

Application of Output-based filter for vibration suppression of gantry crane

Ứng dụng bộ lọc thiết kế dựa trên tín hiệu đầu ra để giảm rung động của cầu trục

Duong Minh Duc, Tran Anh Dung, Do Trong Hieu

Hanoi University of Science and Technology
Corresponding authors E-mail: hieu.dotrong@hust.edu.vn

Abstract

Gantry cranes are widely used in many different fields such as industry or transportation. However, the crane generates unwanted payload vibration during operation, causing operation and safety at work difficulties. There are many crane control methods, but most of them are quite complicated in controller design and practical implementation. This paper proposed the ADRC in combination with Output-based input shaping filter for gantry crane control, in which ADRC is used for precise position control and the filter is designed to reduce the payload sway angle. The advantage of this approach is that only the signals of the system output are required for the filter design. Since most of model information on the target system is not needed, the problem of parameter uncertainty is avoided. Simulation results show that the proposed design can not only suppress the vibrations in the sway angle output but also achieve the desired system response time in position control.

Keywords: ADRC; Model reference; Output-based filter; Gantry Crane Control

Tóm tắt

Cầu trục được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau như công nghiệp và giao thông vận tải. Tuy nhiên, trong quá trình vận hành cầu trục sẽ phát sinh rung động không mong muốn của tải trọng, gây khó khăn trong vận hành và an toàn khi làm việc. Có nhiều phương pháp điều khiển cầu trục, nhưng hầu hết chúng đều khá phức tạp trong thiết kế bộ điều khiển và thực hiện trong thực tế. Bài báo này đề xuất ADRC kết hợp với bộ lọc định hình đầu vào dựa trên đầu ra để điều khiển cầu trục giảm, trong đó ADRC được sử dụng để điều khiển vị trí chính xác và bộ lọc được thiết kế để giảm góc lắc của tải trọng. Ưu điểm của phương pháp này là chỉ cần các tín hiệu của đầu ra hệ thống cho thiết kế bộ lọc. Vì hầu hết thông tin về mô hình trên hệ thống mục tiêu là không cần thiết, nên tránh được vấn đề về độ không đảm bảo của tham số. Kết quả mô phỏng cho thấy thiết kế được đề xuất không chỉ có thể triệt tiêu các dao động ở đầu ra góc lắc mà còn đạt được thời gian phản hồi hệ thống mong muốn trong điều khiển vị trí. Các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả của phương pháp đề xuất.

1. Introduction

Cầu trục là thiết bị quan trọng được sử dụng trong nhiều lĩnh vực ngành nghề, có chức năng di chuyển, nâng hạ hàng hóa và các thiết bị có khối lượng lớn mà con người không làm được. Hệ thống cầu trục có kết cấu dạng con lắc, hoạt động trên hệ thống dầm đỡ. Vì vậy, việc thiết kế bộ điều khiển chống rung cho mô hình cầu trục đã trở thành một vấn đề được quan tâm trong nhiều thập kỷ. Trong suốt nhiều năm qua, nhiều phương pháp tiếp cận đã được nghiên cứu phát triển để giải quyết vấn đề này. Trong [1], [2] và [3], các tác giả đã phát triển bộ điều khiển PID để triệt tiêu dao động của tải trọng bằng cách sử dụng mô hình động lực học tuyến tính của cầu trục. Đối với mô hình phi tuyến, bộ điều khiển trượt được sử

dụng [4], [5], [6]. Tuy nhiên, các phương pháp điều khiển phản hồi ở trên cần thêm các thành phần phần cứng bổ sung. Chúng không chỉ đắt tiền mà còn có những thách thức trong quá trình lắp đặt. Ở một chiều hướng khác, hệ thống điều khiển vòng hở cũng được nghiên cứu và ứng dụng trong thực tế. Một kỹ thuật được đặt tên là phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào đã được một nhóm nghiên cứu tại MIT đề xuất và nội dung lý thuyết về phương pháp này đã được trình bày trong tài liệu [7], [8]. Phương pháp định hình đầu vào truyền thống hoạt động bằng cách tạo ra một tín hiệu bổ sung để loại bỏ rung động do tín hiệu đầu vào ban đầu gây ra. Trong số các thuật toán điều khiển vòng hở, phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào thu hút rất nhiều sự chú ý và được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng bao gồm cả điều khiển cầu trục [9], [10] và [11]. Thông thường, phương pháp này thường được sử dụng để định hình quỹ đạo của xe cầu mà vị trí của nó thường được điều khiển bởi bộ điều khiển PID [12].

Trong những năm gần đây, bộ điều khiển loại bỏ nhiễu chủ động (ADRC) đang được quan tâm để thay thế bộ điều khiển PID truyền thống [13]. Phương pháp điều khiển này cho thấy một số ưu điểm trong việc loại bỏ nhiễu và điều khiển các quá trình có các tham số khó xác định chính xác. ADRC là một phương pháp điều khiển trong đó mô hình hệ thống được mở rộng với một biến trạng thái mới, bao gồm tất cả động học và nhiễu chưa biết, thường xảy ra trong quá trình mô hình hóa hệ thống.

