

ĐỘNG LỰC HỌC CẦN TRỤC NỔI TRONG QUÁ TRÌNH NÂNG HẠ TẢI TRỌNG

DYNAMICS OF A FLOATING CRANE CONSIDERING PAYLOAD HOISTING MOTION

HOÀNG MẠNH CