

THỰC NGHIỆM BỘ ĐIỀU KHIỂN TUYẾN TÍNH HÓA CHÍNH XÁC KẾT HỢP KHÂU ƯỚC LƯỢNG NHIỀU ĐẦU VÀO THEO NGUYÊN LÝ TỐI ƯU DẠNG TRỰC THỜI GIAN CHO TRMS TRONG PHÒNG THÍ NGHIỆM

Đàm Bảo Lộc^{1*}, Nguyễn Duy Cường²

¹*Trường Cao đẳng Công nghiệp Thái Nguyên,*

²*Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên*

TÓM TẮT

Bài báo này tập trung vào thực nghiệm một bộ điều khiển tiên tiến trên hệ thống Twin Rotor Multi-Input Multi-Output (TRMS) trong phòng thí nghiệm. Nền tảng lý thuyết của bộ điều khiển đề xuất này gồm bộ điều khiển tuyến tính hóa chính xác và khâu ước lượng nhiễu đầu vào dựa trên nguyên lý tối ưu dạng trực thời gian. Thiết bị thực nghiệm gồm có một máy vi tính, một card dSPACE1103, một TRMS vật lý, thiết bị tạo nhiễu ngoài (quạt điện) và các cáp kết nối. Phần mềm Matlab/Simulink được sử dụng để cài đặt thông số của bộ điều khiển và phần mềm Control Desk được kết nối với Card dSPACE1103 để giao tiếp, xử lý và điều khiển TRMS. Kết quả thực nghiệm được thực hiện trên thiết bị thực trong điều kiện có nhiễu ngoài từ gió quạt với tín hiệu mẫu có dạng đơn vị và hình sin. Các kết quả thực nghiệm trên mô hình thiết bị thực cho thấy tín hiệu đầu ra nhanh chóng bám tín hiệu mẫu với độ chính xác cao, hệ thống làm việc ổn định ngay cả trong điều kiện nhiễu ngoài.

Từ khóa: *Tuyến tính hóa chính xác; ước lượng nhiễu đầu vào; tối ưu dạng trực thời gian; TRMS; Card dSPACE 1103.*

Ngày nhận bài: 22/4/2020; Ngày hoàn thiện: 21/5/2020; Ngày duyệt đăng: 25/5/2020

AN EXPERIMENT FOR COMBINATION OF THE ACCURATE LINEAR CONTROLLER AND AN INPUT DISTURBANCE ESTIMATOR BASED ON TIME RECEDING OPTIMIZATION FOR TRMS IN THE LABORATORY

Dam Bao Loc^{1*}, Nguyen Duy Cuong²

¹*Thai Nguyen Industrial College,*

²*TNU - University of Technology*

ABSTRACT

This paper focuses on the Twin Rotor Multi-Input Multi-Output (TRMS) system in the laboratory with an advanced controller. For the theoretical background, this proposed controller includes a linearized controller and an input disturbance estimator based on time receding optimization. Some main experimental equipments such as a computer, a dSPACE1103 card, a physical TRMS, external disturbance generating equipment (electric fans) and connection cables are used. The MATLAB/Simulink software was used to set the parameters for the controller and the Control Desk software was connected to the dSPACE1103 Card to communicate, calculate and control the TRMS. Experimental conditions are performed on real equipments in cases of reference signals with step and sinusoidal functions with an external disturbance (wind from the fan). Experimental results showed that the output signals quickly and accurately tracked to the reference signals and the system worked stably in conditions having external disturbance.

