

## NHẬN DẠNG VÀ XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ THỐNG CÓ ĐỘ RƠ IDENTIFY AND BUILT A CONTROL OF SYSTEMS WITH BACKLASH

**Nguyễn Duy Anh, Phùng Vũ Lâm**  
*Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM*

Ngày tòa soạn nhận bài 01/12/2014/, ngày gửi phản biện 05/12/2014, Ngày chấp nhận đăng 23/12/2014

### TÓM TẮT

*Bài báo đề cập đến một hàm phi tuyến không khả vi thường xuất hiện trong các cơ cấu máy công nghiệp: rơ cơ khí. Chúng tôi giới thiệu một giải thuật sử dụng hàm rơ ngược và hệ thống điều khiển đáp ứng theo hàm mẫu (MRAs) để nhận dạng và điều khiển một hệ thống hộp đen (bao gồm hàm truyền, hàm rơ và nhiễu). Tính hiệu quả của giải thuật được kiểm tra trong mô hình hóa lý thuyết và thử nghiệm bằng mô hình.*

**Từ khóa:** *Độ rơ, khử rơ, rơ ngược, điều khiển đáp ứng, MRAs, MRAC, nhận dạng hệ thống.*

### ABSTRACT

*This paper addresses one non-differentiable non-linearity which usually appears in industrial mechanism: backlash. We introduce an algorithm including backlash-inverse function and MRAs (Model reference adaptive system) to identify and control a black-box system (including a transfer function, a backlash function and disturbances). The effect of the algorithm provided is verified in theoretical simulation and in the experiment.*

**Key words:** *Backlash, anti-backlash, backlash-inverse, adaptive control, MRAs, MRAC, system identification.*

### I. GIỚI THIỆU

Độ rơ cơ khí rất thông dụng và luôn tồn tại trong các hệ thống công nghiệp, đặc biệt tại các môi nối cơ khí. Độ rơ là hàm phi tuyến không khả vi ảnh hưởng đến chất lượng của quá trình gia công và chất lượng của các hệ thống điều khiển vòng kín.

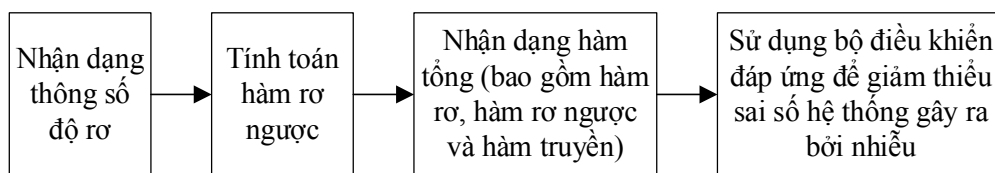
Nhiều hệ thống điều khiển khử rơ đã được giới thiệu và công bố trên một số tạp chí [1]. Tuy nhiên, hầu hết các kết quả đã công bố đa số là các kết quả có được từ mô phỏng mà ít có kết quả từ mô hình thực nghiệm. Mặt khác, để đảm bảo chất lượng của các quá trình gia công công nghiệp, các nhà sản xuất luôn thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho các thiết bị công nghiệp với thông tin về giới hạn hoạt động của các cơ cấu cơ khí cho trước hoặc bị chặn. Do đó, các máy móc cơ khí luôn có thời hạn sử dụng và cần tránh sử dụng khi có những tác động làm ảnh hưởng đến thông số của máy. Ở Việt Nam, một số lượng lớn máy công nghiệp đã

hết hạn với các thông số hoạt động đã bị thay đổi được sử dụng khá nhiều. Do các thông số hệ thống bị thay đổi và bộ điều khiển gốc của máy không còn đáp ứng chính xác nữa nên người sử dụng buộc phải ước lượng lại và hiệu chỉnh lại máy dựa theo kinh nghiệm. Việc này gây ảnh hưởng lớn đến hiệu suất của các quá trình gia công.

Bài báo đưa ra một giải thuật có thể tính toán thông số độ rơ tổng thể của thiết bị, nhận dạng ước lượng hàm truyền hệ thống và giảm thiểu tác động của nhiễu xuất hiện trong quá trình gia công. Giải thuật điều khiển sử dụng hàm rơ ngược (*Backlash Inverse*), phương pháp nhận diện hệ thống theo số bậc và số zero cho trước và bộ điều khiển đáp ứng. Hàm rơ được giả thiết là luôn đi kèm theo hàm truyền hệ thống với các hệ số không biết trước cùng với bộ điều khiển phù hợp có thể áp dụng được cho mô hình thực tế.

## II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

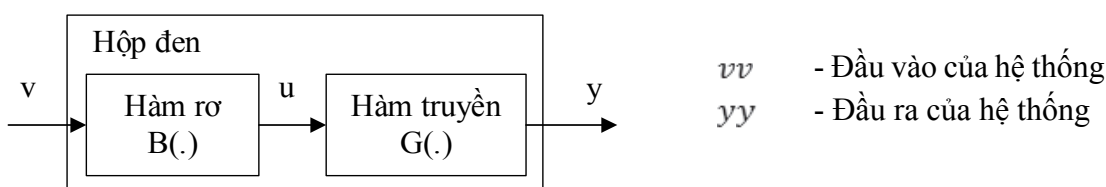
Nghiên cứu nhận dạng và giảm thiểu độ rơ được tiến hành lần lượt qua bốn bước (H.1).



**Hình 1:** Trình tự quá trình thiết kế giải thuật

### 1. Nhận dạng thông số hàm rơ

Hệ thống cơ bản được trình bày như hình:



**Hình 2:** Hệ thống cơ bản

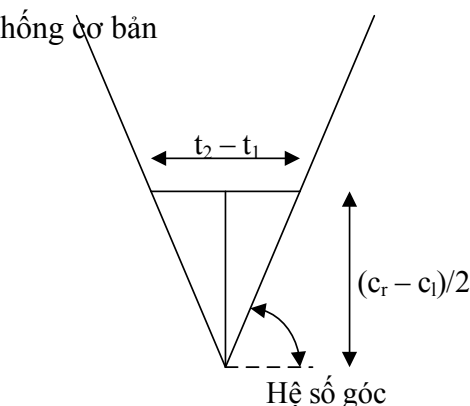
Hệ thống được coi như hộp đen bao gồm hàm rơ và hàm truyền không xác định trước. Bài báo giới thiệu một phương pháp để nhận diện thông số độ rơ, sau đó sử dụng các thông số này để xây dựng hàm rơ ngược trên cơ sở các nghiên cứu của *Gang Tao* [2, 3] về hàm rơ.

- Hàm rơ cơ bản của *Gang Tao*  $B(.)$  được cho bởi công thức sau [2, 3]:

$$u(t) = \begin{cases} m\dot{v}(t) & \text{nếu } \dot{v}(t) > 0 \text{ và } u(t) = m(v(t) - c_r) \\ \text{or } \dot{v}(t) < 0 \text{ và } u(t) = m(v(t) - c_l) & \\ 0 & \text{khác} \end{cases} \quad (1)$$

Với  $v(t)$  là tín hiệu đầu vào;  $u(t)$  là tín hiệu đầu ra;  $m$ ,  $c_r$ ,  $c_l$  là các thông số của hàm rơ.

- Cách xác định thông số độ rơ: sử dụng đầu vào là tín hiệu biên độ lớn dạng sóng tam giác, tín hiệu đầu ra của hệ thống (hình 1) sẽ có dạng sóng hình thang. Sai số vị trí xuất hiện do độ rơ khi đảo chiều quỹ đạo. Để không làm thay đổi nguyên lý của các hệ truyền động cơ khí, ta có thể quy ước rằng  $m = I$ ;  $c_l = c_r$ , sau đó sử dụng tính toán hình học để xác định thông số độ rơ tại mỗi vị trí đảo chiều của quỹ đạo.



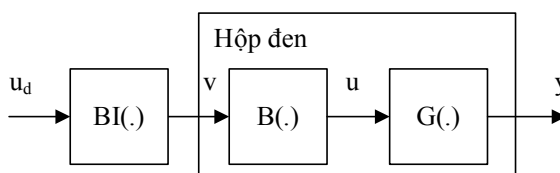
Với  $t_1$ ,  $t_2$  là khoảng thời gian giữa hai vị trí gây khúc của tín hiệu đầu ra.

