

## Một phương pháp nhận dạng mô hình hệ thống điều khiển sử dụng hệ truyền động điện servo đồng bộ

Hoàng Văn Quyết, Phạm Chí Thành, Dương Minh Hiếu, Vũ Quốc Huy\*

Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

\*Email: maihuyvu@gmail.com

Nhận bài: 15/9/2023; Hoàn thiện: 08/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.64-70>

### TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương pháp xác định hàm truyền đạt của hệ truyền động điện servo đồng bộ sau khi đã được lắp đặt hoàn chỉnh bằng công cụ phân tích hệ thống. Thông qua thực nghiệm chủ động, dữ liệu thu được từ đặc tính biên độ - tần số và pha - tần số được đưa vào MATLAB để xây dựng hàm truyền. Kết quả nghiên cứu được thực nghiệm với hệ truyền động điện servo của hãng Delta cho thấy, hàm truyền nhận được có đặc tính Bode so khớp MSE với đặc tính Bode thực tế.

**Từ khoá:** Nhận dạng hệ thống; Phân tích hệ thống; Đặc tính tần số; Hàm truyền đạt.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, hệ truyền động servo được ứng dụng trong nhiều hệ thống điều khiển bám. Xu hướng sử dụng hệ truyền động động cơ đồng bộ và bộ khuếch đại công suất đi kèm được sử dụng ngày càng phổ biến, ví dụ như hệ thống truyền động tầm, hướng của đài quan sát quang điện tử bất bám mục tiêu; hệ truyền động tầm, hướng của các hệ thống điều khiển hỏa lực [1]. Với lợi thế được tích hợp sẵn một số thuật toán như PI, PID, PIDV, Feed Forward trong bộ khuếch đại công suất, người thiết kế hệ thống chỉ cần điều chỉnh một số tham số trong vòng điều khiển mô men và vòng điều khiển tốc độ sẽ có đáp ứng tốc độ tốt nhất. Nhiệm vụ còn lại là tổng hợp thuật toán điều khiển vị trí vòng ngoài để đạt được chất lượng bám theo yêu cầu. Để tổng hợp thuật toán điều khiển hệ thống dạng này, quá trình thiết lập hàm truyền theo phương pháp tuyến tính hóa nhờ phân tích lý thuyết sẽ khá phức tạp do việc xác định thông số của hệ truyền động điện cần một số ước tính và giả định; thêm nữa không thể bỏ qua ảnh hưởng của mô-men ma sát, khe hở và sự tính toán không chính xác. Đối với hệ thống điều khiển tuyến tính, các đặc tính động của hệ thống chủ yếu được phân tích trong miền thời gian và miền tần số. Vì vậy, đa số các hãng cung cấp đều đưa ra bộ công cụ phân tích hệ thống và thiết lập tham số điều khiển cho bộ khuếch đại công suất. Theo đó, công cụ phân tích hệ thống cho phép vẽ đặc tính biên tần và pha tần đối với định lượng tải khác nhau.

