PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CẦN TRỤC THỦY LỰC CÓ CẦN ÓNG LÒNG GẬP THÂN KHI VẬN HÀNH NÂNG TẢI

Lê Văn Dưỡng^{1,*}, Nguyễn Minh Kha¹

¹Viện Cơ khí động lực, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Bài báo trình bày mô hình động lực học (ĐLH) của cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân lấp trên xe vận tải khi vận hành nâng tải. Bài báo phát triển mô hình ĐLH của cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân có tính đến độ nhớt đàn hồi của xi lanh nâng cần, xi lanh quay tay cần và xi lanh co duỗi tay cần. Mô hình được thiết lập cho hoạt động phức tạp của cần trục khi nâng tải, trong đó các xi lanh thủy lực nâng cần, quay tay cần và co duỗi tay cần hoạt động đồng thời. Phương trình Lagrange loại II được sử dụng để xây dựng hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của cơ hệ. Trên cơ sở đó, bài báo tiến hành phân tích các thông số ĐLH của cần trục khi vận hành nâng tải. Kết quả của bài báo là cơ sở cho bài toán điều khiển cần trục thủy lực ống lồng gập thân để nâng cao hiệu suất, độ tin cậy trong quá trình vận hành.

Từ khóa: Mô hình cần trục; động lực học cần trục; cần trục ống lồng gập thân.

1. Đặt vấn đề

Cần trục có cần ống lồng gập thân (knuckle boom crane) bao gồm cần và tay cần được liên kết với nhau bởi khớp bản lề, tay cần gồm 2 hoặc nhiều ống lồng có thể kéo dài và thu lại để thay đổi tầm với làm việc. Cấu tạo đặc biệt của cần trục có cần ống lồng gập thân giúp khả năng làm việc của nó linh hoạt hơn trong việc tiếp cận tải trọng cũng như tăng độ an toàn và ổn định khi làm việc. Cần trục có cần ống lồng gập thân thường được dẫn động bằng hệ thống thủy lực và có thể tích hợp nhiều cơ cấu làm việc khác nhau như móc treo, cơ cấu kẹp gắp, tời nâng... tùy theo yêu cầu công việc. Hình 1 là cấu tạo của cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân lắp trên xe vận tải.

Cần trục nói chung và cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân nói riêng là thiết bị bốc xếp-vận chuyển được sử dụng phổ biến trong các lĩnh vực cần có thiết bị nhỏ gọn để vận chuyển các vật nặng, điển hình là trong vận tải ô tô, đường sắt hoặc đường biển... Xây dựng mô hình và nghiên cứu động lực của cần trục là cần thiết và có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế cũng như vận hành cần trục. Một mô hình động lực học (ĐLH) đầy đủ và các tham số mô hình chính xác là những điều kiện tiên quyết và cần thiết để có một thiết kế phù hợp cũng như dự đoán được độ bền mỏi và độ tin cậy khi xem xét các

^{*} Email: van-duong.le@lqdtu.edu.vn

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v19.n01.725

kết cấu chịu tải động của cần trục. Đồng thời, nó cũng làm cơ sở cho bài toán điều khiển cần trục nhằm nâng cao năng suất, độ tin cậy trong quá trình khai thác.

Nghiên cứu ĐLH của cần trục nói chung cũng như cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân nói riêng là một vấn đề phức tạp và đã có nhiều công bố khoa học về vấn đề này. Trong [1-4], các tác giả đã nghiên cứu ĐLH của cần trục ống lồng lắp trên xe vận tải, tuy nhiên mô hình cần trục nghiên cứu là cần trục dạng ống lồng không phải dạng gập thân. Nhiều công trình nghiên cứu ĐLH của cần trục có cần ống lồng gập thân nhưng mô hình hoặc không xét đến thao tác co duỗi đốt ống lồng khi làm việc, hoặc không xét đến thao tác co duỗi đốt ống lồng khi làm việc, hoặc không xét đến thao tác co duỗi đốt ống lồng khi làm việc, hoặc không xét đến ảnh hưởng độ biến dạng đàn hồi của xi lanh thủy lực... [5-8]. Như vậy, hầu hết các nghiên cứu chưa xét đến sự kết hợp đồng thời các thao tác vận hành khi cần trục làm việc. Tuy nhiên, theo hướng dẫn của nhà sản xuất, có thể vận hành đồng thời các cơ cấu của cần trục khi di chuyển tải với tốc độ làm việc nhỏ và tải trọng nâng không vượt quá 50% tải trọng nâng định mức. Ngoài ra, cần trục có cần ống lồng gập thân thường được sử dụng để chuyển tải với vị trí đòi hỏi được định vị chính xác và không gian hạn chế, vì vậy việc kết hợp đồng thời các thao tác khi vận hành là cần thiết.