**Hình 3:** Tính toán hình học để xác định thông số độ rơ

### 2. Hàm rơ ngược

Thông số của hàm rơ đã được nhận diện ở trên được sử dụng để xây dựng hàm rơ ngược  $BI(.)$  sao cho:

$$BI(.) * B(.) = I \quad (\text{Với } I \text{ là ma trận đơn vị}) \quad (3)$$



**Hình 4:** Hệ thống có thêm hàm rơ ngược

- Hàm rơ ngược  $BI(.)$  theo Gang Tao [2, 3]:

$$\dot{v}(t) = \begin{cases} \frac{1}{m} \dot{u}_d(t) & \text{if } \dot{u}_d(t) \geq 0 \text{ và } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_r \\ \text{or } \dot{u}_d(t) < 0 \text{ và } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_l \\ 0 & \text{nếu } \dot{u}_d(t) = 0 \\ g(\tau, t) & \text{if } \dot{u}_d(t) > 0 \text{ và } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_l \\ -g(\tau, t) & \text{if } \dot{u}_d(t) < 0 \text{ và } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_r \end{cases}$$

(3)

Với  $u_d(t)$  là đầu vào,  $v(t)$  là đầu ra;  $m, c_r, c_l$  là bộ thông số của hàm rơ.

### 3. Nhận dạng hệ thống

Hàm tổng  $G_t(.)$  bao gồm  $G(.)$ ,  $BI(.)$ ,  $(B.)$  có thể được ước lượng tương đương một hàm bậc n:

$$A_1 y + A_2 \dot{y} + A_3 \ddot{y} + \dots + A_n y^{(n)} = u$$

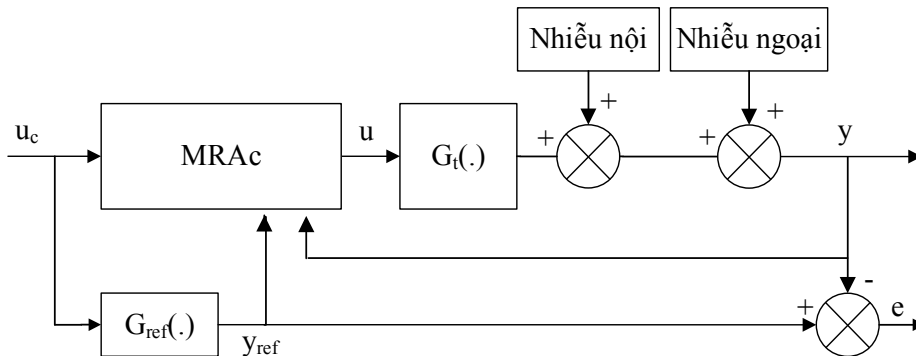
(4)

Với  $u, y$  là tín hiệu vào, ra của hàm, ta có thể nhận dạng hàm  $G_t(.)$  bằng *toolbox System Identification* của phần mềm Matlab.

Hàm  $G_{ref}(.)$  ước lượng từ  $G_t(.)$  được dùng như hàm mong muốn của hệ thống. Nó được dùng để tính toán tín hiệu vào  $u_c$  sao cho tín hiệu ra  $y_{ref} = G_{ref}(u_c)$ .  
 $y_{ref} = G_{ref}(u_c)$ . ( $y_{ref} \rightarrow y$ ) ( $y_{ref} \rightarrow y$ )  
 khi ( $G_{ref}(.) \rightarrow G_t(.)$ ) ( $G_{ref}(.) \rightarrow G_t(.)$ ).

### 4. Điều khiển đáp ứng

Trong giới hạn nghiên cứu để đảm bảo phù hợp với cơ cấu truyền động thông thường, ta sử dụng hàm truyền hệ thống có dạng bậc 2, bao gồm các thông số độ lợi, chuyển vị, đàn hồi.



Hình 5: Sơ đồ MRAS

Với MRAS (*Model reference adaptive system*) là hệ thống điều khiển đáp ứng theo hàm mẫu, MRAC (*Model reference adaptive control*) là hàm điều khiển đáp ứng theo hàm mẫu.

Hàm  $G(.)$  ( $y = G(s).u$ ) tương đương với  $G_t(.)$ , nhưng thông số đã bị ảnh hưởng bởi nhiễu.

Sai số  $e = y_{ref} - y$  xuất hiện từ sai số trong khâu nhận dạng hệ thống và do nhiễu.

Chúng ta chọn hệ thống điều khiển đáp ứng theo luật MIT [4-6] để giải quyết vấn đề, theo luật hàm đánh giá được định nghĩa như sau:

$$J(\theta) = \frac{e^2}{2} J(\theta) = \frac{e^2}{2}$$

(5)

Với  $e$  là sai số giữa tín hiệu đầu ra và tín hiệu mong muốn, và  $\theta$  là hệ số hiệu chỉnh.

