

Điều khiển bám quỹ đạo của máy bốc dỡ than dạng gàu xúc liên tục bằng phương pháp dự đoán mô hình

Phan Đăng Phong^{1,*}, Đỗ Đăng Khoa², Lê Quang Dương²

¹ Viện Nghiên cứu cơ khí

² Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: phongpd@narime.gov.vn

Tóm tắt. Máy bốc dỡ than dạng gàu xúc liên tục (CSU) là một hệ động lực dạng tay máy để vận chuyển than từ khoang tàu thủy lên các băng chuyền đưa về các kho/bãi chứa dự trữ cho các nhà máy nhiệt điện. Trong bài báo, mô hình động lực của máy bốc dỡ than dạng gàu xúc liên tục được xây dựng bằng phương pháp Lagrange II dựa trên các số liệu của từ hệ thống thật của dự án nhiệt điện Sông Hậu I. Việc điều khiển hệ tay máy để lấy than trong không gian hạn chế của khoang tàu được thực hiện nhờ bộ điều khiển dự đoán mô hình với khả năng xử lý các ràng buộc khớp và vị trí đầu gàu xúc kết hợp với bộ lọc Kalman mở rộng. Tính khả thi của bộ điều khiển đề xuất được thể hiện qua kết quả mô phỏng số.

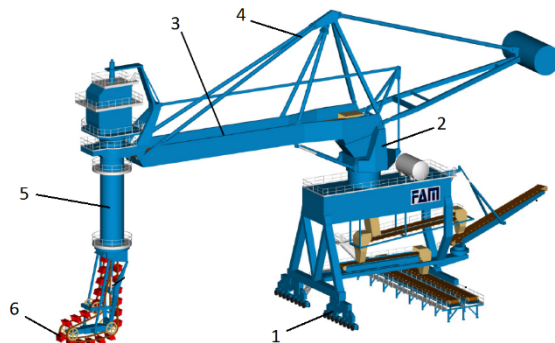
Từ khóa: Máy bốc dỡ than dạng gàu xúc liên tục, điều khiển dự đoán mô hình, bộ lọc Kalman.

1. Giới thiệu

Các nhà máy nhiệt điện đóng một vai trò trọng trong ngành sản xuất điện ở nước ta. Để duy trì hoạt động liên tục và ổn định cho việc sản xuất, quá trình vận chuyển nhiên liệu than đến các tổ máy cần được đảm bảo về chất lượng và tiến độ. Trong đó, khâu bốc dỡ than từ tàu vận chuyển có tải trọng lớn đóng vai trò quyết định. Các tổ máy bốc dỡ than hoạt động như các tay máy khổng lồ trong không gian của các khoang tàu vận tải. Các tay máy này cần đảm bảo tính linh hoạt khéo léo để thu gom than theo quỹ đạo thiết kế với tốc độ yêu cầu đồng thời tránh va chạm với khoang tàu.

Máy bốc dỡ than dạng gàu xúc liên tục (CSU) có thiết kế khá phức tạp. Máy được trang bị thang cuốn gàu xúc trên chân đào chữ L để thu gom nguyên liệu theo cơ chế cuốn liên tục. Chân đào L xoay được quanh phương đứng. Hệ thống cần trục chuyên động lên xuống theo phương đứng nhờ các xi lanh thủy lực. Phần bộ mâm xoay đảm bảo cho cơ cấu máy vươn tới những khu vực cần thiết. Hệ thống bánh di chuyển cũng được sử dụng để thực hiện các chuyển động lấy than dọc theo khoang tàu. Than sau khi được mức bởi hệ thống gàu xúc sẽ được đưa lên cao và đổ vào băng tải của phần cần trục, sau đó thông qua hệ thống ống phân phối được chuyển tới hệ thống băng tải từ bên cảng tới các kho than.