Keywords: *Accurate linearization; input disturbance estimator; time receding optimal; TRMS; dSPACE 1103 Card.*

Received: 22/4/2020; Revised: 21/5/2020; Published: 25/5/2020

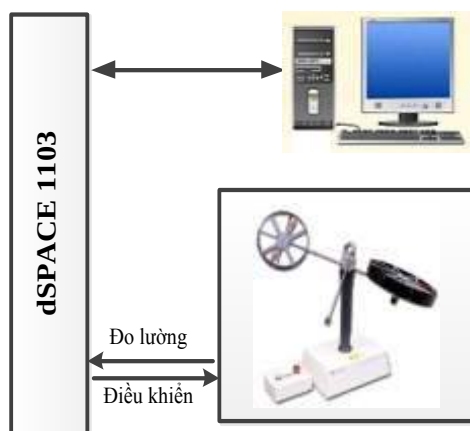
* Corresponding author. Email: dambaoloc@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Nhìn chung, với một bộ điều khiển sau khi đã thiết kế và được chứng minh trên mô phỏng thì mục tiêu tiếp theo là phải kiểm nghiệm xem bộ điều khiển đó có thể áp dụng vào đối tượng thực hay không. Trong bài báo này sẽ đưa ra phương pháp cài đặt và kiểm nghiệm bộ điều khiển tuyến tính hóa chính xác kết hợp khâu bù nhiễu đầu vào dựa trên nguyên lý tối ưu dọc trục thời gian cho hệ thống Twin Rotor Multi-Input Multi-Output (TRMS) trong phòng thí nghiệm. Việc cài đặt dựa trên bộ thí nghiệm TRMS sẵn có đã được cài bộ điều khiển PID do nhà sản xuất cung cấp [1]. Trên máy tính cài đặt phần mềm Matlab/Simulink và phần mềm điều khiển Control Desk. Phần mềm Matlab/Simulink dùng để cài đặt bộ điều khiển với các thông số đã chọn. Card dSP1103 thông qua phần mềm điều khiển Control Desk để giao tiếp, xử lý và điều khiển TRMS. Trong thí nghiệm này tín hiệu mẫu là hàm đơn vị và hàm sin cho hệ thống TRMS. Ngoài ra, để đánh giá ảnh hưởng của nhiễu ngoài, hệ thống còn được thiết kế thêm bộ tạo nhiễu dùng quạt gió.

2. Các thiết bị trên bàn thí nghiệm

Hình 1 mô tả cấu trúc hệ thống thí nghiệm TRMS, gồm có máy tính, Card ghép nối dSPACE 1103, hệ thống Twin Rotor MIMO. Các thành phần được mô tả chi tiết trong các phần dưới đây.



Hình 1. Cấu trúc vật lý của bàn thí nghiệm TRMS

2.1. Máy tính

- Cấu hình máy tính trong bàn thí nghiệm TRMS: Là loại Acer, có bộ vi xử lý Intel(R) Core(TM) i3-3220 CPU @ 3.30Ghz, RAM 2.00GB, ổ cứng 500 GB

- Máy tính được cài phần mềm Matlab 2012a và phần mềm ControlDesk 3.2.7 để giao tiếp, xử lý và điều khiển TRMS.

2.2. Card dSPACE DS 1103

Dùng cho kết nối, giao tiếp, đo các tín hiệu tương tác giữa máy tính và bộ biến đổi công suất.

2.3. Hệ vật lý TRMS

TRMS trong phòng thí nghiệm có mã hiệu TRMS 33-220 công ty thiết bị Feedback chế tạo gồm:

- Khối nguồn đóng, cắt và bảo vệ quá tải.
- Hai cánh quạt được truyền động bởi hai động cơ một chiều Maxon, mỗi động cơ có gắn máy phát tốc để lấy và đo vận tốc góc ω_v, ω_h và đưa tới khối ADC của Card dsPACE 1103.
- Hai cánh quạt được gắn theo phương vuông góc với nhau trên cùng một cánh tay đòn.
- Một thanh có gắn đối trọng được gắn vuông góc với cánh tay đòn tự do và cả hai cùng được gắn trên một trụ tại chốt quay.
- Trên chốt quay có gắn hai sen sơ đo góc chao dọc α_v và góc đảo lái α_h , giá trị hai góc này đưa tới dSPACE 1103.

