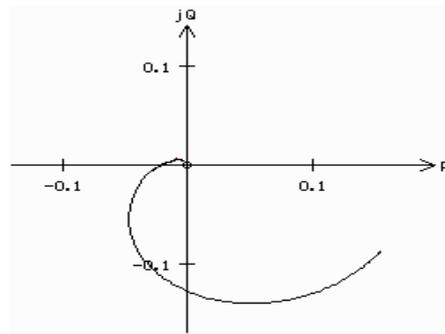
$$Z_1(s) = \frac{e^{-0.5s}}{s^2} - \frac{2e^{-1.5s}}{s^2} + \frac{e^{-2.5s}}{s^2} \quad (33)$$

Từ sơ đồ hệ thống trên H. 1 sẽ đo được các đường cong số liệu như sau:

a) Đặc tính thời gian và tần số của  $y_1$  lần đo thứ nhất

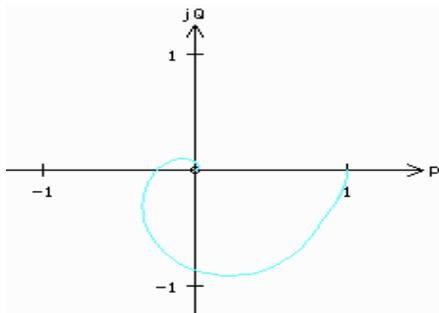


H. 11 Đặc tính thời gian  $y_1(t)$



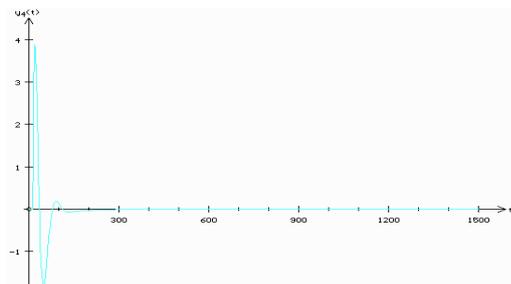
H. 15 Ảnh tần số  $O_1(s)$

Thực hiện các bước đo tương tự cho các đại lượng  $y_1(t)$  với các lần đo thứ 2, thứ 3. Cuối cùng sẽ tổng hợp được dải biến thiên tần số của các đối tượng.

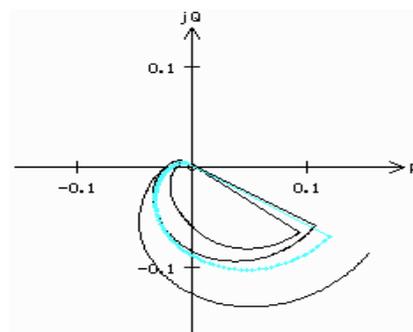


H. 12 Đặc tính tần số  $Y_1(s)$

b) Đặc tính thời gian và tần số của  $y_2$  lần đo thứ nhất



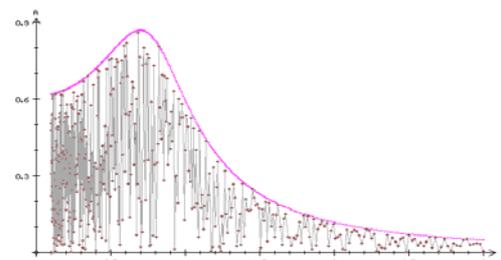
H. 13 Đặc tính thời gian  $y_2(t)$



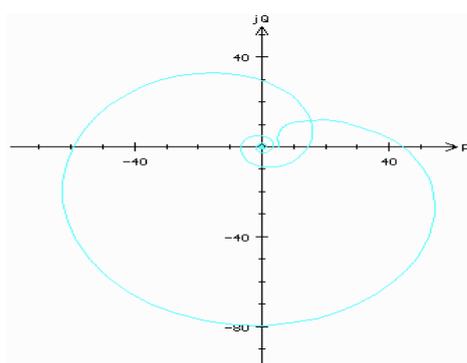
H. 16 Đặc tính tần số  $O_1(s)$  và kết quả nhận dạng

Kết quả nhận dạng của  $\tilde{O}_1(s)$  như trên H. 16, H. 17 và hàm truyền (34).

$$\tilde{O}_1(s) = \frac{0.155e^{-62.485s}}{(1 + 235.06s)^2} + \frac{0.047}{(1 + 175.78s)^2} re^{j\phi} \quad (34)$$