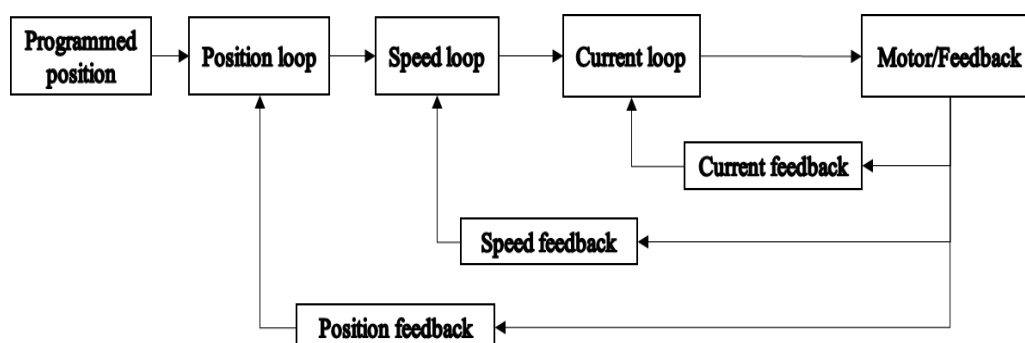
Để nhận dạng hàm truyền theo đặc tính biên độ và pha trong miền tần số, một số học giả đã đưa ra các phương pháp nhận dạng khác nhau. Nghiên cứu [2] đã đề xuất phương pháp xây dựng các hàm truyền của các thành phần cơ bản, thành phần hàm truyền bù sai lệch tương ứng khi xảy ra sai lệch của các vòng phản hồi tốc độ, vị trí hay phản hồi dòng điện, sau đó áp dụng các luật tổng hợp để xây dựng hàm truyền tương đương của hệ thống [3, 4]. Phương pháp này thuần túy lý thuyết và khó có thể xác định chính xác tham số của hàm truyền. Trong [5-7], các tác giả đã xác định điểm cực và điểm zero dựa vào tính chất biến thiên của chúng về biên độ và pha theo tần số nhờ phân tích trực tiếp trên biểu đồ Bode. Phương pháp này chỉ hiệu quả đối với các đường cong đơn giản khi các điểm cực và điểm zero là trực quan.

Bài báo tiếp cận nhận dạng mô hình hệ thống điều khiển bằng việc khai thác tối đa bộ công cụ phân tích hệ thống được hãng cung cấp, qua đó nhận được dữ liệu và biểu diễn trực quan đặc tính biên tần, pha tần. Sau đó, sử dụng phần mềm Matlab để xây dựng hàm truyền đạt trên cơ sở so khớp MSE. Đây là phương pháp thực nghiệm chủ động, cho phép nhận dạng hệ thống sau khi đã lắp đặt hoàn chỉnh, do đó, kết quả nhận được phản ánh chính xác nhất các tham số của hệ thống điều khiển, làm cơ sở để tổng hợp vòng điều khiển vị trí.

## 2. THUẬT TOÁN NHẬN DẠNG HÀM TRUYỀN ĐẠT CỦA HỆ THỐNG

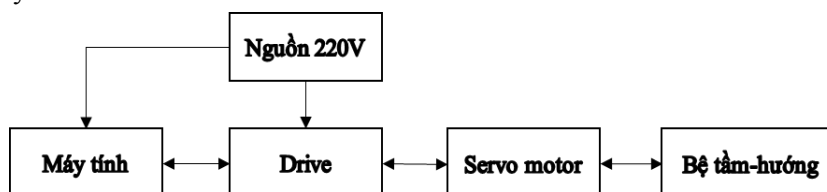
### 2.1. Mô tả phần cứng hệ thống thực nghiệm nhận dạng chủ động

Hình 1 thể hiện cấu trúc cơ bản hệ thống điều khiển servo gồm 3 vòng điều khiển: vòng dòng điện, vòng tốc độ và vòng vị trí. Bộ điều khiển giải mã tín hiệu vị trí và đặt lệnh điều khiển đưa vào bộ khuếch đại công suất để điều khiển chuyển động của tải. Các dữ liệu được bộ khuếch đại công suất thu thập ở mỗi tần số khác nhau; dữ liệu biên độ - tần số và pha - tần số của hệ thống được tính toán và sơ đồ Bode được biểu diễn trực quan trên giao diện phần mềm của hãng. Từ đó, dựa vào dữ liệu miền tần số chúng ta có thể xác định hàm truyền của hệ thống bằng chương trình tính toán ước lượng hay bằng phương pháp đồ thị.



Hình 1. Sơ đồ khối cấu trúc cơ bản hệ điều khiển truyền động servo.

Phần cứng thực nghiệm khảo sát nhận dạng mô hình được biểu diễn trên hình 2, bao gồm nguồn xoay chiều 1 pha 220 V, máy tính (được cài đặt phần mềm ASDA Soft), bộ khuếch đại công suất (Driver), hệ truyền động tầm, hướng. Trong quá trình làm việc của hệ thống, bộ điều khiển servo liên tục thu thập các tín hiệu như điện áp, dòng điện, phản hồi vị trí, phản hồi tốc độ và gửi lên máy tính.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc phần cứng thử nghiệm.