2.4. Hệ thống tạo nhiễu ngoài

Với mong muốn kiểm chứng hệ thống TRMS có khả năng ổn định trong điều kiện nhiễu ngoài, một bộ tạo nhiễu chủ động tác động lên hệ thống TRMS là một quạt gió (hình 2) đã được lắp thêm với các thông số:

- Điện áp xoay chiều định mức: $U_{dm} = 220/240V$.
- Công suất định mức: $P_{dm} = 38 w$.
- Dòng định mức: $I_{dm} = 0,22 A$.
- Tần số định mức: $f_{dm} = 50/60 Hz$.

Hình 3 là mô hình thực nghiệm TRMS có tại Viện nghiên cứu phát triển Công nghệ cao về

Kỹ thuật Công nghiệp thuộc Đại học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên.



Hình 2. Quạt gió tạo nhiễu chủ động.



Hình 3. Mô hình bàn thí nghiệm TRMS

3. Cài đặt bộ điều khiển

3.1. Mô hình toán TRMS

Mô hình toán của TRMS được sử dụng là mô hình toán chính xác dựa theo phương trình Euler-Lagrange [2].

$$\begin{aligned} & [J_1 \cos^2 \alpha_v + J_2 \sin^2 \alpha_v + h^2(m_{T_1} + m_{T_2}) + J_3] \ddot{\alpha}_h \\ & + h(m_{T_1} l_{T_1} \cos \alpha_v + m_{T_2} l_{T_2} \sin \alpha_v) \dot{\alpha}_v^2 \\ & + 2\dot{\alpha}_h \dot{\alpha}_v (J_2 - J_1) \sin \alpha_v \cos \alpha_v = \sum_i M_{ih} \\ & (J_1 + J_2) \ddot{\alpha}_v + h(m_{T_1} l_{T_1} \sin \alpha_v - m_{T_2} l_{T_2} \cos \alpha_v) \dot{\alpha}_h \\ & + \dot{\alpha}_h^2 (J_1 - J_2) \sin \alpha_v \cos \alpha_v + \\ & + g(m_{T_1} l_{T_1} \cos \alpha_v + m_{T_2} l_{T_2} \sin \alpha_v) = \sum_i M_{iv} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó:

α_v, α_h : Lần lượt là các góc chao dọc và góc đảo lái của cánh tay đòn tự do của TRMS với mặt phẳng ngang và mặt phẳng đứng.

$\sum_i M_{ih}$: Tổng các mô men tác dụng trong chuyển động ngang, được tính:

$$\sum_i M_{ih} = M_{prop,h} - M_{fric,h} - M_{cable} + k_m \dot{\omega}_v \cos \alpha_v$$

$M_{prop,h} = l_t F_h(\omega_h) \cos(\alpha_v)$: Mô men của lực đẩy của cánh quạt đuôi;

$M_{fric,h}$: Mô men ma sát của cánh tay đòn tự do trong chuyển động ngang.

$$M_{fric,h} = k_{vfh} \Omega_h + k_{cfh} \text{sign}(\Omega_h) + \begin{cases} k_{sfh} \text{ khi } \Omega_h = 0^+ \\ -k_{sfh} \text{ khi } \Omega_h = 0^- \\ 0 \text{ trường hợp khác} \end{cases}$$

M_{cable} : Mô men của cáp dẹt

$$M_{cable} = \begin{cases} k_{chp} \alpha_h \text{ nếu } \alpha_h \geq 0 \\ k_{chn} \alpha_h \text{ nếu } \alpha_h < 0 \end{cases}$$

$\sum_i M_{iv}$: Tổng của các mô men trong chuyển động đứng, được tính:

$$\sum_i M_{iv} = M_{prop,v} - M_{fric,v} + k_t \dot{\omega}_h + M_{gyro}$$

$M_{prop,v} = l_m F_v(\omega_v)$: Mô men của lực đẩy do cánh quạt chính

$M_{gyro} = k_g F_v \Omega_h \cos \alpha_v$: Mô men con quay hồi chuyển

F_h, F_v : Lực sinh ra bởi cánh quạt đuôi và cánh quạt chính

$$F_h = \begin{cases} k_{fhp} \omega_h |\omega_h| \text{ khi } \omega_h \geq 0 \\ k_{fhn} \omega_h |\omega_h| \text{ khi } \omega_h < 0 \end{cases}$$

$$F_v = \begin{cases} k_{fvp} \omega_v |\omega_v| \text{ khi } \omega_v \geq 0 \\ k_{fvm} \omega_v |\omega_v| \text{ khi } \omega_v < 0 \end{cases}$$

Đưa mô hình toán TRMS về dạng tổng quát hệ Euler-Lagrange [3-5].

$$M(\underline{q}) \ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) \dot{\underline{q}} + \underline{g}(\underline{q}) = \underline{F} \underline{\tau} + \underline{n}(t) \quad (2)$$

Chuyển đổi mô hình Euler-Lagrange bất định (2) thành dạng Euler-Lagrange song tuyến bất định bằng cách đặt thành phần bất định mới:

$$\underline{d}(\underline{q}, t) = \underline{n}(t) - \underline{g}(\underline{q}) \quad (3)$$

Khi đó, mô hình Euler-Lagrange bất định ban đầu (2) trở thành:

$$M(\underline{q}) \ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) \dot{\underline{q}} = \underline{u} + \underline{d}(\underline{q}, t) \quad (4)$$

Ở đây $\underline{u} = \underline{\tau}$, tức là ở đây ta cũng đã giả thiết cơ cấu chấp hành giống như một khâu biến đổi lý tưởng các giá trị vật lý.

$$\underline{\tau} = \begin{pmatrix} \sum_i M_{ih} \\ \sum_i M_{iv} \end{pmatrix}, \quad \underline{q} = \begin{pmatrix} \alpha_h \\ \alpha_v \end{pmatrix}, \quad M(\underline{q}) = (m_{ij}(\underline{q})),$$

$$C(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = (c_{ij}(\underline{q}, \dot{\underline{q}})), \quad i, j = 1, 2, \quad F = I_{2 \times 2},$$

$$\underline{g}(\underline{q}) = \left(0, g(m_{T_1} l_{T_1} \cos \alpha_v + m_{T_2} l_{T_2} \sin \alpha_v) \right)^T$$

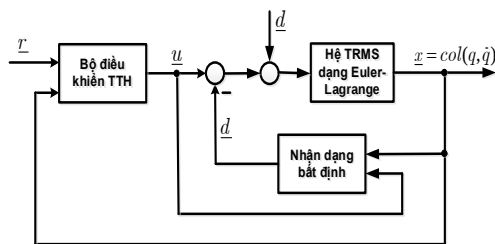
$$m_{11}(\underline{q}) = J_1 \cos^2 \alpha_v + J_2 \sin^2 \alpha_v + h^2(m_{T_1} + m_{T_2}) + J_3$$

$$\begin{aligned}
m_{12}(\underline{q}) &= m_{21}(\underline{q}) = \\
&= h(m_{T_1} l_{T_1} \sin \alpha_v - m_{T_2} l_{T_2} \cos \alpha_v), \\
m_{22}(\underline{q}) &= J_1 + J_2, \\
c_{11}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) &= 2\dot{\alpha}_v (J_2 - J_1) \sin \alpha_v \cos \alpha_v, \\
c_{12}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) &= \dot{\alpha}_v h(m_{T_1} l_{T_1} \cos \alpha_v + m_{T_2} l_{T_2} \sin \alpha_v) \\
c_{21}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) &= \dot{\alpha}_h (J_1 - J_2) \sin \alpha_v \cos \alpha_v \\
c_{22} &= 0.
\end{aligned}$$

Bảng 1. Tham số thực nghiệm cho hệ TRMS

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
h	0,06	m
m_{T_1}	0,8250	kg
m_{T_2}	0,0908	kg
l_{T_1}	0,0186	m
l_{T_2}	0,2443	m
J_1	0,0591	kgm^2
J_2	0,0059	kgm^2
J_3	$1,68 \times 10^{-5}$	kgm^2
g	9,81	m/s^2

Hình 4 là cấu trúc hệ thống điều khiển cho hệ TRMS có mô hình toán học dạng Euler-Lagrange. Đây là hệ thống điều khiển kết hợp giữa bộ điều khiển tuyến tính hóa chính xác và bộ nhận dạng bất định. Các thành phần của hệ thống điều khiển này sẽ được trình bày cụ thể ở mục 3.2 và 3.3.