H. 17 Bán kính bất định của  $\tilde{O}_1(s)$  ( $\omega = 0.5 \div 3$ )

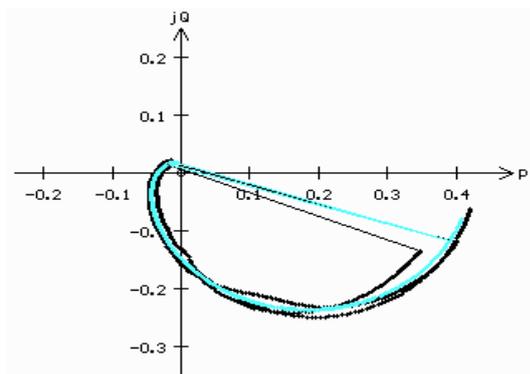


H. 14 Đặc tính tần số  $Y_2(s)$

Với các đặc tính tần số  $Y_1(s)$ , vẽ các đặc tính tần số của đối tượng như sau: Đối tượng  $O_1(s)$  với dải tần số  $\omega = (0.1 \div 2.5)$ .

Kết quả nhận dạng của  $\tilde{O}_2(s)$   $\tilde{O}_2(s)$  như trên H. 18 và hàm truyền (35):

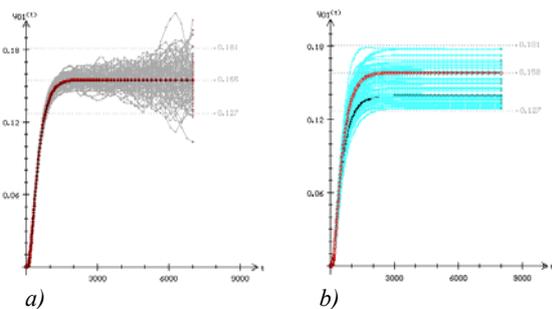
$$\tilde{O}_2(s) = \frac{0.421e^{-8.662s}}{(1 + 0.923s)(1 + 58.465s)} + \frac{0.096}{(1 + 0.74s)(1 + 17.236s)} re^{j\phi} \quad (35)$$



H. 18 Đặc tính tần số  $O_2(s)$  và kết quả nhận dạng

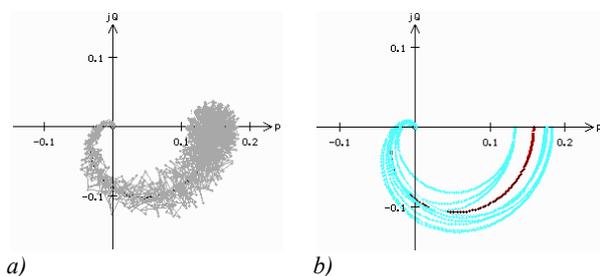
Kết quả nhận dạng các đối tượng bất định được thể hiện qua các đặc tính thời gian và đặc tính tần số, lần lượt được so sánh tương ứng với các đặc tính thời gian và tần số của đối tượng gốc ban đầu.

Đặc tính thời gian và đặc tính tần số của mô hình nhận dạng  $\tilde{O}_1(s)$  và mô hình gốc được thể hiện lần lượt trên các hình H. 19 a-b và H. 20 a-b.



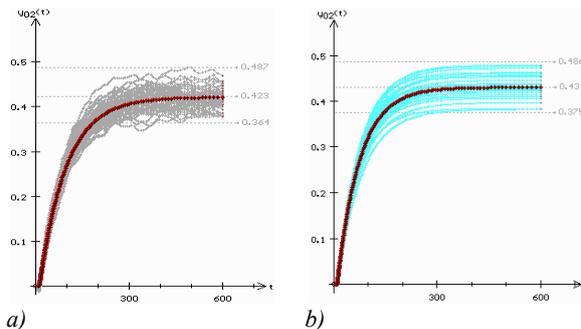
H. 19 Biến thiên thời gian của mô hình gốc  $\tilde{O}_1(s)$   
19-a. Mô hình nhận dạng; 19-b. Mô hình gốc

Trong đó, các đặc tính thời gian và tần số của đối tượng bất định gốc có được khi cho các tham số mô hình biến thiên 30% xung quanh tham số của mô hình  $O_1(s)$  ban đầu tại hàm truyền (28).

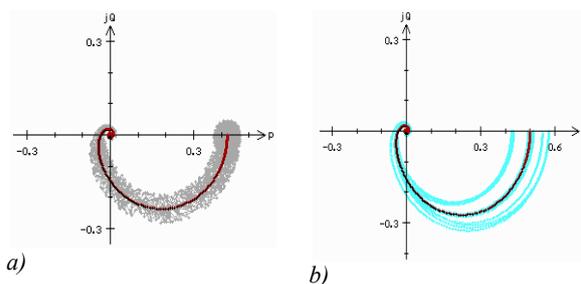


H. 20 Biến thiên tần số của mô hình gốc  $\tilde{O}_1(s)$   
20-a. Mô hình nhận dạng; 20-b. Mô hình gốc

Tương tự với đối tượng  $\tilde{O}_2(s)$ , thu được các đặc tính của mô hình nhận dạng và mô hình gốc gồm: đặc tính thời gian H. 21 a&b; đặc tính tần số H. 22 a&b.