Trong bài báo này, các tác giả tiến hành xây dựng mô hình ĐLH quá trình nâng tải của cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân khi kết hợp đồng thời các thao tác nâng hạ cần, quay tay cần và co duỗi ống lồng tay cần. Từ mô hình ĐLH xây dựng được, bài báo tiến hành khảo sát và phân tích các thông số ĐLH của cần trục khi làm việc.



Hình 1. Cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân lắp trên xe vận tải 1 - thân trụ; 2 - cần; 3 - tay cần cơ sở; 4 - tay cần ống lồng; 5 - xi lanh nâng hạ cần; 6 - xi lanh quay tay cần; 7 - xi lanh co duỗi ống lồng; 8 - cụm móc treo; 9 - chân tựa; 10 - xe cơ sở.

2. Mô hình động lực học cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân

Mô tả mô hình: Bài báo xem xét hoạt động phức tạp của một cần trục thủy lực có cần ống lồng gập thân với móc treo vật tại đầu cần (cần trục không có tời nâng) lắp trên xe vận tải được mô tả trên hình 2. Để nâng và chuyển tải, ba cơ cấu hoạt động đồng thời

bao gồm nâng cần, quay tay cần và co duỗi tay cần, tương ứng được điều khiển bởi xi lanh thủy lực nâng ha cần, xi lanh thủy lực quay tay cần và xi lanh thủy lực co duỗi tay cần. Dầu thủy lực trong xi lanh nâng ha cần, xi lanh quay tay cần, xi lanh co duỗi tay cần được đặc trưng bởi độ cứng kc, ktc, kol và giảm chấn nhớt bc, btc, bol tương ứng. Cần, tay cần cơ sở và tay cần ống lồng được coi là cứng tuyệt đối và được đặc trưng bởi các thông số vật lý: Cần có chiều dài $l_c = 2l_{O1G}$, khối lượng m_c đặt tại trọng tâm G và mô men quán tính J_c ; Tay cần cơ sở có chiều dài $l_{tc} = 2l_{O2D}$, khối lượng m_{tc} đặt tại trọng tâm D và mô men quán tính J_{tc} ; Tay cần ống lồng có chiều dài $l_{ol} = 2l_{O3E}$, khối lượng m_{ol} đặt tại trọng tâm E và mô men quán tính J_{ol} . Vật nâng được coi là chất điểm có khối lượng m_{vn} đặt tại trọng tâm P của nó và được treo vào dây cáp không biến dạng có chiều dài l_p . Cơ hệ có bốn bâc tư do tương ứng với bốn tọa độ tổng quát: Góc quay cần φ quanh khớp O₁, góc quay tay cần ψ quanh khớp O₂, chuyển động tương đối của tay cần ống lồng so với tay cần cơ sở được đặc trưng bởi khoảng cách q giữa các tâm D và E, góc lắc θ của vật nâng. H_0 là chiều cao khớp chân cần O₁ tính từ nền máy đứng. Các thông số kết cấu của cần truc: $\gamma = \angle O_0 O_1 A$, $\lambda = \angle BO_1 G$, $\varepsilon = \angle CO_2 G$, $\eta = \angle FO_2 D$, $a = O_1 A$, $b = O_1 B$, $c = O_2 C$, $d = O_2 F$. Giå thiết quá trình vận hành xe cơ sở đứng trên nền không biến dạng và được hỗ trợ bởi các chân tựa thủy lực. Vì vậy, ảnh hưởng của lốp cao su đàn hồi là không đáng kể. Quá trình khảo sát vật nâng đã được nâng lên khỏi mặt đất. Bỏ qua ảnh hưởng của tải trọng gió.



Hình 2. Mô hình động lực học cần trục gập thân lắp trên xe vận tải.

Chọn hệ trục tọa độ cố định $O_0X_0Y_0$: Trục O_0X_0 nằm trên mặt nền máy đứng, O_0Y_0 đi qua khóp quay chân cần O_1 .

Tọa độ suy rộng của cơ hệ: $q = [q_i]^T = [\varphi \ \psi \ q \ \theta]^T$.

Áp dụng phương trình Lagrange loại II để viết hệ phương trình vi phân mô tả ĐLH của cơ hệ:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \qquad (i = 1 \div 4)$$
(1)

trong đó: T, Π và Φ lần lượt là động năng, thế năng và hàm hao tán của cơ hệ; Q_i - lực suy rộng ứng với tọa độ suy rộng q_i ($i = 1 \div 4$).