Trong bài báo này, bộ điều khiển dự đoán mô hình (MPC – Model Predictive Control) được sử dụng để thiết kế luật điều khiển cho các động cơ của CSU với mục tiêu điều khiển chân đào của máy bám theo quỹ đạo được thiết kế trong không gian của khoang tàu. Quỹ đạo được chọn thiết kế sát với thành khoang tàu nên có hạn chế về góc quay của gàu xúc. Bộ điều khiển MPC được thiết kế dựa trên mô hình động lực của máy bốc dỡ than. Mô hình này được xây dựng với các thông số tham khảo từ thiết kế thực tế đồng thời có kể đến lực cản tại chân đào do ma sát với than gây ra. Các



Hình 1. Mô hình máy bốc dỡ than CSU

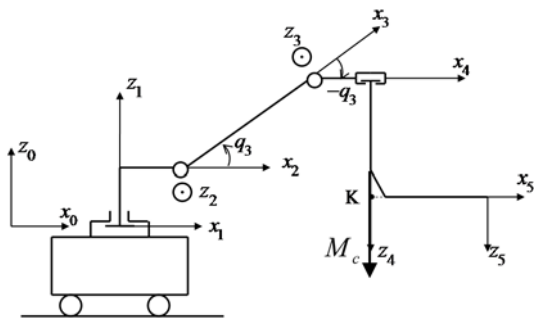
1- Bộ di chuyển, 2- Bộ xoay, 3- Cần trục, 4- Giàn treo, 5- Chân đào, 6- Gàu xúc

hạn chế của mô men, và lực động cơ cũng như hạn chế của các khớp cứng được tính đến trong quá trình thiết kế bộ điều khiển MPC.

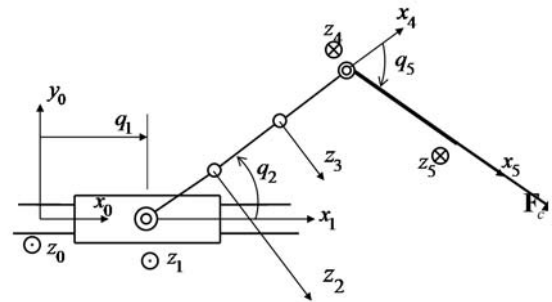
2. Mô hình động lực của máy bốc dỡ than

Để tính toán mô hình động học cũng như động lực học của máy bốc dỡ than, một số giả thiết được đưa ra nhằm đơn giản hóa cho quá trình tính toán nhưng vẫn đảm bảo phù hợp với mô hình thực tế. Mô hình hình học của máy được đơn giản hóa với các kích thước được lấy từ tài liệu [1]. Bỏ qua các tác động của môi trường như gió, động đất, sóng biển...

Mô hình động học của máy bốc dỡ than được xây dựng theo phương pháp ma trận Denavit-Hartenberg (D-H) [2, 3]. Mô hình máy bốc dỡ than có thể được xem như một cơ cấu 4 bậc tự do TR(RR)R, tức là một khớp tịnh tiến nối liền tiếp với bốn khớp quay. Ở đây khớp quay thứ hai và ba (RR) có liên hệ với nhau do đây là cơ cấu hình bình hành. Các hệ tọa độ (D-H) cũng như các góc khớp được thể hiện ở hình 2 và 3.



Hình 2. Mô hình hình chiếu đứng của CSU



Hình 3. Mô hình hình chiếu bằng của CSU

Bảng 1 Các tham số Denavit-Hartenberg

Khâu	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	0	0	q_1	0
2	d_2	q_2	a_2	90°
3	0	q_3	a_3	0
4	0	$-q_3$	a_4	90°
5	d_5	q_5	a_5	0

Các tham số D-H dạng chữ được cho trong Bảng 1. Trong đó q_1, q_2, q_3, q_5 là các biến khớp, còn $d_2, d_5, a_2, a_3, a_4, a_5$ là các hằng số. Các ma trận D-H địa phương ứng với khâu $i = 1, 2, \dots, 5$ tính theo công thức tổng quát sau.

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong hệ tay máy thật còn có một khâu thứ 6 song song với khâu 3 (cấu trúc cơ cấu bốn khâu bình hành). Khâu này có thể được gắn với một hệ tọa độ luôn song song với hệ tọa độ của khâu 3 và có véc tơ vị trí gốc tọa độ ${}^2\mathbf{r}_6 = [x_{6/2} \quad y_{6/2} \quad 0]^T$. Từ đó ta có:

$${}^2\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & x_{6/2} \\ S_3 & C_3 & 0 & y_{6/2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Các ma trận D-H toàn cục được xác định như sau:

$${}^0\mathbf{A}_i = {}^0\mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\cdots\mathbf{A}_{i-1} = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_i & {}^0\mathbf{r}_i \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}, \quad i = \overline{1,5} \quad (3)$$

Trong đó ${}^0\mathbf{R}_i$ là ma trận cosin chỉ hướng của khâu i và ${}^0\mathbf{r}_i$ là véc tơ vị trí của gốc tọa độ gắn với khâu thứ i trong hệ tọa độ cố định.