### 2.2. Xác định hệ số của hàm truyền đạt

Trong miền thời gian liên tục, hàm truyền  $H(s)$  mô tả đặc tính động học của hệ thống là hàm đa thức có dạng sau:

$$H(s) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + 1}, n \geq m \quad (1)$$

Trong đó:  $U_i$  là tín hiệu đặt,  $U_o$  là tín hiệu phản hồi.

Vì tất cả các hệ số  $a_i, b_j (i = 1, \dots, n; j = 0, \dots, m)$  là số thực nên tất cả các điểm cực và điểm không phải là số thực hoặc là một cặp phức liên hợp.

Trong miền tần số hàm truyền được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{(b_0 - b_2 \omega^2 + b_4 \omega^4 - \dots) + j(b_1 \omega - b_3 \omega^3 + \dots)}{(1 - a_2 \omega^2 + a_4 \omega^4 - \dots) + j(a_1 \omega - a_3 \omega^3 + \dots)} \\ &= \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó:

$\omega$ : Tần số.  
 $\text{Re}(\omega)$ : Phần thực.  
 $\text{Im}(\omega)$ : Phần ảo.

Đặt:  $P = (1 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots) + j(a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots)$

Nhân hai vế của biểu thức (2) với  $P$  ta nhận được (3a), (3b), (3c):

$$\begin{aligned} & [\text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega)] [(1 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots) + j(a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots)] \\ & = (b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4 - \dots) + j(b_1\omega - b_3\omega^3 + \dots) \end{aligned} \quad (3a)$$

Hay:

$$\begin{aligned} & \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) + \\ & \text{Re}(\omega)(-a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots) + \\ & j\text{Re}(\omega)(a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots) + \\ & j\text{Im}(\omega)(-a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots) - \\ & \text{Im}(\omega)(a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots) = (b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4 - \dots) + j(b_1\omega - b_3\omega^3 + \dots) \end{aligned} \quad (3b)$$

Viết lại (3b) dưới dạng (3c):

$$\begin{aligned} \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) &= (b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4 - \dots) - \\ & \text{Re}(\omega)(-a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots) + \\ & \text{Im}(\omega)(a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots) + \\ & j[(b_1\omega - b_3\omega^3 + \dots) - \text{Re}(\omega)(a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots)] - \\ & j[\text{Im}(\omega)(-a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots)] \end{aligned} \quad (3c)$$

Từ phương trình (3) phần thực và phần ảo được biểu diễn dưới dạng:

$$\text{Re}(\omega) = [10 - \omega^2 0 \omega^4 \dots \text{Im}(\omega) \omega \text{Re}(\omega) \omega^2 - \text{Im}(\omega) \omega^3 - \text{Re}(\omega) \omega^4 \dots] [b_0 \dots b_m a_1 \dots a_n]^T \quad (4)$$

$$\text{Im}(\omega) = [0 \omega 0 - \omega^3 0 \dots - \text{Re}(\omega) \omega \text{Im}(\omega) \omega^2 \text{Re}(\omega) \omega^3 - \text{Im}(\omega) \omega^4 \dots] \quad (5)$$

Giả sử trong tọa độ cực  $H(s)$  có đặc tính biên - tần là  $H(\omega)$ , pha - tần là  $\varphi(\omega)$ .

$$H(s) = |H(s)| e^{j\varphi(s)} \quad (6)$$

Khi đó, phần thực và phần ảo của hàm truyền sẽ được tính theo công thức (7), (8):

$$\text{Re}(\omega) = 10^{H(\omega_i)/20} \cos[\varphi(\omega_i)], \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

$$\text{Im}(\omega) = 10^{H(\omega_i)/20} \sin[\varphi(\omega_i)], \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Gọi:  $N$  là chiều dài vector tần số thực nghiệm;

$\hat{\text{Re}}(\omega)$  là phần thực ước lượng của  $\text{Re}(\omega)$ ;

$\hat{\text{Im}}(\omega)$  là phần ảo ước lượng của  $\text{Im}(\omega)$ .

Khi đó, ta có:

$$\begin{bmatrix} \hat{Re}(\omega_1) \\ \dots \\ \hat{Re}(\omega_n) \\ \hat{Im}(\omega_1) \\ \dots \\ \hat{Im}(\omega_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_R(\omega_1) \\ \dots \\ \varepsilon_R(\omega_n) \\ \varepsilon_I(\omega_1) \\ \dots \\ \varepsilon_I(\omega_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\omega_1^2 & 0 & \omega_1^4 & \dots & \hat{Im}(\omega_1)\omega_1 & \hat{Re}(\omega_1)\omega_1^2 & -\hat{Im}(\omega_1)\omega_1^3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & -\omega_N^2 & 0 & \omega_N^4 & \dots & \hat{Im}(\omega_N)\omega_N & \hat{Re}(\omega_N)\omega_N^2 & -\hat{Im}(\omega_N)\omega_N^3 & \dots \\ 0 & \omega_1 & 0 & -\omega_1^3 & 0 & \dots & -\hat{Re}(\omega_1)\omega_1 & \hat{Im}(\omega_1)\omega_1^2 & \hat{Re}(\omega_1)\omega_1^3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \omega_N & 0 & -\omega_N^3 & 0 & \dots & -\hat{Re}(\omega_N)\omega_N & \hat{Im}(\omega_N)\omega_N^2 & \hat{Re}(\omega_N)\omega_N^3 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ \dots \\ b_m \\ a_1 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Hệ phương trình (9) được rút gọn như (10):

$$Y = AX + \varepsilon \quad (10)$$

Trong đó:

$A$  - Ma trận hệ số;

$Y$  - Vector quan sát,  $X$  - Vector tham số,  $\varepsilon$  - Vector sai số ước lượng.

Nếu coi vector sai số có giá trị kỳ vọng  $E(\varepsilon) = 0$  ta được:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{b}_0 & \dots & \hat{b}_m & \hat{a}_1 & \dots & \hat{a}_n \end{bmatrix}^T = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (11)$$

Để đảm bảo sự chênh lệch giữa giá trị ước lượng và giá trị quan sát luôn luôn dương thì sai số bình phương trung bình (MSE) được sử dụng nhằm đánh giá chất lượng của một mô hình được ước lượng.

MSE tính theo công thức (12):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (12)$$

Trong đó:

$y_i$  là giá trị quan sát thứ  $i$  hay giá trị thực tế thu được từ thực nghiệm;

$\hat{y}_i$  là giá trị ước lượng thứ  $i$ ;

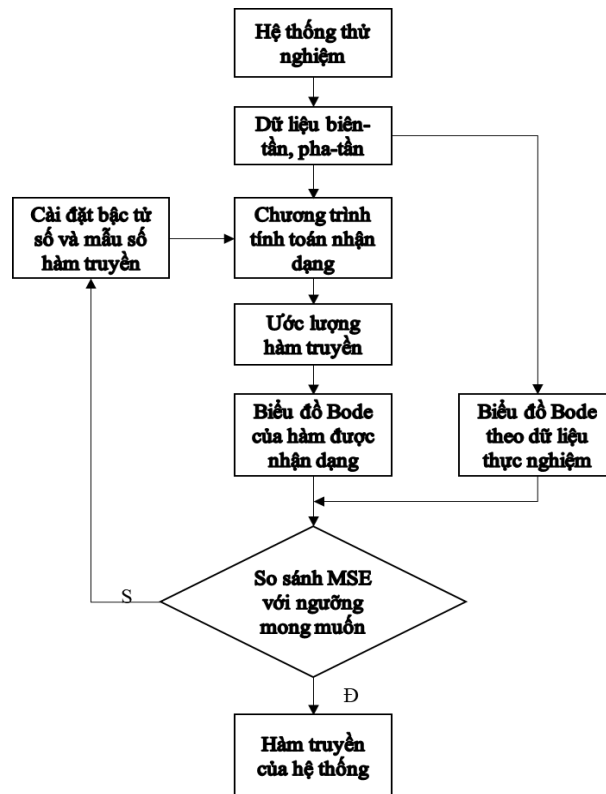
$n$  là chiều dài vector  $y$ .

Có thể thấy rằng, MSE càng nhỏ thì mô hình ước lượng càng chính xác.

### 2.3. Thuật toán xác định tham số hàm truyền đạt

Thuật toán nhận dạng mô hình được thực hiện như sau:

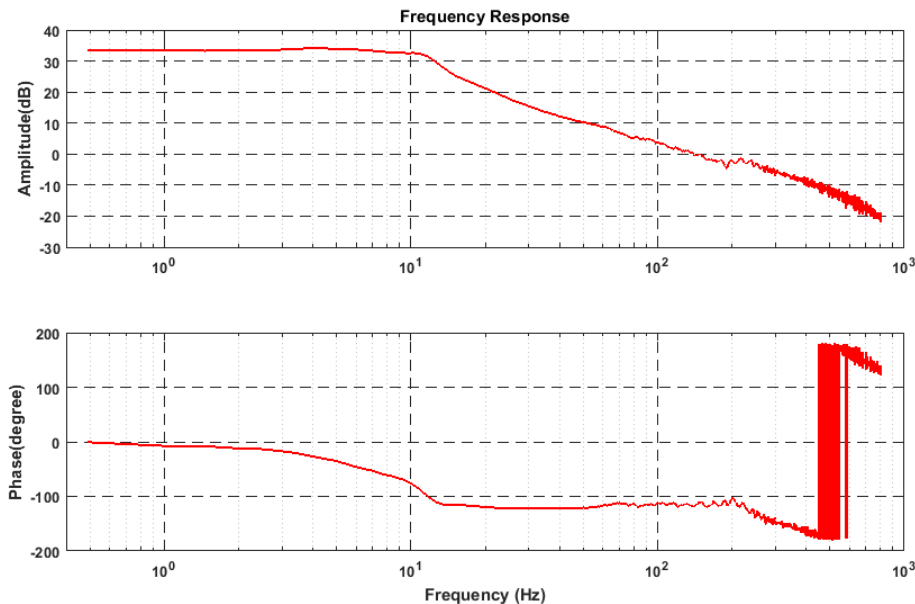
- Bước 1: Cài đặt số điểm cực và số điểm không cho chương trình tính toán để xác định hàm truyền ước lượng  $G(s)$ ;
- Bước 2: Vẽ đồ thị Bode của hàm truyền ước lượng ứng với dải tần số thực nghiệm;
- Bước 3: So sánh sai số bình phương trung bình MSE với ngưỡng đặt.
- Bước 4: Nếu đáp ứng yêu cầu thì  $G(s)$  là hàm truyền của hệ thống. Nếu không đáp ứng chương trình thực hiện lại bước 1 đến bước 3.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán nhận dạng mô hình hàm truyền của hệ thống.

### 3. MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Nhận dạng hệ thống với công cụ phần mềm Matlab



Hình 4. Đặc tính biên-tần và pha-tần thu thập từ thực nghiệm.

Biểu đồ Bode thực nghiệm biên - tần và pha- tần của hệ thống điều khiển được thu thập thông qua phần mềm ASDA Soft (hình 4). Hàm truyền đạt mô tả tính động học hệ thống được xây

dùng bằng công cụ nhận dạng hệ thống có sẵn trên Matlab version 2016a với dữ liệu biên độ và pha phục vụ cho quá trình nhận dạng thay đổi từ 0 đến 300 Hz; số lượng điểm cực và điểm zero tối đa được đặt lần lượt là  $n = 5$  và  $m = 4$ ; ngưỡng sai số mong muốn MSE được chọn nhỏ hơn hoặc bằng 0,3.

### 3.2. Đánh giá mô hình

**Bảng 1.** Sai số bình phương trung bình MSE của hàm truyền được ước lượng.

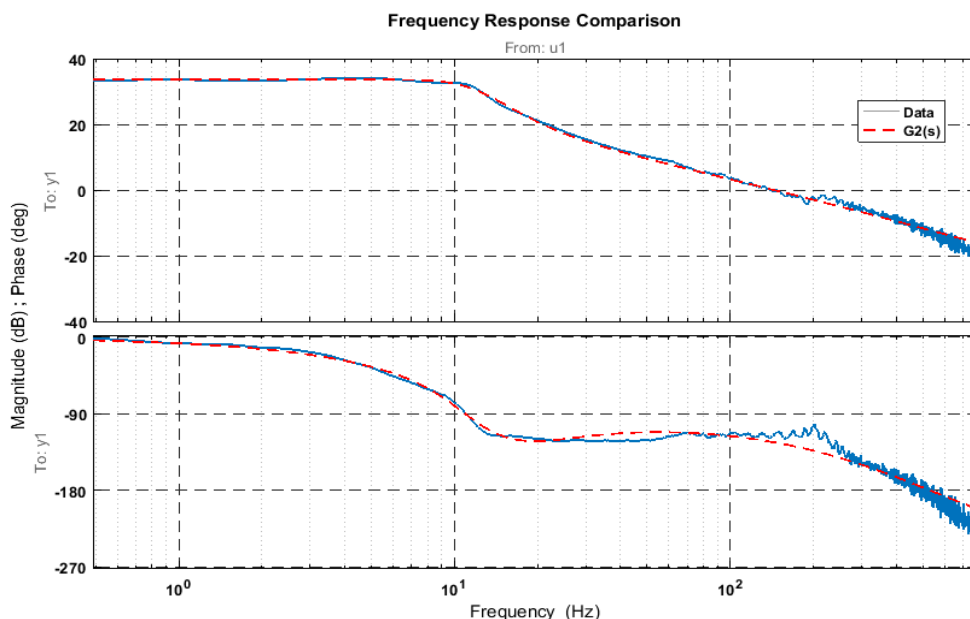
$m \backslash n$	2	3	4	5
1	0,39	0,39	0,31	32,75
2	0,34	0,32	0,31	0,31
3	-	0,41	0,19	0,19
4	-	-	0,25	5,23

Bảng 1 thể hiện kết quả đánh giá MSE của quá trình nhận dạng mô hình hệ thống. Dựa vào bảng 1 ta có thể thấy, với hàm truyền  $G_1(s)$  có 4 điểm cực và 3 điểm zero hoặc  $G_2(s)$  có 5 điểm cực và 3 điểm zero có MSE nhỏ nhất là 0,19 và độ phù hợp 92,88%, do đó, hàm truyền này có tỷ lệ đồng dạng cao nhất với mô hình thực tế.

Hàm truyền  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  có dạng:

$$G_1(s) = \frac{-718,83(s - 3834)(s^2 + 174,3s + 1,517 \cdot 10^4)}{(s + 3001)(s + 57,62)(s^2 + 62,16s + 4982)} \quad (13)$$

$$G_2(s) = \frac{-3,0183 \cdot 10^8 (s - 3856)(s^2 + 174,3s + 1,516 \cdot 10^4)}{(s + 4,202 \cdot 10^5)(s + 3017)(s + 57,57)(s^2 + 62,14s + 4981)} \quad (14)$$



**Hình 5.** So khớp biểu đồ Bode của hàm truyền  $U(s)$  và Bode thực tế.

Hình 5 cho thấy, độ chính xác của hàm truyền được nhận dạng đáng tin cậy. Từ phương trình (13), (14) có thể thấy,  $G_1(s)$  và  $G_2(s)$  có các điểm cực và điểm zero tương đối là giống nhau. Hàm truyền  $G_2(s)$  có 1 điểm zero thực tại vị trí  $\omega = 3856$  rad/s ( $f = 614$  Hz), 1 cặp zero là cặp phức liên hợp với tần số dao động  $\omega_n = 123$  rad/s ( $f_n = 19,6$  Hz) và 3 điểm cực thực tại vị trí  $\omega = 420200$  rad/s ( $f = 66911$  Hz),  $\omega = 3017$  rad/s ( $f = 480,4$  Hz),  $\omega = 57,57$  rad/s ( $f = 9,18$  Hz), 1 cặp

cực là cặp phức liên hợp với tần số dao động riêng  $\omega_n = 70,58$  rad/s ( $f_n = 11,24$  Hz). Như vậy, trong vùng tần số 1 - 30 Hz các cực và zero xuất hiện liên tục gần nhau dẫn đến khó xác định hàm truyền bằng phương pháp đồ thị.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất phương pháp nhận dạng mô hình hệ thống điều khiển sử dụng hệ truyền động servo bằng cách khai thác bộ công cụ phân tích hệ thống do hãng cung cấp, nhờ đó cho phép thực nghiệm chủ động nhận được dữ liệu và biểu diễn trực quan đặc tính biên tần, pha tần. Dữ liệu từ đồ thị Bode được sử dụng để lập trình trên Matlab, xác định hàm truyền tin cậy trên cơ sở so khớp MSE. Kết quả cho thấy, hoàn toàn có thể xác định nhanh chóng hàm truyền của hệ thống dựa vào đặc tính biên tần và pha tần thu thập được từ thực nghiệm. Phương pháp này có hiệu quả với hệ thống điều khiển truyền động điện đã được lắp đặt hoàn chỉnh, khai thác được tối đa chức năng của thiết bị tự động hóa do hãng cung cấp.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Vũ Quốc Huy, Trần Ngọc Bình, Nguyễn Văn Đức, “Điều khiển chế độ trượt tựa proxy trong hệ bám của súng pháo phòng không”, Tạp chí nghiên cứu KH&CN quân sự, số Đặc san TĐH, tr. 32-41, (2019).
- [2]. Kaoru Ishikawa, Tsutomu Ohmae, “Reliable Control Using Equivalent Transfer Function for Position Servo System”, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 1184-1189, (2006).
- [3]. Lee C. Boger, “MASON-Frequency-response program for continuous and discrete control systems”, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 6, Iss. 2, pp. 16-19, (1986).
- [4]. Chien-Yu Lin, Ching-Hung Lee, “Remote Servo Tuning System for Multi-Axis CNC Machine Tools Using a Virtual Machine Tool Approach”, MDPI Journals, (2017).
- [5]. Nguyễn Thị Thu Thảo, “Mô hình hóa các bộ nguồn xung flyback trong pspice trên cơ sở mạng bốn cực hai cửa cách ly”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, số 75, tr. 23-29, (2021).
- [6]. <https://dademuch.com/2020/02/19/obtaining-transfer-function-from-bode-diagram>.
- [7]. Chih-Cheng Peng, Cheng-Hsin Hsu, Thong-Shing Hwang, “System Identification and Intelligent Servo Tuning for Linear Motor on CNC Machine,” International Journal of Computational Intelligence in Control, Vol. 13, No. 1 (2021).

#### ABSTRACT

##### A method to identify the model of synchronous servo control systems

*This paper proposes a method to determine the transfer function of the synchronous servo-electric drive system after being completely installed via the system analysis tool. Through active experimentation, the data obtained from the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics are fed into MATLAB to build the transfer function. Experimental research results with Delta servo-electric drive system show that the received transfer function has the Bode characteristic that matches the MSE with the actual Bode characteristic.*

**Keywords:** System identification; System analysis; Frequency characteristic; Transfer function.