Một vấn đề của phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào truyền thống là mô hình rung động phải cố định, tức là tần số rung động và hệ số giảm chấn là không đổi. Do đó, để đạt được kết quả định hình đầu vào mong muốn, cần phải có hiểu biết tương đối chính xác về động lực học của đối tượng. Trong [14], một bộ lọc đầu vào được đề xuất, đây là một phương pháp thiết kế offline chỉ dựa trên các tín hiệu của đầu ra hệ

thông. Phương pháp thiết kế bộ lọc đầu vào dựa trên kết quả đầu ra của hệ thống là một phương pháp thiết kế nhằm giảm thiểu sự khác biệt giữa đầu ra của hệ thống thực tế và mô hình mẫu. Phương pháp này có một số ưu điểm chính: (a) chỉ yêu cầu các tín hiệu của đầu ra hệ thống, (b) có thể chọn độ giảm chấn và băng thông thích hợp của toàn hệ thống để mang lại động lực hệ thống mong muốn.

Bài báo này đề xuất kết hợp bộ điều khiển ADRC và bộ lọc định hình đầu vào dựa trên tín hiệu đầu ra để điều khiển cầu trục. Bộ điều khiển ADRC đóng vai trò điều khiển xe đẩy đến vị trí mong muốn, trong khi bộ lọc dựa trên tín hiệu đầu ra đóng vai trò triệt tiêu dao động của tải trọng. Kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng tốt của phương án điều khiển đề xuất. Nội dung của bài báo được tổ chức như sau. Phần 2 trình bày mô hình toán học của cầu trục. Phần 3 trình bày nội dung thiết kế điều khiển vị trí và chống rung cho cầu trục. Các kết quả mô phỏng được mô tả trong Phần 4. Cuối cùng, kết luận được đưa ra trong Phần 5.

2. Mô hình toán học của cầu trục

Xét mô hình hệ thống cầu trục di chuyển theo phương ngang X, treo một tải nặng ở dưới theo phương Y được mô tả như Hình 1, trong đó:

x : vị trí của xe đẩy theo phương X

l : chiều dài của cáp treo

θ : góc dao động của tải

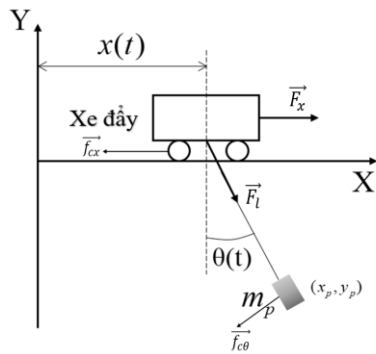
m_t : khối lượng xe đẩy

m_p : khối lượng tải

$f_{cx} = B_{eq}\dot{x}$: lực cản của không khí tác động vào chuyển động xe đẩy

$f_{c\theta} = B_p\dot{\theta}$: lực cản của không khí tác động vào chuyển động con lắc.

F_l : lực căng dây.



Hình 1: Mô hình cầu trục

Để đơn giản bài toán ta coi cả xe đẩy và tải là khối lượng của một chất điểm và tác động của nhiều được bỏ qua trong báo cáo này. Ta có vector vị trí tải trọng và xe đẩy trong hệ tọa độ XY được mô tả như sau:

$$x_m = x + l \sin \theta; \quad x_o = x \tag{1}$$

$$y_m = -l \cos \theta; \quad y_o = 0$$

Động năng và thế năng của toàn bộ hệ thống được tính theo công thức:

$$T = T_{cautruc} + T_{tai} = \frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) \tag{2}$$

$$P = m_p g y_m = -m_p g l \cos \theta$$

Ta có hàm Lagrange của hệ:

$$L = T - P = \frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + m_p g l \cos \theta \tag{3}$$

$$L = \frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{x}^2 + \dot{l}^2 + l^2 \dot{\theta}^2 + 2\dot{x}\dot{l} \sin \theta + 2\dot{x}l\dot{\theta} \cos \theta) + m_p g l \cos \theta$$

Áp dụng phương pháp lagrangian cho chuyển động tịnh tiến của xe theo trục X và chuyển động quay của con lắc ta được:

$$\begin{aligned} (m_t + m_p)\ddot{x} + m_p l \ddot{\theta} \cos \theta - m_p l \dot{\theta}^2 \sin \theta + 2m_p \dot{l} \dot{\theta} \cos \theta + m_p \ddot{l} \sin \theta &= F_x - B_{eq} \dot{x} \\ l \ddot{\theta} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta &= -B_p \dot{\theta} \end{aligned} \tag{4}$$

Với:

B_{eq} : hệ số nhớt cản xe theo trục X (Ns/m)

B_p : hệ số nhớt cản tải (Ns/rad)

Giả sử lực căng dây cáp khi kéo tải được bỏ qua, do đó chiều dài dây l coi như là không đổi nên ta có $\dot{l} = \ddot{l} = 0$. Thế vào các phương trình trên ta thu được hệ phương trình rút gọn mô tả mô hình cầu trục:

$$\begin{aligned} (m_t + m_p)\ddot{x} + m_p l \ddot{\theta} \cos \theta - m_p l \dot{\theta}^2 \sin \theta &= F_x - B_{eq} \dot{x} \\ l \ddot{\theta} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta &= -B_p \dot{\theta} \end{aligned} \tag{5}$$