**Hình 4.** Điều khiển kết hợp tuyến tính hóa chính xác và bù bất định

3.2. Bộ điều khiển tuyến tính hóa

$$\underline{u} = M(\underline{q})[\ddot{\underline{r}} + K_1 \dot{\underline{e}} + K_2 \underline{e}] + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}} \quad (5)$$

với $\underline{e} = \underline{r} - \underline{q}$.

Hai ma trận đối xứng xác định dương K_1, K_2 thỏa mãn:

$$K_1 = \text{diag}(k_{1i}), K_2 = \text{diag}(k_{2i}) \text{ với } k_{2i}^2 > k_{1i} > 0$$

3.3. Khối ước lượng nhiễu

Dùng để ước lượng nhiễu $\hat{d}$ theo nhiễu hệ thống $\underline{d}$ dựa trên nguyên lý tối ưu dọc trục thời gian [6].

4. Thực nghiệm

Cấu trúc hệ thống điều khiển hệ thực TRMS được thiết kế trên Simulink (hình 5), gồm có các thành phần:

- SVF1, SVF2: Các bộ lọc biến trạng thái, đây là khâu bậc hai.

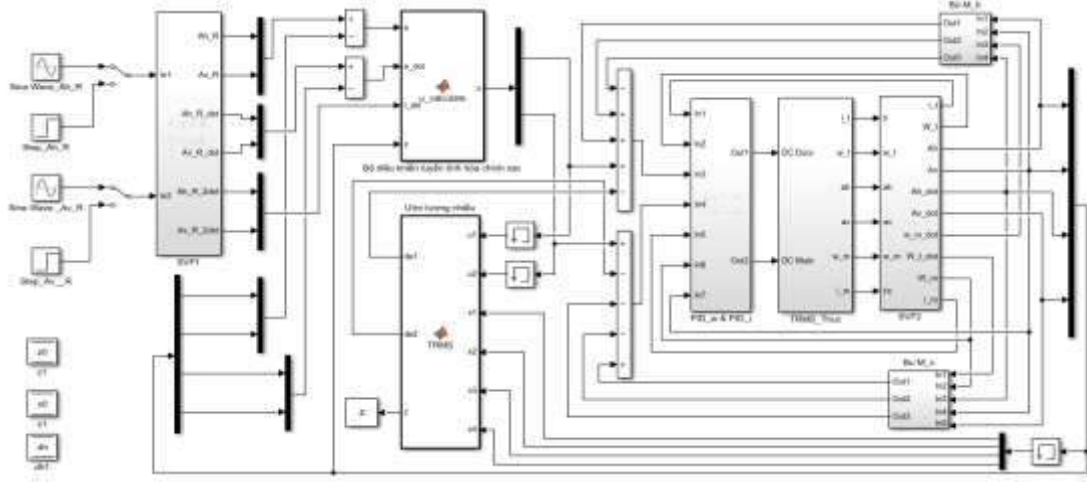
- Bộ điều khiển tuyến tính hóa chính xác: dùng để tính tín hiệu điều khiển mô men.

- PID_ω, PID_i: Các mạch vòng phản hồi âm tốc độ và âm dòng điện tương ứng cho động cơ đuôi và động cơ chính.

- TRMS vật lý: Liên kết Card dspace 1103 với Simulink thông qua phần mềm điều khiển Control Desk.

- Khối ước lượng nhiễu: Xác định nhiễu nhiễu và bù nhiễu $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ tương ứng theo mặt phẳng ngang và mặt phẳng đứng.