H. 21 Biến thiên thời gian của mô hình gốc  $\tilde{O}_2(s)$   
21-a. Mô hình nhận dạng; 21-b. Mô hình gốc



H. 22 Biến thiên tần số của mô hình nhận dạng  $\tilde{O}_2(s)$   
22-a. Mô hình nhận dạng; 22-b. Mô hình gốc

7. Nhận xét

Kết quả nhận dạng cho thấy các đặc tính thời gian và tần số của mô hình nhận dạng sát với đối tượng gốc, bước đầu chứng minh hiệu quả của phương pháp.

Véc tơ xuất phát giúp thuật toán định dạng được vùng nghiệm tối ưu. Véc tơ này chỉ cần được xác định tương đối, từ đó thuật toán sẽ cho kết quả mô hình nhanh và chính xác. Dải tần số tính toán cho hàm mục tiêu tối ưu hóa tại mỗi lần đo có thể xác định khác nhau, miễn là chúng đảm bảo các đặc tính tần số nằm trong vùng góc phân tư hợp lý.

8. Kết luận

Phương pháp nhận dạng chủ động cho phép thu thập dữ liệu một cách tin cậy, không can thiệp vào hệ thống và không gây rủi ro gì cho quá trình làm việc.

Xung kích thích cần chọn sao cho có thể đưa hệ thống trở về trạng thái xác lập ban đầu sau thời gian nhất định. Trong trường hợp có sử dụng bộ PID nên chú ý kèm bộ lọc thích hợp cho tín hiệu kích thích.

Mô hình bất định với thành phần cơ sở là khâu SOPDT và bán kính bất định dạng quán tính bậc hai cho thấy sự phù hợp trong việc mô hình hóa quá trình nhiệt với bản chất bất định và phi tuyến. Độ chính xác của mô hình có được nhờ vào việc sử dụng thuật toán tối ưu hóa vượt khe để giải các bài toán nhận dạng tối ưu phi tuyến cũng như việc xác định véc tơ xuất phát hợp lý cho thuật toán.

Phương pháp đề xuất có thể thực thi trong giai đoạn vận hành thử nghiệm (commissioning) và vận hành bình thường mà cần chỉnh định lại hệ thống. Phương pháp có hiệu quả đối với các hệ điều khiển đa

tầng trong thực tế. Mô hình bất định với đối tượng cơ sở là khâu SOPDT có ý nghĩa rất quan trọng, giúp chỉnh định bộ điều khiển ở dạng PID truyền thống. Đây sẽ là bước nghiên cứu tiếp theo cần thực hiện.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Hân NC, Trung NQ, Tuấn ĐA (2002) *Nhà máy nhiệt điện*. NXB Khoa học & Kỹ thuật
- [2] Crowe J, Johnson MA, Grimble MJ (2003) *Closed loop identification of systems within cascade connected control strategies*. Proc. of European Control Conference (ECC), pp. 399-404
- [3] Mehta U, Majhi S (2011) *On-line identification of cascade control systems based on half limit cycle data*. ISA Trans., vol. 50, pp. 473-478
- [4] Jeng JC, Lee MW (2012) *Identification and Controller Tuning of Cascade Control Systems Based on Closed-Loop Step Responses*. 8th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, pp. 414-419
- [5] Mạnh NV (1999) *Phương pháp tối ưu hóa hệ thống điều khiển bất định*. Luận án TSKH, ĐH Năng lượng Mátxcova, LB Nga
- [6] Mạnh NV, Hoàn VH (2006) *Nhận dạng đối tượng trong hệ điều khiển nhiều vòng*. KHCN Nhiệt, số 2006/3, tr. 19-23
- [7] Mạnh NV (1993) *Lý thuyết điều chỉnh quá trình nhiệt*. NXB ĐH Bách khoa Hà Nội
- [8] Mạnh NV, Trung ĐC (2017) *Về mô hình đại diện của đối tượng điều khiển quá trình nhiệt*. Năng lượng nhiệt, số 2017/5, tr. 22-26
- [9] Mạnh NV, Đức NM (2015) *Phương pháp mô hình hóa đối tượng điều khiển quá trình nhiệt bằng khâu quán tính bậc hai có trễ*. Năng lượng nhiệt, số 2015/9, tr. 22-26
- [10] Sun L, Li D, Lee KY, Xue Y (2016) *Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit*. Control Engineering Practice, vol. 55, pp. 38-55