Động năng của cơ hệ bao gồm động năng của cần (T_c) , động năng của tay cần (T_{cs}) , động năng đốt ống lồng (T_{ol}) và động năng vật nâng (T_{vn}) .

$$T = T_c + T_{tc} + T_{ol} + T_{vn} \tag{2}$$

Động năng của cần:

$$T_{c} = \frac{1}{2} J_{c(O_{1})} \dot{\phi}^{2} = \frac{1}{2} \left[J_{c} + m_{c} \left(\frac{l_{c}}{2} \right)^{2} \right] \dot{\phi}^{2}$$
(3)

Động năng của tay cần cơ sở:

$$T_{tc} = \frac{1}{2} J_{tc} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{tc} v_{D}^{2} = \frac{1}{2} J_{tc} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{cs} \left(\dot{x}_{D}^{2} + \dot{y}_{D}^{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2} J_{tc} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{cs} \left(l_{c}^{2} \dot{\phi}^{2} + \frac{l_{tc}^{2}}{4} \dot{\psi}^{2} + l_{tc} l_{c} \dot{\phi} \dot{\psi} \cos\left(\phi - \psi\right) \right)$$
(4)

$$\begin{cases} x_D = l_c \cos \varphi + \frac{l_{tc}}{2} \cos \psi \\ y_D = h_0 + l_c \sin \varphi + \frac{l_{tc}}{2} \sin \psi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_D = -l_c \dot{\varphi} \sin \varphi - \frac{l_{tc}}{2} \dot{\psi} \sin \psi \\ \dot{y}_D = l_c \dot{\varphi} \cos \varphi + \frac{l_{tc}}{2} \dot{\psi} \cos \psi \end{cases}$$
(5)

trong đó, (x_D, y_D) - tọa độ trọng tâm tay cần.

Động năng của đốt ống lồng:

$$T_{ol} = \frac{1}{2} J_{ol} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{ol} v_{E}^{2} = \frac{1}{2} J_{ol} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{ol} \left(\dot{x}_{E}^{2} + \dot{y}_{E}^{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2} J_{0l} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{ol} \left\{ l_{c}^{2} \dot{\phi}^{2} + \left(\frac{l_{tc}}{2} + q \right)^{2} \dot{\psi}^{2} + \dot{q}^{2} + l_{c} \left[\frac{2 \dot{q} \sin(\psi - \phi)}{+ (l_{tc} + 2q) \dot{\psi} \cos(\phi - \psi)} \right] \dot{\phi} \right\}$$

$$\begin{cases} x_{E} = l_{c} \cos\phi + \left(\frac{l_{tc}}{2} + q \right) \cos\psi \\ y_{E} = l_{c} \sin\phi + \left(\frac{l_{tc}}{2} + q \right) \sin\psi \end{cases} \qquad \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{E} = -l_{c} \dot{\phi} \sin\phi + \dot{q} \cos\psi - \left(\frac{l_{tc}}{2} + q \right) \dot{\psi} \sin\psi \\ \dot{y}_{E} = l_{c} \dot{\phi} \cos\phi + \dot{q} \sin\psi + \left(\frac{l_{tc}}{2} + q \right) \dot{\psi} \cos\psi \end{cases}$$

$$\end{cases}$$

$$(7)$$

trong đó, (x_E , y_E) - tọa độ trọng tâm đốt ống lồng. 20 Động năng của vật nâng:

$$T_{vn} = \frac{1}{2} m_{vn} v_p^2 = \frac{1}{2} m_{vn} \left(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 \right)$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left[l_c^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{q}^2 + (l_t + q)^2 \dot{\psi}^2 + l_p^2 \dot{\theta}^2 - 2l_c \dot{q} \dot{\varphi} \sin(\varphi - \psi) - 2l_c l_p \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin(\varphi - \theta) \right]^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left[l_c^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{q}^2 + (l_t + q)^2 \dot{\psi}^2 + l_p^2 \dot{\theta}^2 - 2l_c \dot{q} \dot{\varphi} \sin(\varphi - \psi) - 2l_c l_p \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin(\varphi - \theta) \right]^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left[l_c^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{q}^2 + (l_t + q)^2 \dot{\psi}^2 + l_p^2 \dot{\theta}^2 - 2l_c \dot{q} \dot{\varphi} \sin(\varphi - \psi) - 2l_c l_p \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin(\varphi - \theta) \right]^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left[l_c^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{q}^2 + (l_t + q)^2 \dot{\psi}^2 + l_p^2 \dot{\theta}^2 - 2l_c \dot{q} \dot{\varphi} \sin(\varphi - \psi) - 2l_c l_p \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin(\varphi - \theta) \right]^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left\{ l_c^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{q}^2 + (l_t + q) \dot{\varphi} \dot{\psi} \cos(\varphi - \psi) + 2l_p \dot{q} \dot{\theta} \cos(\psi - \theta) - (l_t + q) l_p \dot{\psi} \dot{\theta} \sin(\psi - \theta) \right\}^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left\{ l_t + q l_t + q l_p \cos(\varphi - \psi) + 2l_p \dot{q} \dot{\theta} \cos(\psi - \theta) - (l_t + q) l_p \dot{\psi} \dot{\theta} \sin(\psi - \theta) \right\}^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left\{ l_t + q l_t + q l_p \cos(\varphi - \psi) + 2l_p \dot{q} \dot{\theta} \cos(\psi - \theta) - (l_t + q) l_p \dot{\psi} \dot{\theta} \sin(\psi - \theta) \right\}^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left\{ l_t + q l_t + q l_p \dot{\psi} \cos(\psi - \theta) + l_p \dot{\theta} \cos(\theta + \eta \sin(\psi - \theta)) \right\}^{(8)}$$