Hệ số  $q$  được điều chỉnh sao cho hàm đánh giá tiến về 0. Do đó thông số  $q$  có dấu ngược với gradient của  $J$ :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \text{ (với } \frac{\partial e}{\partial \theta} \text{ là đạo hàm độ nhạy của hệ thống)}$$

Giả định rằng hệ là tuyến tính với hàm

truyền  $KG(s)$ , với  $K$  là thông số không biết trước và  $G(s)$  là hàm truyền bậc 2. Mục đích là điều khiển hệ thống bám theo hàm truyền mong muốn  $Gm(s) = KoG(s)Gm(s) = KoG(s)$ , với  $KoKo$  là hệ số đã biết.

$$E(s) = KG(s)U(s) - KoG(s)Uc(s) \quad (7)$$

Định nghĩa luật:

$$u(t) = \theta \cdot uc \quad (8)$$

$$\frac{\partial E(s)}{\partial \theta} = KG(s)Uc(s) = \frac{K}{Ko} Y_m(s) \quad (9)$$

Từ (4) và (7), ta có:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma e \frac{K}{Ko} y_m = -\gamma' e y_m \quad (10)$$

Phương trình (10) là luật hiệu chỉnh thông số  $\theta$ .

Bộ điều khiển sử dụng luật MIT có thể đưa ra kết quả tốt nhưng lại rất nhạy cảm với sự thay đổi biên độ của tín hiệu đầu vào. Do đó, giải thuật hiệu chỉnh được sử dụng.

Giải thuật hiệu chỉnh sửa đổi luật đáp

ứng như sau:

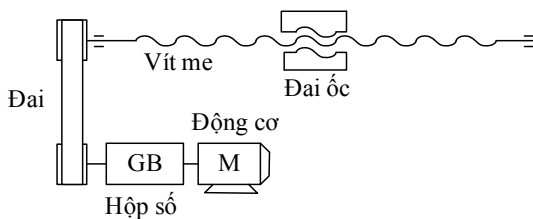
$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\gamma e \varphi}{\alpha + \varphi} \quad (11)$$

Với  $\varphi = \frac{de}{d\theta} \varphi = \frac{de}{d\theta}$  và  $\alpha (\alpha > 0)$

$\alpha (\alpha > 0)$  giúp loại bỏ vấn đề chia cho 0 khi  $\varphi$  nhỏ.

### III. KẾT QUẢ

#### 1. Mô hình hóa lý thuyết



**Hình 6:** Sơ đồ một hệ truyền động cơ khí thông thường

Cơ cấu được sử dụng để mô phỏng dựa trên một hệ máy CNC thông thường. Cơ cấu bao gồm bộ truyền vít me-đai ốc, động cơ, hộp số, đai truyền. Hàm truyền hệ thống là tuyến tính,

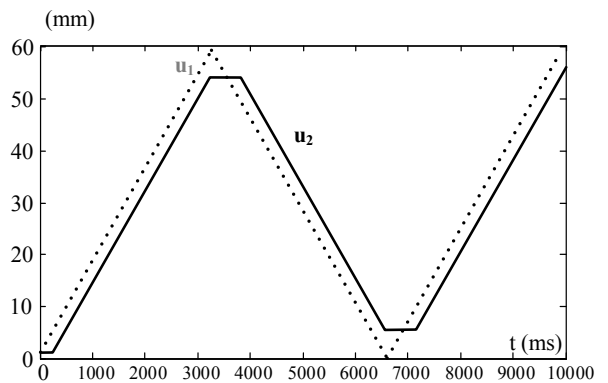
nhưng bị ảnh hưởng bởi nhiễu nội (giảm chấn và đàn hồi) và nhiễu ngoại (ngẫu nhiên).

Dựa vào số liệu thực tế, ta đưa ra các thông số mô phỏng như sau: bước vít  $p_s = 5mm$ , hệ số giảm tốc  $n = 80$ , hiệu suất hệ thống  $h_1 = 0.9$ , hệ số đàn hồi  $K = 0.0005$ , hệ số giảm chấn  $c = 0.0005$ , hệ số độ rơ  $m = 1$ ,  $c_r = 5mm$ ,  $c_l = -5mm$ .

Mô phỏng được thực hiện bằng *Matlab script* và *Simulate Model*.

#### a. Hàm rơ

- Tín hiệu vào dạng sóng tam giác biên độ 65 Rad, tần số 0.145 Hz.