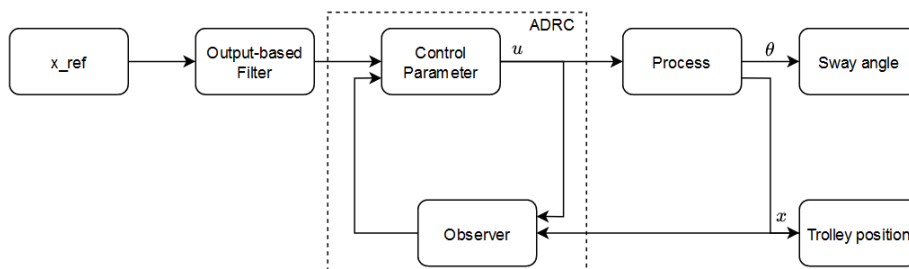
$$l \ddot{\theta} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta = -B_p \dot{\theta}$$

Từ phương trình 2 của hệ phương trình (5), với góc dao động là nhỏ, nên ta coi $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta$ từ đó có hàm truyền giữa góc dao động và vị trí:

$$\frac{\theta(s)}{X(s)} = \frac{-s^2}{ls^2 + B_p s + g} \tag{6}$$

Trong đó: $B_p = 2\xi\sqrt{gl}$ với ξ là hệ số giảm chấn.

Hệ thống điều khiển được thiết kế để có thể đạt được hai mục tiêu: điều khiển xe đẩy đến vị trí đặt mong muốn và giảm góc rung lắc của tải kích thích bởi chuyển động của xe đẩy. Do đó trong bài báo này, phương pháp được đề xuất là sử dụng bộ điều khiển ADRC để điều khiển vị trí của xe đẩy và sử dụng bộ lọc định dạng đầu vào dựa trên mô hình mẫu để giảm góc rung lắc của tải. Cấu trúc điều khiển kết hợp được mô tả như ở Hình 2.



Hình 2: Cấu trúc điều khiển cầu trục đề xuất

3. Thiết kế điều khiển

3.1. Thiết kế bộ điều khiển vị trí cho xe đẩy

Để xây dựng bộ điều khiển ADRC cho việc điều khiển vị trí xe đẩy, thực hiện biến đổi phương trình đầu tiên của hệ (5) về dạng:

$$\ddot{x} = f + b_0 \cdot u \quad (7)$$

Với:

$$f(t) = \frac{-m_p}{m_p + m_t} (l\theta \cos \theta - l\dot{\theta}^2 \sin \theta) - B_{eq} \dot{x}$$

$$u(t) = F_x$$

$$b_0 = \frac{1}{m_p + m_t}$$

Một bộ quan sát mở rộng (ESO) [13] được xây dựng để cung cấp giá trị ước lượng của f , từ đó thực hiện bù lại tác động của f trên mô hình bằng phương pháp loại bỏ nhiễu. Bộ quan sát mở rộng thiết kế dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = \hat{x}_2(t) + l_1(y(t) - \hat{x}_1(t)) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = \hat{x}_3(t) + b_0 \cdot u(t) + l_2(y(t) - \hat{x}_1(t)) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) = l_3(y(t) - \hat{x}_1(t)) \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó l_1, l_2, l_3 là các tham số của bộ quan sát. $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ lần lượt là các giá trị ước lượng của x, \dot{x} và f tương ứng. Khi đó với luật điều khiển có dạng

$$u = (u_0 - \hat{x}_3)/b_0 \quad (9)$$

Phương trình (7) sẽ được đưa về dạng hai khâu tích phân đơn giản:

$$\ddot{x}(t) = u_0 \quad (10)$$

Một trong những cách đơn giản được đề xuất để chọn luật điều khiển u_0 là chọn:

$$u_0 = K_p(r - \hat{x}_1) - K_D \cdot \hat{x}_2 \quad (11)$$

Thay (11) vào (10) ta có

$$\ddot{x}(t) = K_p(r(t) - x(t)) - K_D \cdot \dot{x}(t) \quad (12)$$

Hay hàm truyền hệ kín của vòng điều khiển vị trí là

$$G_{cl}(s) = \frac{X(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{s^2 + K_D s + K_p} \quad (13)$$

Trong đó K_p và K_D là các tham số của bộ điều khiển. Các tham số này cùng với các tham số của bộ quan sát mở rộng có thể lựa chọn theo phương pháp đề xuất bởi [15] trong đó T_{set} là thời gian quá độ mong muốn của đáp ứng hệ kín.

$$\begin{cases} K_p = (s^{CL})^2, K_D = -2s^{CL}, \\ l_1 = -3 \cdot s^{ESO}, l_2 = 3(s^{ESO})^2, l_3 = (s^{ESO})^3 \\ s^{CL} \approx -\frac{5.85}{T_{set}}, s^{ESO} = (3 \dots 10)s^{CL} \end{cases} \quad (14)$$

Khi đó hàm truyền hệ kín của vòng điều khiển vị trí sẽ có dạng

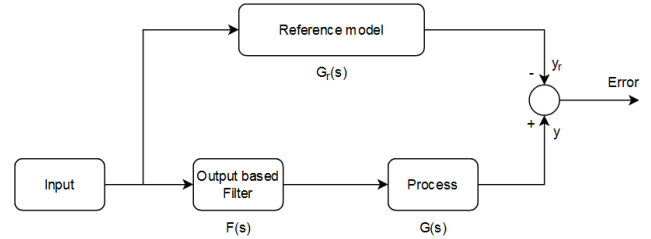
$$G_{cl}(s) = \frac{X(s)}{R(s)} = \frac{(s^{CL})^2}{(s - s^{CL})^2} \quad (15)$$