$$= \frac{1}{2} m_{vn} \left\{ l_t + q l_t + q l_t \dot{\theta} \sin(\psi - \theta) + l_p \dot{\theta} \sin(\psi - \theta) \right\}^{(8)}$$

trong đó, (x_P, y_P) - tọa độ trọng tâm vật nâng.

Thế các phương trình (3), (4), (6), (8) vào phương trình (2) nhận được:

$$T = \frac{1}{2} \left[J_{c} + m_{c} \left(\frac{l_{c}}{2} \right)^{2} \right] \dot{\phi}^{2} + \frac{1}{2} J_{tc} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{cs} \left(l_{c}^{2} \dot{\phi}^{2} + \frac{l_{tc}^{2}}{4} \dot{\psi}^{2} + l_{tc} l_{c} \dot{\phi} \dot{\psi} \cos\left(\varphi - \psi\right) \right) \right] \\ + \frac{1}{2} J_{0l} \dot{\psi}^{2} + \frac{1}{2} m_{ol} \left\{ l_{c}^{2} \dot{\phi}^{2} + \left(\frac{l_{tc}}{2} + q \right)^{2} \dot{\psi}^{2} + \dot{q}^{2} + l_{c} \left[\frac{2\dot{q}\sin\left(\psi - \varphi\right)}{+\left(l_{tc} + 2q\right)\dot{\psi}\cos\left(\varphi - \psi\right)} \right] \dot{\phi} \right\}$$
(10)
$$+ \frac{1}{2} m_{vn} \left[l_{c}^{2} \dot{\phi}^{2} + \dot{q}^{2} + \left(l_{t} + q\right)^{2} \dot{\psi}^{2} + l_{p}^{2} \dot{\theta}^{2} - 2l_{c} \dot{q} \dot{\phi} \sin\left(\varphi - \psi\right) - 2l_{c} l_{p} \dot{\phi} \dot{\theta} \sin\left(\varphi - \theta\right) \right] \\ + 2l_{c} \left(l_{t} + q\right) \dot{\phi} \dot{\psi} \cos\left(\varphi - \psi\right) + 2l_{p} \dot{q} \dot{\theta} \cos\left(\psi - \theta\right) - \left(l_{t} + q\right) l_{p} \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\left(\psi - \theta\right) \right]$$

Thế năng cơ hệ bao gồm thế năng trọng trường của cần (Π_c), đốt cơ sở tay cần (Π_{tc}), đốt ống lồng tay cần (Π_{ol}) và vật nâng (Π_{vn}); thế năng đàn hồi của xi lanh thủy lực nâng cần (Π_{xlc}), xi lanh thủy lực tay cần (Π_{xlcs}) và xi lanh thủy lực ống lồng (Π_{xlol}):

$$\Pi = \Pi_{c} + \Pi_{tc} + \Pi_{ol} + \Pi_{xlc} + \Pi_{xlol}$$

= $m_{c}gy_{c} + m_{tc}gy_{D} + m_{ol}gy_{E} + m_{vn}gy_{P} + \frac{1}{2}k_{c}\Delta_{c}^{2} + \frac{1}{2}k_{tc}\Delta_{tc}^{2} + \frac{1}{2}k_{ol}\Delta_{ol}^{2}$ (11)

trong đó, Δ_c , Δ_{cs} , Δ_{ol} - độ biến dạng của dầu thủy lực trong xi lanh nâng cần, xi lanh tay cần, xi lanh ống lồng tương ứng và được xác định từ các ΔAO_1B và ΔCO_2F .

$$\Delta_{c} = l_{AB}(\varphi) - l_{AB}(\varphi_{0}) = \sqrt{a^{2} + b^{2} + 2ab\sin\delta} - \sqrt{a^{2} + b^{2} + 2ab\sin\delta_{0}}$$

$$\Delta_{tc} = l_{CF}(\varphi, \psi) - l_{CF}(\varphi_{0}, \psi_{0}) = \sqrt{c^{2} + d^{2} + 2cd\cos\mu} - \sqrt{c^{2} + d^{2} + 2cd\cos\mu_{0}}$$
(12)

$$\Delta_{ol} = q - q_{0}$$

với $\delta = \varphi - \gamma - \lambda$, $\delta_0 = \varphi_0 - \gamma - \lambda$, $\mu = \psi - \varphi - \varepsilon - \eta$, $\mu_0 = \psi_0 - \varphi_0 - \varepsilon - \eta$; φ_0 và ψ_0 là góc nâng cần và góc nâng tay cần tại thời điểm ban đầu.