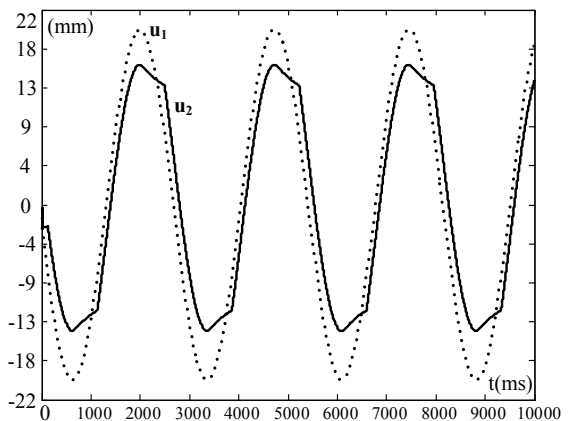


**Hình 7:** Đồ thị đáp ứng hệ thống khi không có rơ  $u_1$  và khi có rơ  $u_2$  (Tín hiệu vào dạng sóng tam giác)

- Tín hiệu vào dạng sóng sin:

$$v = 25\sin(2.3t + \pi)$$

$$v = 25\sin(2.3t + \pi) \text{ Rad}$$

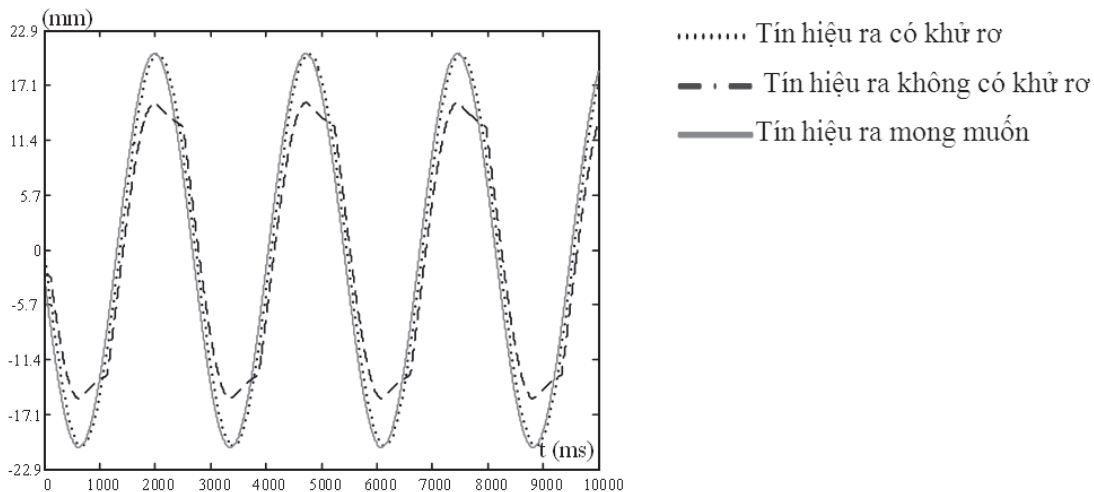


**Hình 8:** Đồ thị đáp ứng hệ thống khi không có rơ  $u_1u_1$  và khi có rơ  $u_2u_2$  (Tín hiệu vào dạng sóng sin)

### b) Hàm rơ ngược

Thông số mô phỏng không đổi với  $u_d$  là đầu vào,  $y$  là đầu ra hệ thống. Ta mô phỏng hệ thống có rơ và sau khi khử rơ bằng hàm rơ ngược.

Tín hiệu ra hệ thống với hàm rơ ngược bị trễ 100ms nhưng độ chính xác về biên độ đạt 99.4% so với tín hiệu mong muốn (hình 9).



**Hình 9:** Đồ thị đáp ứng hệ thống khi có và không có khử rơ

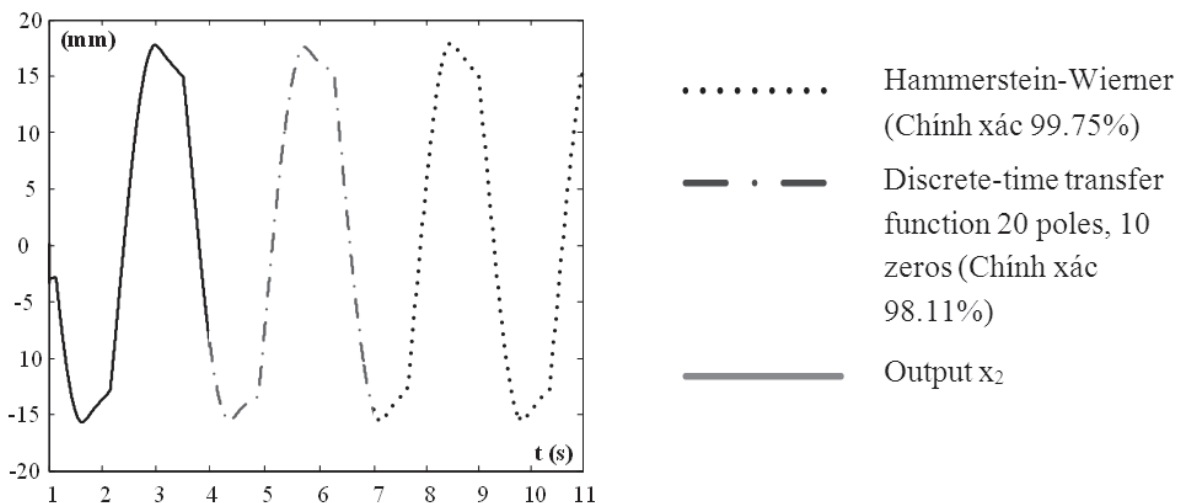
Độ chính xác của phương pháp *Hammerstein-Wierner* là khá cao. Tuy nhiên, chúng ta chọn phương pháp ước lượng hàm

### c) Nhận dạng hàm truyền

Phương pháp nhận dạng hàm truyền  $G(\cdot)$  phù hợp bao gồm: ước lượng hàm truyền dựa vào số cực và số zero cho trước, hoặc nhận dạng hàm truyền dựa theo mô hình *Hammerstein-Wierner*.

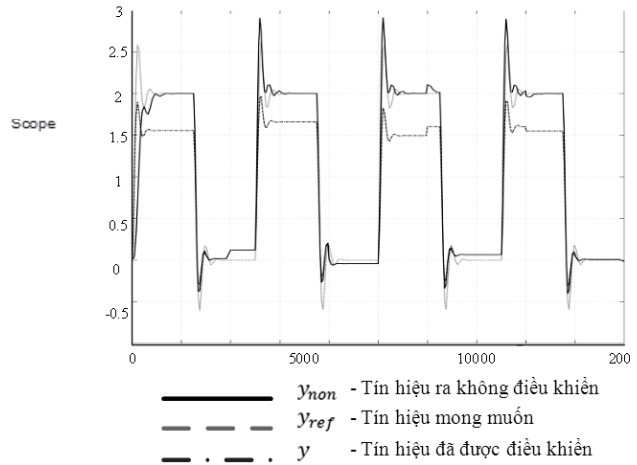
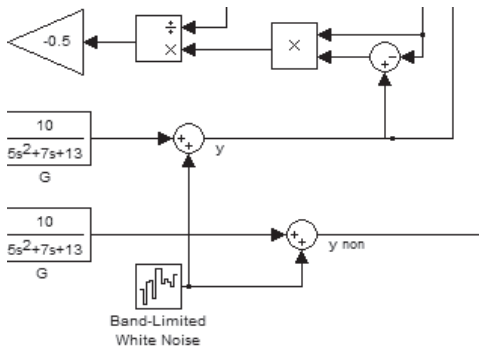
Dữ liệu không đổi từ mô phỏng của phần trước, ta nhận dạng hàm truyền  $G(\cdot)$  với  $\varphi$  là đầu vào và  $x_2$  là đầu ra (hình 10).

truyền rời rạc bởi độ chính xác của phương pháp này có thể kiểm soát được, phụ thuộc vào số cực và số zero cho trước (hình 10).



**Hình 10:** Đồ thị nhận dạng hàm truyền

**d) MRAC sử dụng luật MIT Rule cho hệ bậc 2**



**Hình 11:** Mô hình hóa hệ thống điều khiển đáp ứng theo luật MIT

Chúng ta áp dụng MRAC [4, 5] cho hệ bậc 2 với,

$$\gamma = 0.5, G_{ref}(s) = \frac{1}{5s^2+5s+10}, G(s) = \frac{10}{5s^2+7s+13}, u_c$$

$g = 0.5, u_c$  là tín hiệu sóng vuông với biên độ 2 tần số 0.2Hz. Nhiễu ngẫu nhiên bị chặn trong khoảng  $[-0.1, 0.1]$  tác động tới hệ thống mỗi 40s.