3.2. Thiết kế bộ lọc giảm dao động của tải trọng

3.2.1. Cơ sở lý thuyết về bộ lọc dựa trên tín hiệu đầu ra

Phương pháp thiết kế bộ lọc dựa trên đầu ra của hệ thống là một phương pháp thiết kế bộ lọc nhằm giảm thiểu sự khác biệt giữa đầu ra hệ thống thực và đầu ra của mô hình tham chiếu

[14]. Bằng cách giảm sự sai lệch giữa đầu ra, bộ lọc đầu vào đảm bảo rằng hệ thống thực tế đáp ứng theo kết quả tham chiếu. Cấu trúc chung của bộ lọc được thể hiện như Hình 3. $F(s)$ và $G_r(s)$ lần lượt là hàm truyền của bộ lọc và hàm truyền của đối tượng tham chiếu. Phương pháp này có một số ưu điểm chính: (a) chỉ yêu cầu các tín hiệu của đầu ra hệ thống, (b) có thể chọn độ giảm chấn và băng thông thích hợp của toàn hệ thống để mang lại động lực hệ thống mong muốn. Nhờ vậy mà khi kết hợp với bộ điều khiển ADRC thì không chỉ có thể loại bỏ hiệu quả các rung động ở đầu ra của hệ thống, mà còn giúp hệ thống đạt được thời gian đáp ứng mong muốn.



Hình 3: Cấu trúc bộ lọc

Xét đối tượng có hàm truyền sau:

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

Trong đó:

ξ : hệ số giảm chấn.

ω_n : tần số dao động tự nhiên.

K : hệ số khuếch đại

Mục đích thiết kế bộ lọc $F(s)$ để làm giảm dao động của đối tượng $G(s)$. Với đối tượng có dạng dao động như trên thì hàm truyền của mô hình tham chiếu có thể được đề xuất có dạng:

$$G_r(s) = \frac{K(s)}{s^2 + 2\xi_m\omega_m s + \omega_m^2} \quad (17)$$

Khi đó bộ lọc sẽ được đề xuất có dạng:

$$F(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + 2\xi_m\omega_m s + \omega_m^2} \quad (18)$$

Mục tiêu là tính toán các hệ số a_2, a_1, a_0 để $F(s) \cdot G(s) \approx G_r(s)$. Gọi $y(t)$ và $y_r(t)$ lần lượt là đáp ứng bước nhảy đơn vị của $F(s)G(s)$ và $G_r(s)$. Để có thể đạt được $F(s)G(s) \approx G_r(s)$ thì cần giảm thiểu sai lệch giữa $y(t)$ và $y_r(t)$. Một hàm chỉ phí được định nghĩa như sau:

$$E = \int_0^{\infty} (y(t) - y_r(t)) dt \quad (19)$$

Mục tiêu lúc này là xác định các tham số của bộ lọc sao cho E có giá trị nhỏ nhất. Trên thực tế khoảng tích phân có thể được chọn là một khoảng thời gian hữu hạn T đủ lớn

$$E = \int_0^T (y(t) - y_r(t))^2 dt \quad (20)$$

Đặt $F_d(s) = s^2 + 2\xi_{mj}\omega_{mj}s + \omega_{mj}^2$ và $f_i(s) = s^i/F_d$. Lúc này ta có

$$F(s)G(s) = \sum_{i=0}^2 a_i f_i(s)G(s) \quad (21)$$

Ký hiệu đáp ứng bước nhảy đơn vị của $f_i(s) \cdot G(s)$ là $y_i(t)$, khi đó:

$$y(t) = \sum_{i=0}^2 a_i y_i(t) \quad (22)$$

Lưu ý rằng $y(t)$ chưa xác định nếu $F(s)$ chưa biết, nhưng có thể xác định được $y_i(t)$ khi $F_d(s)$ đã biết.

Thay (22) vào (20) và theo phương pháp bình phương nhỏ nhất, điều kiện cần và đủ để đạt được giá trị E nhỏ nhất là:

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = 0, k = 0, 1, 2 \quad (23)$$

Các giá trị a_0, a_1, a_2 có thể nhận được từ việc giải hệ phương trình [14]:

$$\sum_{i=0}^2 a_i S_{k,i} - S_{k,r} = 0; k = 0, 1, 2 \quad (24)$$

Trong đó $S_{k,i}$ và $S_{k,r}$ được định nghĩa là

$$S_{k,i} = \int_0^T (y_k(t) y_i(t)) dt \quad (25)$$

$$S_{k,r} = \int_0^T (y_k(t) y_r(t)) dt$$

$$k = 0, 1, 2; i = 0, 1, 2$$

Trong ứng dụng thực tế, các dạng rời rạc của $S_{k,i}$ và $S_{k,r}$ sẽ thuận tiện hơn cho việc thiết kế:

$$S_{k,i} = \sum_{j=0}^N (y_k(j\Delta t) \cdot y_i(j\Delta t)) \quad (26)$$

$$S_{k,r} = \sum_{j=0}^N (y_k(j\Delta t) \cdot y_r(j\Delta t))$$

$$k = 0, 1, 2; i = 0, 1, 2$$

với Δt là thời gian trích mẫu và $N = T/\Delta t$. Khi $y_i(j\Delta t)$ và $y_r(j\Delta t)$ đã được trích mẫu thì $S_{k,i}$ và $S_{k,r}$ có thể được tính toán từ công thức (26) và a_0, a_1, a_2 có thể được tính toán từ công thức (24).