Mô hình động lực học của máy bóc dỡ than được xây dựng bằng phương trình Lagrange dạng ma trận.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}^* \quad (4)$$

Trong đó $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_5]^T$, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ là ma trận khối lượng kích thước 4×4 , $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là ma trận Coriolis suy rộng, \mathbf{D} là ma trận cản xác định từ hàm hao tán, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ là véc tơ trọng trường xác định từ thế năng của hệ, \mathbf{Q}^* là véc tơ các lực suy rộng không thế, không hao tán. Các ma trận này được xác định như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{J}_{T_i}^T m_i \mathbf{J}_{T_i} + \mathbf{J}_{R_i}^T \mathbf{I}_i \mathbf{J}_{R_i}) \quad (5)$$

m_i là khối lượng của khâu thứ i , \mathbf{I}_i là ma trận của tenxơ quán tính của vật rắn đối với hệ tọa độ gắn với khối tâm C_i và song song với hệ tọa độ $(Oxyz)_i$, \mathbf{J}_{T_i} , \mathbf{J}_{R_i} lần lượt là ma trận Jacobi tịnh tiến và Jacobi quay được xác định với ${}^0\mathbf{r}_{C_i}$, ${}^i\boldsymbol{\omega}_i$ là véc tơ vị trí của khối tâm và véc tơ vận tốc góc của khâu thứ i trên hệ trục i như sau:

$$\mathbf{J}_{T_i} = \frac{\partial {}^0\mathbf{r}_{C_i}}{\partial \mathbf{q}} \quad \mathbf{J}_{R_i} = \frac{\partial {}^i\boldsymbol{\omega}_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \quad (6)$$

Ma trận $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ được xác định với \mathbf{E} là ma trận đơn vị 4×4 , \otimes là tích Kronecker [2, 3].

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\mathbf{E} \otimes \dot{\mathbf{q}}) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{E}) \right)^T \quad (7)$$

Khi có chuyển động quay của chân đào, lực ma sát giữa phần chân đào tiếp xúc với than xuất hiện làm cản trở chuyển động quay này (Hình 2.). Lực này phân bố đều dọc theo phần tiếp xúc và được giả thiết tương đương với một mô men cản tỷ lệ bậc nhất với tốc độ quay chân gàu xúc $M_c = k_5 \dot{q}_5$.

Ma trận cản \mathbf{D} xác định từ hàm hao tán $\Phi(\dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} b_{11} \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} b_{22} \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} b_{33} \dot{q}_3^2 + \frac{1}{2} (b_{55} + k_5) \dot{q}_5^2$, trong đó b_{ii} ($i = 1, 2, 3, 5$) là hệ số cản tại các khớp, k_5 là hệ số của mô men cản.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}} \quad (8)$$

Véc tơ trọng trường $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ xác định từ thế năng trọng trường $\Pi = g \sum_{i=1}^n m_i {}^0 z_{Ci}$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \quad (9)$$

Trong quá trình hoạt động, phần gàu xúc sẽ liên tục thực hiện chuyển động mức than và chịu một lực cản môi trường \mathbf{F}_c (Hình 3). Giả thiết lực cản này có độ lớn tỷ lệ với bình phương vận tốc mức than và hướng thay đổi theo $O_5 x_5$: $\mathbf{F}_c = k_f v^2 [\cos(q_5 - q_2) \quad \sin(q_5 - q_2) \quad 0]^T$ với k_f là hệ số ma sát và v là vận tốc của thang cuốn. Để đơn giản hóa, có thể xem điểm đặt lực \mathbf{F}_c tại \mathbf{K} . Véc tơ lực suy rộng \mathbf{Q}^* được xác định từ các ngoại lực và mô men tác động lên hệ bao gồm mô men tại các khớp $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_5]^T$, lực cản sinh ra khi có chuyển động xúc than của gàu xúc \mathbf{F}_c .

$$\mathbf{Q}^* = \mathbf{Q}_\tau^* + \mathbf{Q}_F^* \quad (10)$$

$$\mathbf{Q}_\tau^* = \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_5]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{Q}_F^* = \left[\begin{array}{cccc} \frac{\mathbf{F}_c^T \cdot \partial \mathbf{r}_K}{\partial q_1} & \frac{\mathbf{F}_c^T \cdot \partial \mathbf{r}_K}{\partial q_2} & \frac{\mathbf{F}_c^T \cdot \partial \mathbf{r}_K}{\partial q_3} & \frac{\mathbf{F}_c^T \cdot \partial \mathbf{r}_K}{\partial q_5} \end{array} \right]^T \quad (12)$$

3. Thiết kế quỹ đạo điều khiển

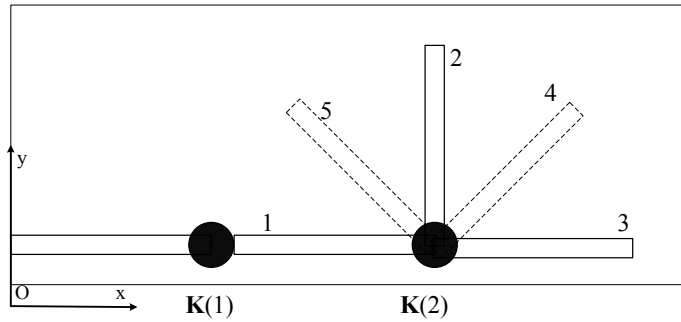
Điểm \mathbf{K} (Hình 2) là điểm cuối của chân đào, cần được điều khiển theo quỹ đạo xác định để có thể quét hết toàn bộ không gian khoang tàu. Vị trí của \mathbf{K} trong hệ tọa độ $O_0 x_0 y_0 z_0$ được xác định từ hệ ${}^0 \mathbf{r}_K \quad 1]^T = {}^0 \mathbf{A}_4 [{}^4 \mathbf{r}_K \quad 1]^T$, trong đó ${}^0 \mathbf{r}_K = [{}^0 x_K \quad {}^0 y_K \quad {}^0 z_K]^T$ và ${}^4 \mathbf{r}_K = [0 \quad 0 \quad d_5]^T$. Ta được:

$${}^0 \mathbf{r}_K = \begin{bmatrix} {}^0 x_K \\ {}^0 y_K \\ {}^0 z_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_2 (a_4 + a_3 \cos q_3 + a_2) + q_1 \\ \sin q_2 (a_4 + a_3 \cos q_3 + a_2) \\ -d_5 + a_3 \sin q_3 + d_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Vị trí điểm \mathbf{K} không phụ thuộc và góc khớp q_5 nên ta chọn $q_5 = 0$, kết hợp với hệ 3 phương trình (13) ta suy ra được tọa độ khớp ứng với vị trí điểm \mathbf{K} như sau.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0x_{\mathbf{K}} - (a_4 + a_3 \cos(q_3) + a_2) \cos(q_2) \\ a \sin\left(\frac{{}^0y_{\mathbf{K}}}{a_4 + a_2 + a_3 \cos(q_3)}\right) \\ a \sin\left(\frac{{}^0z_{\mathbf{K}} + d_3 - d_2}{a_3}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Trong bài báo này, hoạt động mức than của máy dọc theo thành khoang tàu được đơn giản hóa qua hai giai đoạn. Đầu tiên, máy cần điều khiển điểm \mathbf{K} dọc theo thành khoang tàu một bước bằng chiều dài chân đào chữ L từ $\mathbf{K}(1)$ đến $\mathbf{K}(2)$. Sau đó gầu xúc sẽ quay để mức than ở các khu vực lân cận. Để tránh gầu xúc va chạm với thành khoang chứa, quỹ đạo được thiết kế sao cho chân đào chữ L chỉ quay một góc π theo vị trí $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ sau đó quay ngược lại $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 1$. Quá trình này được lặp lại liên tục dọc theo chiều dài khoang tàu. (Hình 4).



Hình 2. Thiết kế chuyển động của Ship Unloader

Trong giai đoạn thứ nhất, vận tốc điểm \mathbf{K} theo phương y và z không đổi nên chọn ${}^0y_{\mathbf{K}} = const$, ${}^0z_{\mathbf{K}} = 0$, vận tốc theo phương x được thiết kế theo dạng hình thang như Hình 5. $L = 4(m)$ là chiều dài chân gầu xúc, cũng là khoảng dịch chuyển của điểm \mathbf{K} . Chọn $T_1 = 20(s)$. Ta tính được gia tốc điểm \mathbf{K} như sau:

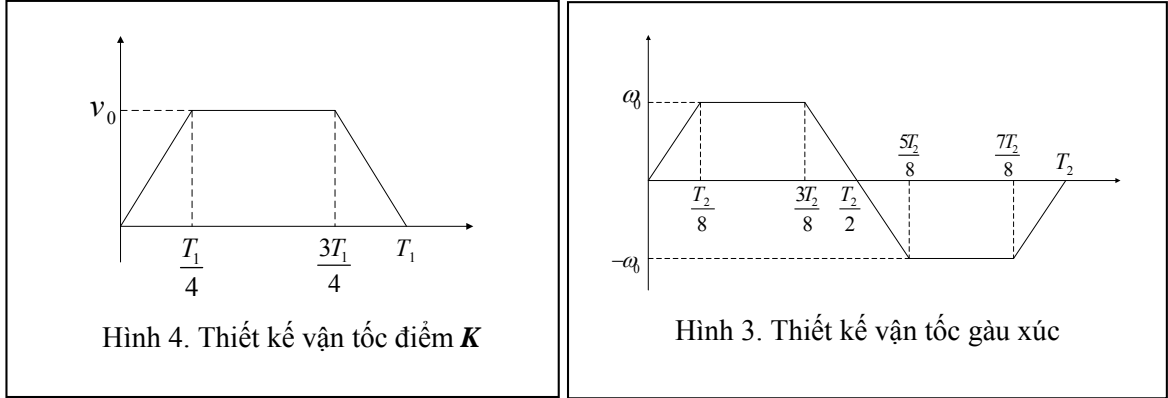
$${}^0\ddot{x}_{\mathbf{K}} = \begin{cases} a_0 & 0 \leq t \leq T_1/4 \\ 0 & T_1/4 < t \leq 3T_1/4 \\ -a_0 & 3T_1/4 < t \leq T_1 \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó:

$$a_0 = \frac{4v_0}{T_1}, \quad v_0 = \frac{4L}{3T_1} \quad (16)$$

Chọn ${}^0y_{\mathbf{K}}$ sao cho $q_2 = \frac{\pi}{2}$, ${}^0z_{\mathbf{K}} = 0$ và ${}^0x_{\mathbf{K}}$ thu được từ ${}^0\ddot{x}_{\mathbf{K}}$ thay vào (14) ta được:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} {}^0x_{\mathbf{K}} & \frac{\pi}{2} & a \sin\left(\frac{d_3 - d_2}{a_3}\right) & 0 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$



Trong giai đoạn thứ hai, vị trí điểm K được giữ nguyên, chuyển động quét của gầu xúc được thiết kế như Hình 6. Trong nửa thời gian đầu, chân đào xoay được góc π (rad), chọn $T_2 = 30(s)$

$$\ddot{q}_s = \begin{cases} \varepsilon_0 & 0 \leq t \leq T_2/8 \\ 0 & T_2/8 < t \leq 3T_2/8 \\ -\varepsilon_0 & 3T_2/8 < t \leq 5T_2/8 \\ 0 & 5T_2/8 < t \leq 7T_2/8 \\ \varepsilon_0 & 7T_2/8 < t \leq T_2 \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó

$$\varepsilon_0 = \frac{8\omega_0}{T_2}, \quad \omega_0 = \frac{8\pi}{3T_2} \quad (19)$$

Kết hợp 2 quá trình trên ta được chuyển động của các gốc khớp trong thời gian khảo sát $T = T_1 + T_2 = 20 + 30 = 50(s)$ như sau:

$$\ddot{x}_K = \begin{cases} a_0 & 0 \leq t \leq T_1/4 \\ 0 & T_1/4 < t \leq 3T_1/4 \\ -a_0 & 3T_1/4 < t \leq T_1 \\ 0 & T_1 < t \leq T_1 + T_2 \end{cases} \quad \ddot{q}_s = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_1 \\ \varepsilon_0 & T_1 < t \leq T_2/8 + T_1 \\ 0 & T_2/8 + T_1 < t \leq 3T_2/8 + T_1 \\ -\varepsilon_0 & 3T_2/8 + T_1 < t \leq 5T_2/8 + T_1 \\ 0 & 5T_2/8 + T_1 < t \leq 7T_2/8 + T_1 \\ \varepsilon_0 & 7T_2/8 + T_1 < t \leq T_2 + T_1 \end{cases} \quad (20)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} {}^0x_K & \frac{\pi}{2} & a \sin\left(\frac{d_5 - d_2}{a_3}\right) & q_s \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

4. Bộ điều khiển MPC

Bộ điều khiển MPC cho hệ thống được xây dựng dựa trên mô hình động lực mô tả hệ thống từ phương trình (22). Đặt $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_5]^T = \boldsymbol{\tau}$ là tính hiệu vào của hệ thống, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T$ là véc

tơ trạng thái của hệ, với $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_5]^T$ và $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3 \ \dot{q}_5]^T$ và thay vào hệ phương trình (23) và rút gọn ta được phương trình trạng thái của hệ thống được viết như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{D}\ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{G} + \mathbf{u}) \end{bmatrix} \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{x} \end{cases} \quad (24)$$

Phương trình trạng thái (24) mô tả mô hình hệ thống khảo sát ở dạng phi tuyến, việc áp dụng bộ điều khiển MPC cho hệ phi tuyến như trên thường khá phức tạp. Do đó mô hình tuyến tính của phương trình trạng thái mô tả hệ sẽ được áp dụng để thiết kế bộ điều khiển MPC. Với $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = \mathbf{0}$. $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^*$; $\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}^*$; $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - h(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*)$ ta được

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}} \\ \tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\tilde{\mathbf{u}} \end{cases} \quad \begin{matrix} \mathbf{A} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*} & \mathbf{B} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right]_{\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*} \\ \mathbf{C} = \left[\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*} & \mathbf{D} = \left[\frac{\partial h}{\partial \mathbf{u}} \right]_{\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*} \end{matrix} \quad (25)$$

Trong bài báo này, bộ điều khiển dự báo mô hình được xây dựng cho hệ tuyến tính rời rạc [5]. Mô hình không gian trạng thái của hệ được chuyển từ dạng liên tục (25) về dạng rời rạc như sau:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (26)$$

Ta đưa vào các véc tơ tổng hợp mô tả trạng thái dự đoán của hệ:

$$\tilde{\mathbf{u}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k|k) \\ \mathbf{u}(k+1|k) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+N-1|k) \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{x}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1|k) \\ \mathbf{x}(k+2|k) \\ \vdots \\ \mathbf{x}(k+N|k+N) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Trong đó N là khoảng dự đoán chung cho cả biến trạng thái \mathbf{x} và biến điều khiển \mathbf{u} , $\mathbf{u}(k+i|k)$, $\mathbf{x}(k+i|k)$ là véc tơ điều khiển và véc tơ trạng thái tại thời điểm $k+i$ được dự đoán ở thời điểm k , $\mathbf{u}(k|k) = \mathbf{u}(k)$, $\mathbf{x}(k|k) = \mathbf{x}(k)$.

Véc tơ điều khiển $\mathbf{u}(k)$ được xác định bằng $\tilde{\mathbf{u}}(k)$ thông qua bài toán tối ưu với hàm mục tiêu:

$$\mathbf{J}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\|\mathbf{x}(k+i|k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\mathbf{u}(k+i|k)\|_{\mathbf{R}}^2 \right) + \|\mathbf{x}(k+N|k)\|_{\mathbf{Q}}^2 \rightarrow \min \quad (28)$$

Trong đó các ma trận trọng số \mathbf{Q} , \mathbf{R} và $\bar{\mathbf{Q}}$ được chọn để xác định dương. Giả thiết điều kiện ràng buộc cận trên và cận dưới của biến điều khiển và biến trạng thái có dạng:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{\max} \\ \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x}(k) \leq \mathbf{x}_{\max} \end{cases} \quad (29)$$

Kết hợp với (26) và (27) đưa về dạng ma trận ta được [5]:

$$\mathbf{J}(k) = \tilde{\mathbf{u}}^T(k) \mathbf{H} \tilde{\mathbf{u}}(k) + 2\mathbf{x}(k) \mathbf{F}^T \tilde{\mathbf{u}}(k) + \mathbf{x}^T(k) \mathbf{G} \mathbf{x}(k) \rightarrow \min \quad (30)$$

Các ma trận \mathbf{H} , \mathbf{F} , và \mathbf{G} là các ma trận được tính như sau:

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} + \tilde{\mathbf{R}}; \mathbf{F} = \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{\Gamma}; \mathbf{G} = \mathbf{\Gamma}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{\Gamma} + \mathbf{Q} \quad (31)$$

Trong đó

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^2 \\ \dots \\ \mathbf{A}^N \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \mathbf{Q} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \bar{\mathbf{Q}} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix}, \quad (32)$$

Điều kiện hạn chế của biến điều khiển và biến trạng thái (33) khi biểu diễn theo biến $\hat{\mathbf{u}}(k)$ sẽ có dạng tổng quát sau:

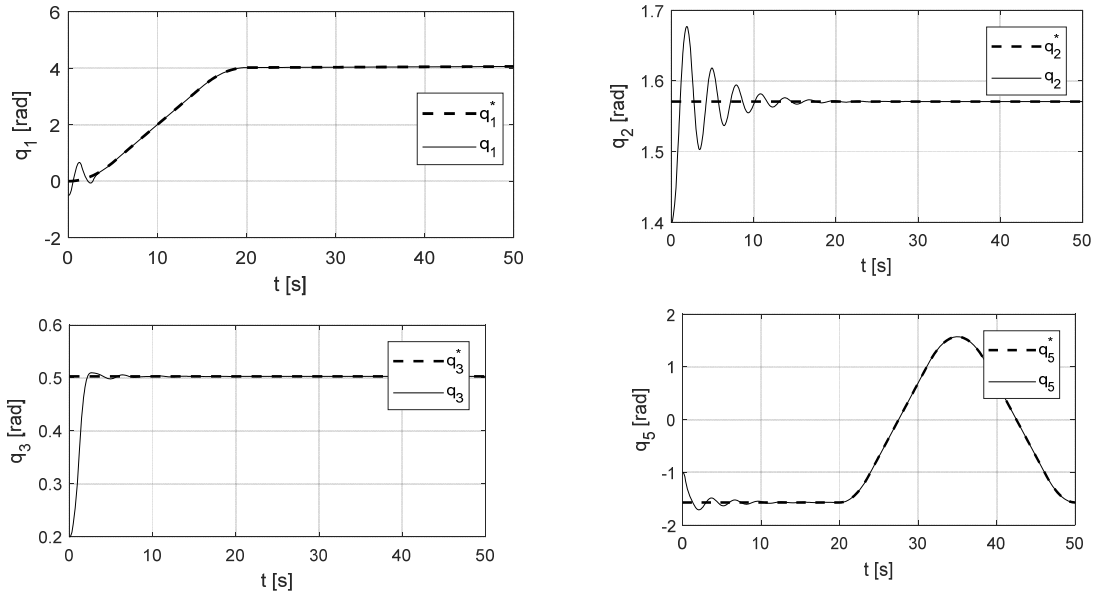
$$\mathbf{A}_c \hat{\mathbf{u}}(k) \leq \mathbf{b}_0 + \mathbf{B}_x \mathbf{x}(k) \quad (34)$$

Trong đó \mathbf{A}_c , \mathbf{b}_0 và \mathbf{B}_x là các ma trận hằng số. Tìm nghiệm $\hat{\mathbf{u}}^*(k)$ bằng cách giải bài toán tối ưu (35), kết hợp với điều kiện (36) liên tục cho khung cửa sổ di động (N bước) và sử dụng tín hiệu tối ưu $\mathbf{u}^*(k|k)$ tại từng thời điểm khảo sát để điều khiển hệ (37).