- Khối bù M_{bh}, M_{bv} : Dùng để tìm ra mô men lực đẩy của cánh quạt chính và cánh quạt đuôi, sau đó dựa vào mối liên hệ giữa mô men lực đẩy và tốc độ góc tương ứng của các động cơ đuôi và động cơ chính. Quá trình này được thực hiện như sau:



Hình 5. Cấu trúc hệ thống điều khiển hệ thực TRMS thiết kế trên Simulink

Từ công thức (1) đặt:

$$M_{bh} = -M_{fric,h} - M_{cable} + k_m \dot{\omega}_v \cos \alpha_v \quad (6)$$

ta sẽ có:

$$M_{prop,h} = \left(\sum_i M_{ih} \right) - M_{bh} \quad (7)$$

và

$$\omega_h = \begin{cases} -\sqrt{\frac{|M_{prop,h}|}{l_t k_{fhn} |\cos \alpha_v|}} & \text{khi } M_{prop,h} \cos \alpha_v < 0 \\ 0 & \text{khi } M_{prop,h} \cos \alpha_v = 0 \\ \sqrt{\frac{|M_{prop,h}|}{l_t k_{fhp} |\cos \alpha_v|}} & \text{khi } M_{prop,h} \cos \alpha_v > 0 \end{cases} \quad (8)$$

Tương tự, từ (1), đặt:

$$M_{bv} = -M_{fric,v} + k_t \dot{\omega}_h + M_{gyro} \quad (9)$$

sẽ được:

$$M_{prop,v} = \left(\sum_i M_{iv} \right) - M_{bv} \quad (10)$$

$$\omega_v = \begin{cases} \sqrt{\frac{|M_{prop,v}|}{l_m k_{fvp}}} & \text{khi } M_{prop,v} > 0 \\ 0 & \text{khi } M_{prop,v} = 0 \\ -\sqrt{\frac{|M_{prop,v}|}{l_m k_{fvn}}} & \text{khi } M_{prop,v} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Vector tín hiệu mẫu $\underline{r} = (r_1, r_2)^T$ cho hai

góc $\underline{q} = (\alpha_h, \alpha_v)^T$ cần phải bám theo vẫn được chọn là hằng số và dạng hình sin:

Trường hợp tín hiệu mẫu là hằng số:

$$\alpha_h \rightarrow r_1 = 0,5 \text{ [rad]} \quad \alpha_v \rightarrow r_2 = 0,3 \text{ [rad]}$$

Trường hợp tín hiệu mẫu dạng hình sin:

$$\alpha_h \rightarrow r_1 = 0,2 \sin(0,1256t) \text{ [rad]}$$

$$\alpha_v \rightarrow r_2 = -0,2 \sin(0,1256t) \text{ [rad]}$$

Bộ điều khiển tuyến tính hóa chính xác, có hai ma trận K_1, K_2 được chọn lần lượt là:

$$K_1 = \begin{pmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{pmatrix}; K_2 = \begin{pmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 30 \end{pmatrix}$$

Thông số các bộ điều khiển PID cho cơ cấu chấp hành là:

- Thông số bộ điều khiển tốc độ và dòng điện cho động cơ đầu:

$$\text{PID}_{\omega_h} : K_{p,\omega_h} = 10^{-5}; K_{I,\omega_h} = 10^{-6}$$

$$K_{d,\omega_h} = 35 \times 10^{-6}.$$

$$\text{PID}_{i_t} : K_{p,i_t} = 0,25; K_{I,i_t} = 20$$

$$K_{d,i_t} = 0,0028$$

- Thông số bộ điều khiển tốc độ và dòng điện cho động cơ chính:

$$\text{PID}_{\omega_v} : K_{p,\omega_v} = 4 \times 10^{-6}; K_{I,\omega_v} = 5 \times 10^{-5}$$