3.2.2. Thiết kế bộ lọc cho cầu trục

Đối với mô hình cầu trục, do hàm truyền giữa góc lắc tải và vị trí xe đẩy có dạng bậc hai, thông qua một số thử nghiệm, bài báo đề xuất chọn hàm truyền tham chiếu cho góc dao động của tải trọng $\theta(t)$ có dạng:

$$G_r(s) = \frac{-s}{(s + \omega_f)^2} \quad (27)$$

trong đó ta có $\lim_{s \rightarrow 0} G_r(s) = 0$ và $\lim_{s \rightarrow \infty} G_r(s) = 0$

Khi đó, bộ lọc thiết kế dựa trên tín hiệu đầu ra có dạng:

$$F(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{(s + \omega_f)^2} \quad (28)$$

Đề ý rằng khi thiết kế bộ lọc phía trước bộ điều khiển vị trí như cấu trúc ở Hình 2, ta có hàm truyền hệ kín của vị trí đặt và vị trí thực của xe đẩy lúc này sẽ trở thành:

$$G'_{cl}(s) = F(s) \frac{K_p}{s^2 + K_D s + K_p} \quad (29)$$

Do đó để vị trí của xe đẩy vẫn bám theo vị trí đặt thì ta chọn $a_0 = \omega_f^2$ hay nói cách khác:

$$\lim_{s \rightarrow 0} F(s) \frac{K_p}{s^2 + K_D s + K_p} = 1 \quad (30)$$

Khi đó bộ lọc chỉ còn có 2 tham số a_2 và a_1 cần phải tính toán dựa theo phương trình (24).

Bài báo này thực hiện tính toán thông số của bộ lọc với các giá trị $\omega_f = 2, 4$ và 6 để có thể so sánh kết quả.

3.3. Khảo sát đáp ứng vị trí trong miền thời gian

Xét tín hiệu đầu vào là tín hiệu bước nhảy $r(t) = 1(t)$ hay $R(s) = 1/s$. Khi đó, với tín hiệu vào là giá trị đặt bước nhảy đơn vị, $X(s) = R(s) \cdot G'_{cl}(s)$ hay

$$X(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{(s + \omega_f)^2} \cdot \frac{s_{cl}^2}{(s - s_{cl})^2} \quad (31)$$

Tiến hành biến đổi Laplace ngược, đáp ứng bước nhảy đơn vị của vị trí xe đẩy là:

$$x(t) = \frac{a_0}{\omega_f^2} - \frac{e^{-\omega_f t} \cdot A}{\omega_f^2 (s_{cl} + \omega_f)^3} - \frac{e^{s_{cl} t} \cdot B}{(s_{cl} + \omega_f)^3} - \frac{t e^{-\omega_f t} \cdot C}{\omega_f (s_{cl} + \omega_f)^2} + \frac{t e^{s_{cl} t} \cdot D}{(s_{cl} + \omega_f)^2} \quad (32)$$

Trong đó:

$$A = -a_2 s_{cl}^3 \omega_f^2 + a_0 s_{cl}^3 + a_2 s_{cl}^2 \omega_f^3 - 2a_1 s_{cl}^2 \omega_f^2 + 3a_0 s_{cl}^2 \omega_f$$

$$B = 3a_0 s_{cl} + a_0 \omega_f + 2a_1 s_{cl}^2 + a_2 s_{cl}^3 - a_2 s_{cl}^2 \omega_f$$

$$C = a_2 s_{cl}^2 \omega_f^2 - a_1 s_{cl}^2 \omega_f + a_0 s_{cl}^2$$

$$D = a_2 s_{cl}^3 + a_1 s_{cl}^2 + a_0 s_{cl}$$

Theo định nghĩa về thời gian xác lập t_s [16]:

$$|x(t_s) - x(\infty)| = \Delta \quad (33)$$

trong đó $x(\infty) = 1$ là giá trị xác lập của x và $\Delta = 2\%$ và lưu ý rằng $a_0 = \omega_f^2$, do đó

$$\frac{e^{-\omega_f t_s} \cdot A}{\omega_f^2 (s_{cl} + \omega_f)^3} + \frac{e^{s_{cl} t_s} \cdot B}{(s_{cl} + \omega_f)^3} + \frac{t_s e^{-\omega_f t_s} \cdot C}{\omega_f (s_{cl} + \omega_f)^2} - \frac{t_s e^{s_{cl} t_s} \cdot D}{(s_{cl} + \omega_f)^2} = 0.02 \quad (34)$$

Phương trình (34) thể hiện mối quan hệ giữa thời gian xác lập t_s và các hệ số của bộ lọc. Do đó khi các hệ số của bộ lọc đã xác định thì có thể tính được thời gian xác lập của hệ thống điều khiển vị trí xe cầu theo phương trình này.