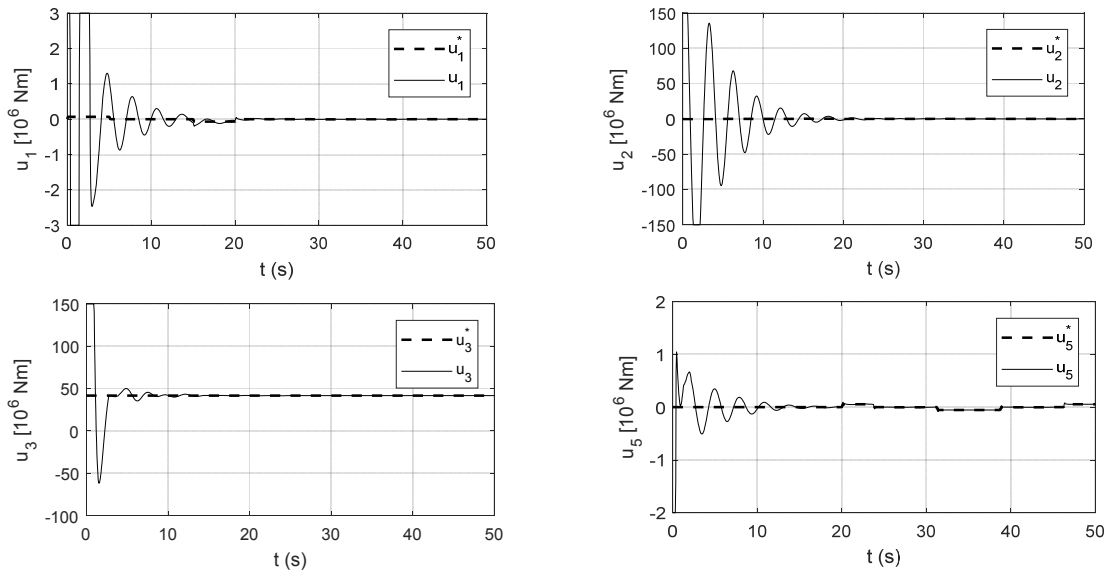
5. Mô phỏng số

Các tham số động học và động lực học được lấy từ tài liệu [1]. Áp dụng bộ điều khiển MPC lần lượt cho hệ tuyến tính tại các điểm cân bằng $(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*)$ với $\mathbf{x}^* = [\mathbf{q} \quad \dot{\mathbf{q}}]^T$ thu được từ phần thiết kế quỹ đạo (20) và (21). với ràng buộc $\mathbf{u}_{\min} = 10^6 [-5 \quad -300 \quad -300 \quad -3]^T$ và $\mathbf{u}_{\max} = 10^6 [5 \quad 300 \quad 300 \quad 3]^T$. Khoảng cửa sổ $N = 4$. Ma trận trọng số $\mathbf{Q} = \text{diag}([100, 20000, 15000, 100, 10, 100, 5, 5])$ và $\mathbf{R} = \text{diag}([0.05, 0.005, 0.005, 0.05])$.

Kết quả mô phỏng đáp ứng yêu cầu đề ra, được thể hiện chi tiết trên hình 7 và hình 8.



Hình 5. Đáp ứng của các tọa độ khớp



Hình 6. Đáp ứng của các tín hiệu điều khiển

6. Kết luận

Bài báo đã xây dựng được mô hình động lực học của máy bốc dỡ than có kể đến lực cản từ môi trường làm việc (nguyên liệu than) bằng phương pháp Lagrange II dạng ma trận. Quỹ đạo di chuyển của tổ máy lấy than cũng được tính toán thiết kế để hoạt động hiệu quả trong không gian bị hạn chế của khoang tàu. Bộ điều khiển dự đoán mô hình (MPC) được áp dụng với ràng buộc về các mô men, và lực động cơ tại các khớp. Kết quả mô phỏng số thể hiện đáp ứng của hệ phù hợp với quỹ đạo thiết kế theo luật điều khiển MPC.

Lời cảm ơn

Bài báo này thuộc khuôn khổ chuyên đề “Tính toán, thiết kế động lực học ship unloader” trong đề tài NCKH: 01/HĐ-ĐT/KHCN, do Viện nghiên cứu Cơ khí Narime chủ trì với tên đề tài “Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo, tổ hợp và đưa vào vận hành hệ thống bốc dỡ, vận chuyển than cho nhà máy nhiệt điện đốt than có công suất tổ máy đến khoảng 600MW”. Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Viện Nghiên cứu Cơ khí đã hỗ trợ tích cực trong việc thực hiện công trình nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Đỗ Đăng Khoa, *Chuyên đề tính toán, thiết kế động lực học Ship-unloader*, NCKH: 01/HĐ-ĐT/KHCN, Viện nghiên cứu Cơ khí Narime, (2016).
- [2] Nguyễn Văn Khang, *Động lực học hệ nhiều vật*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, (2007).
- [3] Nguyễn Văn Khang, Chu Anh Mỹ, *Cơ sở robot công nghiệp*, NXB Giáo dục, (2011).
- [4] Đỗ Sanh, *Động lực học máy*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, (2004).
- [5] J. M. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, (2000).