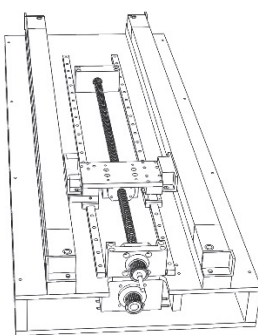
**Hình 12:** Kết quả mô phỏng của MRAC hiệu chỉnh bởi luật MIT

Thông số  $\gamma$  càng cao, tín hiệu ra càng đáp ứng nhanh. Tuy nhiên độ vọt lố tăng lên, sai số tín hiệu điều khiển giảm sau mỗi chu kỳ làm việc.

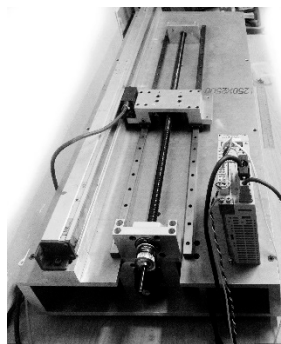
**2. Thục nghiệm**

**a. Mô hình cơ khí thực nghiệm**

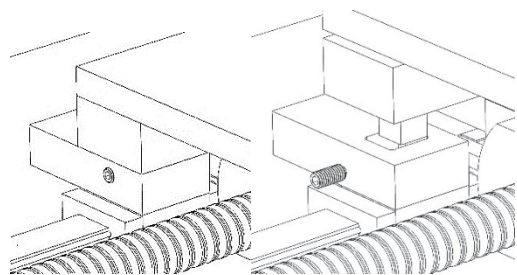
Một hệ thống cơ khí sử dụng cho mục đích thực nghiệm với một bộ tạo rơ cho phép điều chỉnh thông số  $c_r, c_l$  từ 0 đến 3mm đã được thiết kế và chế tạo (hình 13).



(a) Mô hình thiết kế



(b) Mô hình thực tế



(c) Cơ cấu tạo rơ

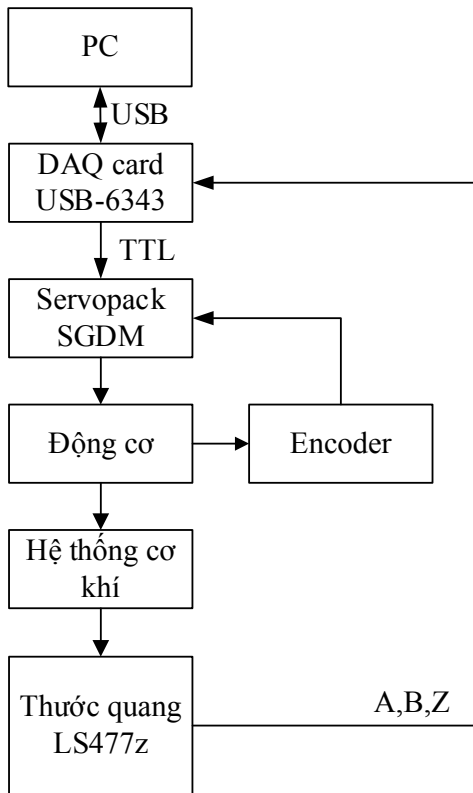
**Hình 13** Mô hình cơ khí thực nghiệm

Hệ thống có một động cơ AC với encoder được dẫn động bằng động cơ servo. Cơ cấu truyền động bao gồm hộp số, đai truyền và trục vít. Cơ cấu có thể thay đổi thành phần của

hệ để phục vụ các yêu cầu thực nghiệm khác nhau.

**b. Hệ thống điều khiển**

Phần cứng điều khiển được xây dựng như sau:



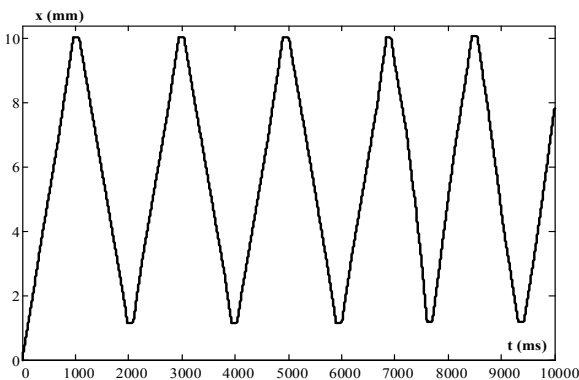
**Hình 15:** Cơ cấu phần cứng điều khiển Card DAQ USB-6343 là sản phẩm của NI được sử dụng để giao tiếp giữa máy tính và servopack, thước quang. Phần mềm được sử dụng để lập trình và giao tiếp là Labview với toolbox DAQmx.