4. Kết quả mô phỏng

Để kiểm tra sự hiệu quả của cấu trúc điều khiển được đề xuất cho hệ cầu trục, mô phỏng được thực hiện với các thông số về hệ cầu trục ở Bảng 1. Các thông số cho bộ điều khiển ADRC cho điều khiển cầu trục được lựa chọn như trình bày ở Bảng 2.

Với những thông số ở trên, từ mô hình đã xây dựng được ở Hình 4, tiến hành mô phỏng ta thu được các giá trị trích mẫu của $\theta_2(j\Delta t)$, $\theta_1(j\Delta t)$, $\theta_0(j\Delta t)$, $\theta_r(j\Delta t)$ (Phụ lục). Lựa chọn $\Delta t = 0.5s$, $T = 10s \rightarrow N = 20$, dựa vào công thức (24) và (26) ta tính được các tham số a_2, a_1, a_0 của bộ lọc cho lần lượt $\omega_f = 2, 4$ và 6 theo Bảng 3.

Bảng 1: Thông số của hệ thống cầu trục

m_t (kg)	0.536	ξ	0	g (m/s ²)	9.8
m_p (kg)	0.375	l (m)	0.64	-	-

Bảng 2: Thông số của bộ điều khiển vị trí

b_0	1.0977	K_p	2.1389	l_1	39.4875
T_{set} (s)	4	K_D	2.9250	l_2	519.7542
s_{cl}	-1.462	s^{ESO}	-13.1625	l_3	2280.4

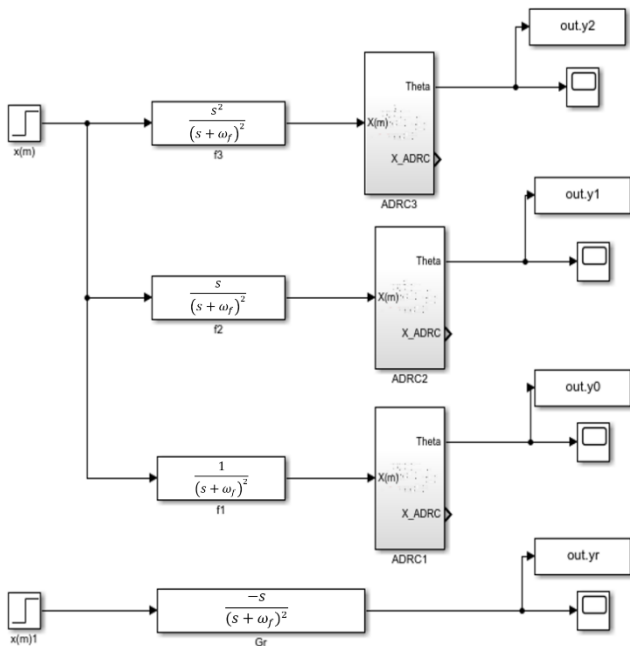
Bảng 3: Thông số của bộ lọc theo giá trị của ω_f

$\omega_f = 2$	$\omega_f = 4$	$\omega_f = 6$
$a_2 = 0.1747$	$a_2 = 1.3654$	$a_2 = 3.2540$
$a_1 = 0.0025$	$a_1 = 1.0849$	$a_1 = 1.3444$
$a_0 = 4$	$a_0 = 16$	$a_0 = 36$

Với $s_{cl} = -1.462$ cùng với thông số bộ lọc được tính toán trong Bảng 3, thay vào phương trình (34) ta xác định thời gian quá độ của đáp ứng vị trí cho từng trường hợp bộ lọc ứng với từng ω_f như ở Bảng 4.

Bảng 4: Thời gian quá độ của đáp ứng vị trí theo từng bộ lọc

$\omega_f = 2$	$\omega_f = 4$	$\omega_f = 6$
$t_s = 5.48(s)$	$t_s = 4.62(s)$	$t_s = 4.43(s)$



Hình 4: Mô phỏng mô hình tính toán xác định tham số của bộ lọc

Các kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 5 và Hình 6. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển ADRC kết hợp bộ lọc cho thấy độ giảm góc dao động rõ rệt so với bộ điều khiển ADRC thông thường. Tuy nhiên do có bộ lọc nên thời gian đáp ứng vị trí của xe đẩy sẽ chậm hơn khi chỉ sử dụng bộ điều khiển ADRC thông thường.

Bộ điều khiển ADRC đối với mô hình cầu trục có thời gian quá độ vị trí khoảng 3.7(s), sai lệch so với thời gian quá độ mong muốn $T_{set} = 4(s)$ khoảng 0.3(s). Sai số này một phần là do khi tính toán đã làm tròn số. Góc dao động khoảng 0.06(rad) $\approx 3.44^\circ$, có hiện tượng tắt dần và tắt hẳn sau khoảng 9(s).

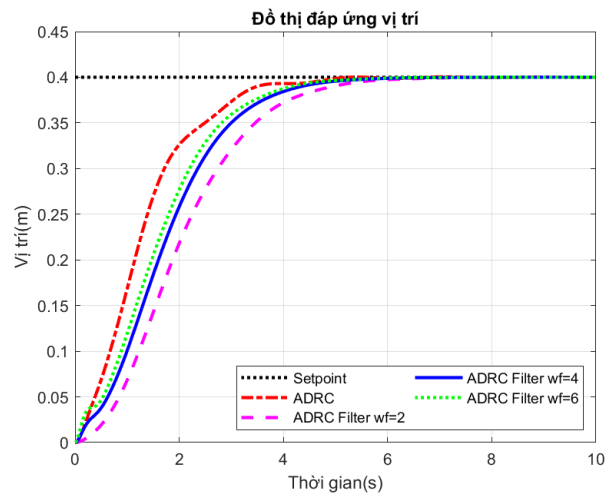
Trường hợp $\omega_f = 2$ cho góc dao động nhỏ nhất khoảng 0.018 (rad) $\approx 1.03^\circ$ (so với bộ ADRC 3.44°) và tắt hẳn sau 6s, tuy nhiên thời gian quá độ của vị trí lại lớn nhất khoảng 5.4 (s) (so với 3.7(s) của bộ ADRC) và khá đúng với thời gian xác lập tính toán.

Trường hợp $\omega_f = 4$ có thời gian quá độ vị trí là khoảng 4.5s và góc dao động khoảng 0.03 (rad) $\approx 1.71^\circ$ và tắt hẳn sau khoảng 5s. Thời gian quá độ khá đúng với thời gian xác lập tính toán $t_s = 4.62(s)$ (sai lệch 0.12s).

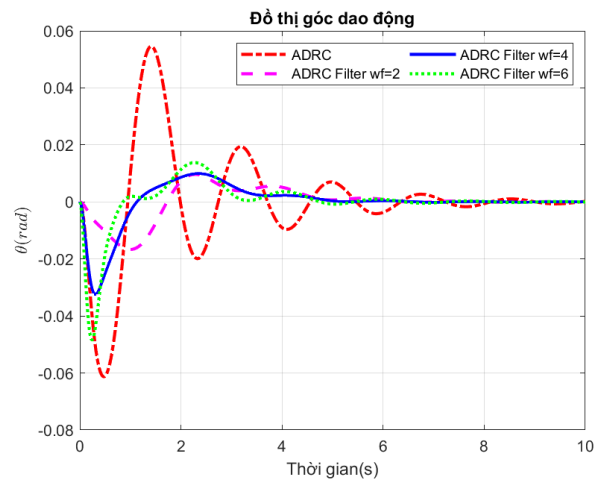
Trường hợp $\omega_f = 6$ có thời gian quá độ vị trí nhỏ nhất khoảng 4.3(s) nhưng góc dao động lớn, khoảng 0.05 (rad) $\approx 2.86^\circ$ và tắt hẳn sau 6(s). Thời gian quá độ khá đúng với thời gian xác lập tính toán ($t_s = 4.43(s)$) (sai lệch 0.13s)

5. Kết luận

Bài báo này đề xuất một thiết kế kết hợp của bộ điều khiển ADRC với bộ lọc định hình đầu vào được thiết kế dựa trên tín hiệu đầu ra cho bài toán điều khiển vị trí và chống rung cho cầu trục. Phương pháp thiết kế này chỉ yêu cầu đầu ra của hệ thống, trong khi hầu hết thông tin về mô hình hệ thống là không cần thiết. Kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng tốt của hệ thống về đáp ứng vị trí của xe đẩy và chống rung cho tải trọng.



Hình 5: Đáp ứng vị trí của xe đẩy



Hình 6: Góc dao động của tải trọng

Tài liệu tham khảo

- [1] Jaafar, H. I., Hussien, S. Y. S., Ghazali, R., & Mohamed, Z. (2015). "Optimal tuning of PID+PD controller by PFS for Gantry Crane System". *10th Asian Control Conference (ASCC)*.
- [2] Z. Sun, N. Wang, Y. Bi, and J. Zhao (2015), "A DE based PID controller for two-dimensional overhead crane," *Chinese Control Conference, CCC*, vol. 2015-Sept. pp. 2546–2550.
- [3] M. I. Solihin, Wahyudi, M. A. S. Kamal, and A. Legowo (2008), "Optimal PID controller tuning of automatic gantry crane using PSO algorithm," *Proceeding of the 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications, ISMA 2008*.

[4] M. S. Park, D. Chwa, and M. Eom (2014), "Adaptive sliding-mode anti-sway control of uncertain overhead cranes with high-speed hoisting motion," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 5. pp. 1262–1271

[5] A. Pisano, S. Scodina, and E. Usai (2010), "Load swing suppression in the 3-dimensional overhead crane via second-order sliding modes," *Proceedings of the 2010 11th International Workshop on Variable Structure Systems, VSS 2010*. pp. 452–457.

[6] X. J. Wang and Z. M. Che (2016), "Two-degree-of-freedom sliding mode anti-swing and positioning controller for overhead cranes," *Proceedings of the 28th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2016*. pp. 673–677.

[7] Singer, N. C. and Seering, W. P. (1990). "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration". *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112, 76-82.

[8] Singhose, W., Seering, W., and Singer, N. (1994). "Residual Vibration Reduction Using Vector Diagrams to Generate Shaped Inputs". *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 116, 654-659.

[9] W. Singhose, L. Porter, M. Kenison, and E. Kriekku (2000), "Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes," *Control Engineering Practice*, vol. 8, no. 10. pp. 1159–1165.

[10] K. Sorensen, W. Singhose, and S. Dickerson (2005), "A controller enabling precise positioning and sway reduction in cranes with on-off actuation," *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, vol. 16. pp. 580–585.

[11] D. Kim and W. Singhose (2010), "Performance studies of human operators driving double-pendulum bridge cranes", *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 6. pp. 567–576.

[12] J. R. Huey (2006). "The intelligent combination of input shaping and PID feedback control," *PhD diss., Georgia Institute of Technology*.

[13] J. Han (2009), "From PID to active disturbance rejection control", *IEEE Trans. Ind. Electronics.*, 2009, Vol 56, No.3, pp. 900-906.

[14] J. Han, Z. Zhu, Y. He and J. Qi (2015), "A novel input shaping method based on system output", *Journal of Sound and Vibration*, Volume 335, pp. 338-349.

[15] G. Herbs (2013), "A Simulative Study on Active Disturbance Rejection Control as a Control Tool for Practitioners", *In Siemens AG, Clemens-Winkler-Strabe 3, Germany 2013*.

[16] K. Ogata (2011), "Modern Control Engineering", Pearson, 5th edition.

20	0.0004	-3.51E-05	-3.044E-05	-8.2446E-09
----	--------	-----------	------------	-------------

Bảng 6: Bảng giá trị trích mẫu cho bộ lọc $\omega_f = 4$

j	$\theta_2(j\Delta t)$	$\theta_1(j\Delta t)$	$\theta_0(j\Delta t)$	$\theta_r(j\Delta t)$
0	0	0	0	0
1	0.0005	-0.005	-0.0012	-0.027
2	0.0205	0.0028	-0.0021	-0.0073
3	-0.0101	0.006	0.0007	-0.0014
4	-0.0133	-0.0019	0.0017	-0.0002
5	0.008	-0.0029	0.0001	0
6	0.005	0.0014	-0.0001	0
7	-0.0059	0.0007	0.0006	0
8	-0.0008	-0.0014	0.0003	0
9	0.0039	-0.0002	-0.0002	0
10	-0.0004	0.0007	0	0
11	-0.002	-0.0001	0.0002	0
12	0.0009	-0.0004	0	0
13	0.0009	0.0002	0	0
14	-0.0008	0.0001	0	0
15	-0.0003	-0.0001	0	0
16	0.0005	0	0	0
17	0	0.0001	0	0
18	-0.0003	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0.0001	0	0	0

Bảng 7: Bảng giá trị trích mẫu cho bộ lọc $\omega_f = 6$

j	$\theta_2(j\Delta t)$	$\theta_1(j\Delta t)$	$\theta_0(j\Delta t)$	$\theta_r(j\Delta t)$
0	0	0	0	0
1	0.005	-0.0028	-0.0008	-0.0099
2	0.0096	0.0027	-0.0009	-0.0009
3	-0.0092	0.0025	0.0007	0
4	-0.0046	-0.002	0.0008	0
5	0.0063	-0.001	-0.0002	0
6	0.0008	0.0012	0	0
7	-0.0037	0	0.0003	0
8	0.0007	-0.0008	0	0
9	0.002	0.0001	-0.0001	0
10	-0.0009	0.0004	0	0
11	-0.0008	-0.0002	0	0
12	0.0008	-0.0001	0	0
13	0.0002	0.0001	0	0
14	-0.0005	0	0	0
15	0	-0.0001	0	0
16	0.0003	0	0	0
17	-0.0001	0	0	0
18	-0.0001	0	0	0
19	0.0001	0	0	0
20	0	0	0	0

Phụ lục

Bảng 5: Bảng giá trị trích mẫu cho bộ lọc $\omega_f = 2$

j	$\theta_2(j\Delta t)$	$\theta_1(j\Delta t)$	$\theta_0(j\Delta t)$	$\theta_r(j\Delta t)$
0	0	0	0	0
1	-0.0153	-0.0095	-0.0019	-0.0735
2	0.0401	-0.0016	-0.0059	-0.0541
3	0.0066	0.0136	-0.0021	-0.0298
4	-0.0318	0.0044	0.0031	-0.0146
5	-0.0018	-0.0056	0.0022	-0.0067
6	0.01489	-0.0002	0.00041	-0.0029
7	-0.0053	0.0025	0.0014	-0.0013
8	-0.0075	-0.002	0.0016	-0.0005
9	0.0059	-0.0022	0.0003	-0.0002
10	0.0033	0.0009	2.8338E-05	-9.08E-05
11	-0.004	0.0004	0.0005	-3.6744E-05
12	-0.0004	-0.0011	0.0002	-1.4746E-05
13	0.0028	-0.0001	-0.0001	-5.8769E-06
14	-0.0005	0.0005	3.1939E-05	-2.3283E-06
15	-0.0014	-0.0002	0.0001	-9.1770E-07
16	0.0008	-0.0003	-2.209E-05	-3.6011E-07
17	0.0006	0.0002	-5.752E-05	-1.4076E-07
18	-0.0006	0.0001	4.2189E-05	-5.4828E-08
19	-0.0002	-0.0001	2.7532E-05	-2.1290E-08