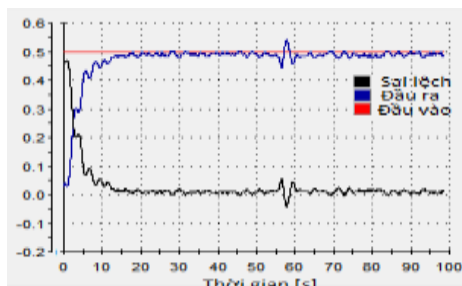
$$K_{d,\omega_v} = 15 \times 10^{-6}$$

$$\text{PID}_{i_v} : K_{p,i_v} = 0,1; K_{I,i_v} = 80$$

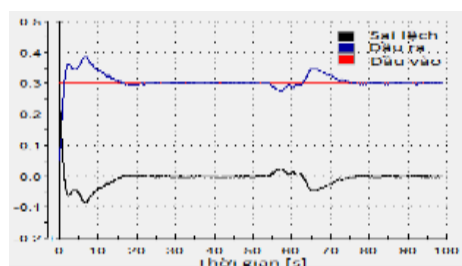
$$K_{d,i_v} = 0,0005$$

Các tham số PID này đã được lựa chọn trên cơ sở phương pháp Ziegler–Nichols thứ 2.

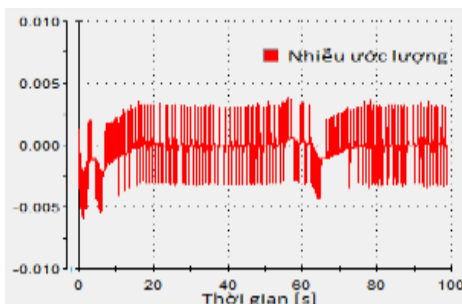
Tiến hành chạy thực nghiệm được kết quả như trên hình 6 đến hình 15.



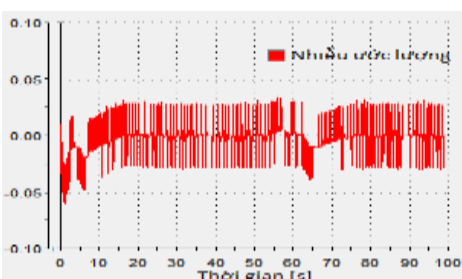
Hình 6. Đáp ứng góc đảo lái ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{hR} = 0,5$ cùng sai lệch khi có nhiễu ngoài



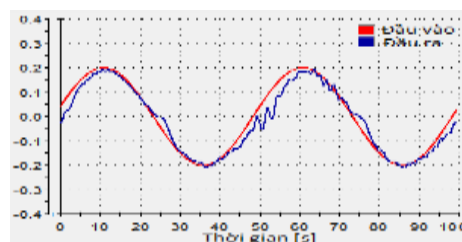
Hình 7. Đáp ứng góc chao dọc ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{vR} = 0,3$ cùng sai lệch khi có nhiễu ngoài.



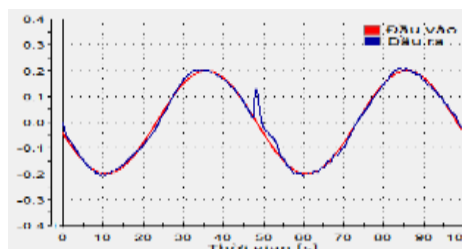
Hình 8. Nhiễu ước lượng $\hat{d}_h(t)$ ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{hR} = 0,5$ khi có nhiễu ngoài



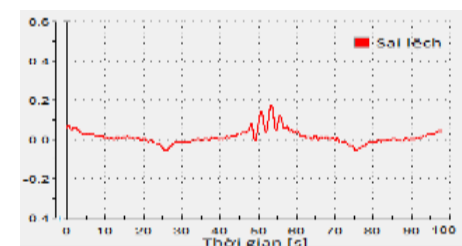
Hình 9. Nhiễu ước lượng $\hat{d}_v(t)$ ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{vR} = 0,3$ khi có nhiễu ngoài



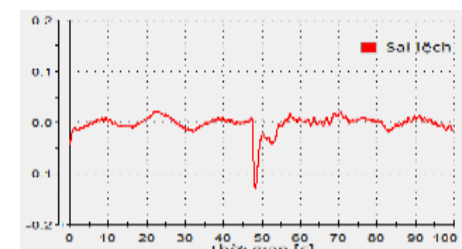
Hình 10. Đáp ứng góc đảo lái ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{hR} = 0,2 \sin(0,1256t)$ khi có nhiễu ngoài