### c. Kết quả thực nghiệm ban đầu

- Nhận dạng thông số độ rơ:

Tín hiệu vào dạng tam giác biên độ 11.2 Rad, tần số 0.56Hz.

Thông số độ rơ tạo ra bởi bộ tạo rơ:  $m = 1$ ,  $c_r - c_l = 2.2mm$ .



**Hình 16:** Đồ thị đáp ứng hệ thống

Sử dụng phương pháp hình học dựa trên hình 3 tại các vị trí độ rơ xuất hiện: 1800-2200, 2800-3200, 3800-4200, 4800-5200, và 5800-6200ms. Thông số độ rơ trung bình là:  $c_r = 1.109mm, c_l = -c_r$ . Sai số  $\frac{c_r - 1.109}{1.1} = 0.8\%$ .

- Xây dựng hàm rơ ngược:

Trong phương trình (3), tốc độ đáp ứng đạt vô cùng trong khi độ trễ về thời gian bị chặn. Tuy nhiên, trong thực tế phương trình (12) có tốc độ đáp ứng của hàm rơ ngược phụ thuộc vào tốc độ tối đa của đai ốc với thời gian trễ là rất nhỏ. Phương trình (3) được hiệu chỉnh thành:

$$(12) \quad \dot{v}(t) = \begin{cases} \frac{1}{m} \dot{u}_d(t) & \text{if } \dot{u}_d(t) \cdot 0 \text{ and } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_r \\ & \text{or } \dot{u}_d(t) < 0 \text{ and } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_l \\ 0 & \text{if } \dot{u}_d(t) = 0 \\ d\dot{u}_d(t) & \text{if } \dot{u}_d(t) > 0 \text{ and } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_l \\ & \text{or } \dot{u}_d(t) < 0 \text{ and } v(t) = \frac{u_d(t)}{m} + c_r \end{cases}$$

Hệ số góc  $d$  phụ thuộc vào tốc độ tối đa của đai ốc, ở điều kiện thực nghiệm là 160mm/s.

## IV. KẾT LUẬN

Mục tiêu bài báo là nhận dạng và xây dựng bộ điều khiển cho hệ thống có rơ. Bộ điều khiển được dựa trên các nghiên cứu đã có, bao gồm: hàm rơ, rơ ngược và mô hình điều khiển đáp ứng. Tuy nhiên, bộ điều khiển được điều chỉnh theo một trình tự mới. tính hiệu quả của giải thuật này đã được kiểm tra thông qua mô hình hóa lý thuyết và trong thực nghiệm.

Một mô hình cơ khí thực nghiệm đã được chế tạo có cơ cấu tạo rơ linh động với các thành phần có thể thay thế: động cơ, hộp tốc độ, thước quang, card giao tiếp và thông số hàm rơ. Do đó, mô hình cơ khí có thể được sử dụng cho các điều kiện thực nghiệm khác nhau.

Kết quả mô hình hóa lý thuyết cho thấy sai số hệ thống sau khi điều khiển giảm rõ rệt

so với không điều khiển và bị chặn. Về thực nghiệm, phương pháp nhận dạng hàm rơ và xây dựng hàm rơ ngược đã được kiểm tra, các phần thực nghiệm với các thông số khác đang được tiến hành.

### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Mattias Nordin và Per-Olof Gutman, *Controlling mechanical Systems with backlash-a survey*, Automatica, số 38, 1633-1649, (2000).
- [2] Gang Tao và Petar V. Kokotovic, *Continuous-Time Adaptive Control of Systems with Unknown Backlash*, American Control Conference, 1344-1348, (1993).
- [3] Gang Tao, *Continuous-time adaptive control of systems with unknown backlash*, IEEE Transaction on Automatic Control, 1083 – 1087, (1995).
- [4] Priyank Jain và M.J. Nigam, *Design of a Model Reference Adaptive Controller Using Modified MIT Rule for a Second Order System*, Advance in Electronic and Electric Engineering, tập 3 số 4, 477-484, (2013).
- [5] Karl Johan Astrom và Bjorn Wittenmark, *Adaptive control*, 180-260, Addison-Wesley, tái bản lần 2, 1995.
- [6] Priyank Jain và M.J. Nigam, *Design of a Model Reference Adaptive Controller Using Modified MIT Rule for a Second Order System*, Advance in Electronic and Electric Engineering, tập 3 số 4, 477-484, (2013).