Thế các phương trình (5), (7), (9) và (12) vào phương trình (11) nhận được:

$$\Pi = m_{c}g\left(\frac{l_{c}}{2}\sin\varphi + h_{0}\right) + m_{tc}g\left(l_{c}\sin\varphi + \frac{l_{tc}}{2}\sin\psi + h_{0}\right) + m_{ol}g\left[l_{c}\sin\varphi + \left(\frac{l_{tc}}{2} + q\right)\sin\psi + h_{0}\right] + m_{vn}g\left[l_{c}\sin\varphi + (l_{t} + q)\sin\psi - l_{p}\cos\theta + h_{0}\right] \quad (13)$$

$$+ \frac{1}{2}k_{c}\left(\frac{\sqrt{a^{2} + b^{2} + 2ab\sin\delta}}{-\sqrt{a^{2} + b^{2} + 2ab\sin\delta}}\right)^{2} + \frac{1}{2}k_{tc}\left(\frac{\sqrt{c^{2} + d^{2} + 2cd\cos\mu}}{-\sqrt{c^{2} + d^{2} + 2cd\cos\mu}}\right)^{2} + \frac{1}{2}k_{ol}\left(q - q_{0}\right)^{2}$$

Hàm hao tán cơ hệ bao gồm hàm hao tán của các xi lanh thủy lực:

$$\Phi = \frac{1}{2} b_c \dot{\Delta}_c^2 + \frac{1}{2} b_{tc} \dot{\Delta}_{tc}^2 + \frac{1}{2} b_{ol} \dot{\Delta}_{ol}^2$$

$$= \frac{1}{2} b_c \frac{a^2 b^2 \dot{\phi}^2 \cos^2 \delta}{a^2 + b^2 + 2ab \sin \delta} + \frac{1}{2} b_{cs} \frac{c^2 d^2 \left(\dot{\psi} - \dot{\phi}\right)^2 \sin^2 \mu}{c^2 + d^2 + 2cd \cos \mu} + \frac{1}{2} b_{ol} \dot{q}^2$$
(14)

Lực suy rộng của cơ hệ ứng với các tọa độ suy rộng $q = [q_i]^T = [\varphi \ \psi \ q \ \theta]^T$:

$$Q = [Q_i]^T = [M_c \ M_{tc} \ F_{ol} \ 0]^T = [F_c h_1 \ F_{tc} h_2 \ F_{ol} \ 0]^T$$
(15)

trong đó: F_c , F_{tc} , F_{ol} - các lực của xi lanh nâng cần, xi lanh tay cần và xi lanh ống lồng tương ứng; h_1 , h_2 - cánh tay đòn của các lực F_c , F_{tc} tương ứng.

Theo [2], lực xi lanh được xác định theo công thức tổng quát:

$$F_{xl} = F_{xl_{-}t} + \left(F_{xl_{-}max} - F_{xl_{-}t}\right) \left(1 - \frac{t^2}{t_s}\right)$$
(16)

Đối với xi lanh nâng cần: $F_{c_t} = 1,5(m_c + m_{tc} + m_{ol} + m_{vn}); F_{c_{max}} = 1,4F_{c_t};$

Đối với xi lanh quay tay cần: $F_{tc_t} = 1,5(m_{tc} + m_{ol} + m_{vn}); F_{tc_{max}} = 1,4F_{tc_t};$

Đối với xi lanh ống lồng: $F_{ol_t} = 1,5(m_{ol} + m_{vn}); F_{ol_max} = 1,4F_{ol_t}$

trong đó: t, t_s - thời gian vận hành và thời gian khởi động; F_{xl_t} - lực xi lanh tĩnh, F_{xl_max} - lực lớn nhất của xi lanh khi khởi động; h_1 , h_2 - cánh tay đòn của các xi lanh.

$$h_{1} = a \sin(\varepsilon_{1}); h_{2} = c \sin(\varepsilon_{2});$$

$$\varepsilon_{1} = \arccos\left(\frac{a^{2} + l_{AB}^{2}(\varphi) - b^{2}}{2al_{AB}(\varphi)}\right); \varepsilon_{2} = \arccos\left(\frac{c^{2} + l_{CF}^{2}(\varphi, \psi) - d^{2}}{2cl_{CF}(\varphi, \psi)}\right)$$
(17)

Thế các biểu thức động năng (10), thế năng (13), hàm hao tán (14) và lực suy rộng (15) vào phương trình (1) nhận được phương trình mô tả ĐLH của cơ hệ:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}$$
(18)

trong đó: $\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \lceil m_{ij} \rceil$ - ma trận khối lượng; $\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) = \lceil c_{ij} \rceil$ - ma trận quán tính ly tâm Coriolis; $\mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [d_i]$ - ma trận cản; $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = [g_i]$ - vecto lực có thế. Đặt $m_{tc} + m_{ol} = 2m_t$; $m_{ol} + m_{vn} = m_p$; $m = m_pq + m_tl_{tc} + m_{vn}l_t$, ta có: $m_{11} = J_1 + l_c^2 \left(\frac{m_c}{4} + m_{tc} + m_{ol} + m_{vn} \right); m_{12} = m_{21} = m l_c \cos(\varphi - \psi); m_{13} = m_{31} = -l_c m_p \sin(\varphi - \psi);$ $m_{14} = m_{41} = -m_{vn}l_c l_p \sin(\varphi - \theta); \ m_{22} = J_{tc} + J_{ol} + \frac{1}{4}m_{tc}l_{tc}^2 + m_{ol}\left(\frac{l_{tc}^2}{4} + ql_{tc} + q^2\right); \ m_{23} = m_{32} = 0;$ $m_{24} = m_{42} = -m_{vn}l_p\sin(\psi - \theta)(l_t + q); m_{33} = m_p; m_{34} = m_{43} = m_{vn}l_p\cos(\psi - \theta); m_{44} = m_{vn}l_p^2;$ $c_{11} = \frac{ml_c \sin(\varphi - \psi)\dot{\psi}}{2} + \frac{m_{vn}l_c l_p \cos(\varphi - \theta)\theta}{2} + \frac{m_p l_c \cos(\varphi - \psi)\dot{q}}{2};$ $c_{12} = l_c \left\{ m \sin\left(\varphi - \psi\right) \left[-\frac{\dot{\varphi}}{2} + \dot{\psi} \right] + m_p \cos\left(\varphi - \psi\right) \dot{q} \right\}; c_{13} = m_p l_c \cos\left(\varphi - \psi\right) \left[-\frac{\dot{\varphi}}{2} + \dot{\psi} \right];$ $c_{14} = m_{vn}l_c l_p \cos(\varphi - \theta) \left[-\frac{\dot{\varphi}}{2} + \dot{\theta} \right]; c_{21} = m l_c \sin(\varphi - \psi) \left[-\dot{\varphi} + \frac{\dot{\psi}}{2} \right] + \frac{m_p l_c \cos(\varphi - \psi) \dot{q}}{2};$ $c_{22} = -\frac{ml_c \sin\left(\varphi - \psi\right)\dot{\varphi}}{2} + \frac{m_{vn}l_p \left(l_t + q\right)\cos\left(\psi - \theta\right)\dot{\theta}}{2} + m_{ol} \left(l_{tc} + 2q\right)\dot{q};$ $c_{23} = \frac{-m_p l_c \cos(\varphi - \psi)\dot{\varphi}}{2} + \frac{m_{vn} l_p \sin(\psi - \theta)\dot{\theta}}{2};$ $c_{24} = m_{vn}l_p \left[\left(l_t + q \right) \cos\left(\psi - \theta\right) \left(-\frac{\dot{\psi}}{2} + \dot{\theta} \right) - \frac{\sin\left(\psi - \theta\right)\dot{q}}{2} \right]; c_{31} = m_p l_c \cos\left(\varphi - \psi\right) \left[-\dot{\varphi} + \frac{\dot{\psi}}{2} \right];$ $c_{32} = \frac{-m_{p}l_{c}\cos(\varphi - \psi)\dot{\varphi}}{2} - \frac{m_{ol}(l_{tc} + 2q)\dot{\psi}}{2} + \frac{m_{vn}l_{p}\sin(\psi - \theta)\theta}{2}; c_{33} = 0;$ $c_{34} = m_{vn}l_p\sin\left(\psi - \theta\right) \left[-\frac{\dot{\psi}}{2} + \dot{\theta} \right]; c_{41} = m_{vn}l_cl_p\cos\left(\varphi - \theta\right) \left| -\dot{\varphi} + \frac{\theta}{2} \right|;$ $c_{42} = m_{vn}l_p \left| \left(l_t + q \right) \cos\left(\psi - \theta\right) \left(-\dot{\psi} + \frac{\dot{\theta}}{2} \right) - \sin\left(\psi - \theta\right) \dot{q} \right|; c_{43} = m_{vn}l_p \sin\left(\psi - \theta\right) \left| -\dot{\psi} + \frac{\dot{\theta}}{2} \right|;$ $c_{44} = \frac{m_{vn}l_{\rho}}{2} \Big[-l_c \cos(\varphi - \theta)\dot{\varphi} - (l_t + q)\cos(\psi - \theta)\dot{\psi} - \sin(\psi - \theta)\dot{q} \Big];$ $d_{1} = b_{c} \frac{a^{2}b^{2}\cos^{2}\delta\dot{\phi}}{l_{cr}^{2}(\omega)} + b_{tc} \frac{c^{2}d^{2}\sin^{2}\mu(\dot{\phi}-\dot{\psi})}{l_{cr}^{2}(\omega,\psi)}; d_{2} = -b_{tc} \frac{c^{2}d^{2}\sin^{2}\mu(\dot{\phi}-\dot{\psi})}{l_{cr}^{2}(\omega,\psi)}; d_{3} = b_{ol}\dot{q}; d_{4} = 0;$

23

$$g_{1} = -\frac{k_{c}ab\Delta_{c}\cos\delta}{l_{AB}(\varphi)} + 2k_{tc}cd\sin\mu + \left(\frac{m_{c}}{2} + m_{tc} + m_{ol} + m_{vn}\right)l_{c}g\cos\varphi;$$

$$g_{2} = mg\cos\psi - k_{tc}\frac{\left[l_{CF}(\varphi,\psi) - l_{CF}(\varphi_{0},\psi_{0})\right]cd\sin\mu}{l_{CF}(\varphi,\psi)}; g_{3} = k_{ol}\left(q - q_{0}\right) + m_{p}g\sin\psi; g_{4} = m_{vn}gl_{p}\sin\theta.$$

3. Kết quả và thảo luận

Bộ thông số đầu vào: $m_c = 195$ (kg); $m_{tc} = 155$ (kg); $m_{ol} = 115$ (kg); $m_{vn} = 1000$ (kg); $l_c = 3,5$ (m); $l_{tc} = 3,3$ (m); $l_{ol} = 3,1$ (m); $J_c = 189,665$ (kg.m²); $J_{tc} = 169,683$ (kg.m²); $J_{ol} = 114,899$ (kg.m²); a = 1,65 (m); b = 0,5 (m); c = 1,2 (m); d = 0,6 (m); $h_0 = 4,2$ (m); $\gamma = 9,1^\circ$; $\lambda = 20,4^\circ$; $\varepsilon = 16,1^\circ$; $\eta = 14,5^\circ$; g = 9,81 (m/s²); $t_s = 5$ (s); Theo [2] ta có: $k_c = 220000$ (N/m); $b_c = 500$ (Ns/m); $k_{tc} = 25000$ (N/m); $b_{tc} = 200$ (Ns/m); $k_{ol} = 25000$ (N/m); $b_{ol} = 200$ (Ns/m).

Với điều kiện đầu $[\varphi_0 \ \psi_0 \ q_0 \ \theta_0] = [\pi/10 \ \pi/12 \ 1 \ 0]$, giải hệ phương trình (18) bằng phần mềm Matlab ta thu được các kết quả chuyển vị, vận tốc và gia tốc của các khâu khi kết hợp đồng thời ba thao tác vận hành cần trục (nâng cần, quay tay cần và co duỗi tay cần) lần lượt thể hiện trên hình 3, 4 và 5.



Hình 3. Sự thay đổi của góc nâng cần (a), góc quay tay cần cơ sở (b), dịch chuyển tay cần ống lồng (c) và góc lắc vật nâng (d).



Hình 4. Vận tốc góc nâng cần (a), vận tốc góc quay tay cần cơ sở (b), vận tốc dịch chuyển tay cần ống lồng (c) và vận tốc góc lắc vật nâng (d).



Hình 5. Gia tốc góc nâng cần (a), gia tốc góc quay tay cần cơ sở (b), gia tốc dịch chuyển tay cần ống lồng (c) và gia tốc góc lắc vật nâng (d).

Nhận xét: Trong khoảng 5 s đầu tiên (giai đoạn khởi động), các giá trị góc nâng cần, góc quay tay cần và dịch chuyển duỗi ống lồng tăng chậm và có sự dao động do gia tốc khởi động và độ đàn hồi của dầu thủy lực trong xi lanh. Sau 5 s đầu (giai đoạn bình ổn),

các giá trị này tăng gần như tuyến tính và có sự dao động rất nhỏ. Sau 30 s, cần nâng được 1 góc 55°, tay cần quay 1 góc 45° và tay cần ống lồng dịch chuyển duỗi ra 2,1 m. Góc lắc vật nâng cũng dao động quanh vị trí tức thời của nó trong thời gian khởi động và sau đó dao động đều so với phương thẳng đứng với biên độ 10°.