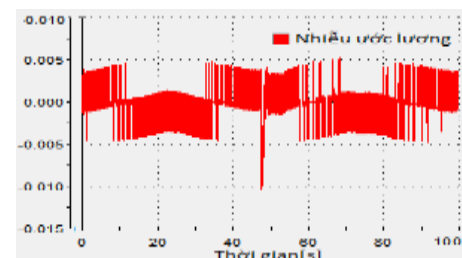
Hình 11. Đáp ứng góc chao dọc ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{vR} = -0,2 \sin(0,1256t)$ khi có nhiễu ngoài



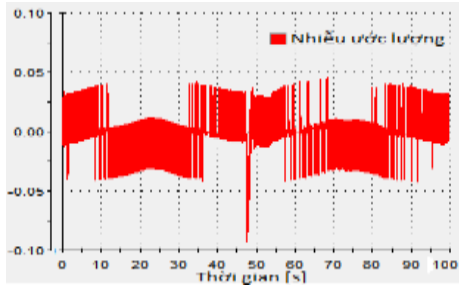
Hình 12. Sai lệch góc đảo lái ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{hR} = 0,2 \sin(0,1256t)$ khi có nhiễu ngoài



Hình 13. Sai lệch góc chao dọc ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{vR} = -0,2 \sin(0,1256t)$ khi có nhiễu ngoài



Hình 14. Nhiễu ước lượng $\hat{d}_h(t)$ ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{hR} = 0,2 \sin(0,1256t)$ khi có nhiễu ngoài



Hình 15. Nhiễu ước lượng $\hat{d}_v(t)$ ứng với tín hiệu mẫu $\alpha_{vR} = -0,2 \sin(0,1256t)$ khi có nhiễu ngoài. Hình 6 đến hình 15 là kết quả thực nghiệm khi có nhiễu ngoài là quạt gió từ thời điểm $t = (50 \div 100)s$. Tại thời điểm $t = 50[s]$, nhiễu ngoại lực ảnh hưởng khá mạnh đến hệ thống, tuy nhiên nhờ cơ cấu bù nhiễu mà đáp ứng đầu ra nhanh chóng bám tín hiệu mẫu. Điều này có thể thấy rõ qua các nhiễu ước lượng $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ phản ứng nhanh chóng với nhiễu ngoài (hình 8, hình 9, hình 14 và hình 15).

5. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã trình bày việc cài đặt và kiểm nghiệm bộ điều khiển tuyến tính hóa chính xác kết hợp khâu bù nhiễu đầu vào dựa trên nguyên lý tối ưu dọc trục thời gian cho hệ thống Twin Rotor Multi-Input Multi-Output (TRMS). Kết quả thực

ng nghiệm với tín hiệu mẫu là hàm đơn vị và hàm sin cho thấy tín hiệu đầu ra nhanh chóng bám tín hiệu mẫu, hệ thống làm việc ổn định ngay cả khi có nhiễu ngoài tác động.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. Twin Roto MIMO System Control Experiments 33-949S Feedback Instruments Ltd, East Sussex, U.K., 2006.
- [2]. A. Rahideh, and M. H. Shahee, "Mathematical dynamic modeling of a twin- rotor multiple input – multiple output System," *Proceedings of the IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 221, pp. 89-101, 2006.
- [3]. David Morin, *Introduction to Classical Mechanics: With Problems and Solutions*. Cambridge University, 2008.
- [4]. R. Ortega, A. Loria, P. J. Nicklasson, and H. S. Ramirez, *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems*. Springer Verlag, 1998.
- [5]. F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, *Robot Manipulator Control. Theory and Practice*. Marcel Dekker, Inc, 2004.
- [6]. D. P. Nguyen, and H. N. Nguyen, "Some methods of controlling the mechanical system have the uncertain Euler-Lagrange model," (in Vietnamese) Collection of papers in the first National Scientific Conference on Dynamics and Control, Da Nang, July 19-20, 2019, doi: 10.15625/vap.201900026.