Tương ứng là vận tốc và gia tốc góc nâng cần, góc quay tay cần, dịch chuyển tay cần ống lồng và góc lắc vật nâng sẽ dao động với biên độ lớn trong giai đoạn khởi động, sau đó dao động ổn định với biên độ nhỏ trong giai đoạn bình ổn do tính nhớt (giảm chấn) của dầu thủy lực. Giá trị trung bình của vận tốc góc trung bình là: 3,1 độ/s (vận tốc góc nâng cần), 3,4 độ/s (vận tốc góc quay tay cần), 0,08 m/s (vận tốc duỗi tay cần ống lồng).

Như vậy, tại thời điểm 5 s đầu tiên (giai đoạn khởi động), cơ hệ chuyển từ trạng thái tĩnh sang trạng thái động, do đó các giá trị vận tốc, gia tốc chưa ổn định; sau đó, dưới tác dụng nhớt của dầu thủy lực, cơ hệ bắt đầu dao động ổn định. Điều này là hoàn toàn phù hợp với quy luật làm việc thực tế của thiết bị.

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng mô hình ĐLH và hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của cần trục có cần ống lồng gập thân trong quá trình nâng vật khi kết hợp đồng thời các thao tác nâng cần, quay tay cần và duỗi tay cần ống lồng. Trên cơ sở đó, bài báo tiến hành khảo sát các thông số ĐLH đặc trưng cho quá trình vận hành các khâu của cần trục khi vận hành kết hợp các thao tác. Mô hình ĐLH được xây dựng có thể làm cơ sở cho việc nghiên cứu đưa ra một quy luật điều khiển hợp lý khi vận hành cần trục ống lồng gập thân để giảm thiểu rung động của cần trục.

Tài liệu tham khảo

- J. B. Qian, L. P. Bao, R. B. Yuan, X. J. Yang, "Modeling and analysis of outrigger reaction forces of hydraulic mobile crane", *International Journal of Engineering*, Vol. 30(8), pp. 1246-1252, 2017. DOI: 10.5829/ije.2017.30.08b.18
- [2] Le Van Duong, Le Anh Tuan, "Modeling and observer-based robust controllers for telescopic truck cranes", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 173, July 2022, 104869. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104869
- [3] G. Kalairassan, M. Boopathi, Rijo Mathew Mohan, "Analysis of load monitoring system in hydraulic mobile cranes", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 263, 2017, 062045. DOI: 10.1088/1757-899X/263/6/062045
- [4] R. Mijailović, "Modelling the dynamic behaviour of the truck-crane", *Transport*, Vol. 26(4), pp. 410-417, 2011. DOI: 10.3846/16484142.2011.642946

- [5] B. Grigorov, R. Mitrev, "Dynamic behavior of a hydraulic crane operating a freely suspended payload", J. Zhejiang Univ. Sci. A, Vol. 18, pp. 268-281, 2017. DOI: 10.1631/jzus.A1600292
- [6] H. C. Pedersen, T. O. Andersen, B. K. Nielsen, "Comparison of Methods for Modeling a Hydraulic Loader Crane with Flexible Translational Links", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 137(10), DS-14-1456, 2015. DOI: 10.1115/1.4030801
- [7] G. O. Tysse, A. Cibicik, O. Egeland, "Vision-based Control of a Knuckle Boom Crane with Online Cable Length Estimation", *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, Vol. 26(1), pp. 416-426, February 2021. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3024637
- [8] I. A. Martina, R. A. Iran, "Dynamic Modeling and Self-Tuning Anti-sway Control of a Seven Degree of Freedom Shipboard Knuckle Boom Crane", *Mech. Sys. Signal. Process.*, Vol. 153(15), 2021, 107441. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107441

DYNAMIC ANALYSIS OF THE HYDRAULIC KNUCKLE BOOM CRANE WHEN LIFTING LOADS OPERATIONS

Abstract: This article presents the dynamic model of a truck-mounted hydraulic knuckle boom crane when lifting loads operations. The article develops a dynamic model of a hydraulic knuckle boom crane considering the viscoelasticity of the boom-luff cylinder, knuckle cylinder, and extension cylinder. Modeling is constituted for the complex operation of the crane when lifting loads, in which the boom-luff cylinder, knuckle cylinder, and extension cylinder are simultaneously activated. The Lagrange equation of type II is used to build a system of differential equations describing the motion of the mechanical system. On that basis, the article analyzes the dynamic parameters of the crane when lifting loads operations. The results of the article are the basis for the hydraulic knuckle boom crane control problem to improve the performance and reliability of the crane during operation.

Keywords: Crane modeling; crane dynamics; knuckle boom crane.

Nhận bài: 15/11/2023; Hoàn thiện sau phản biện: 22/02/2024; Chấp nhận đăng: 05/04/2024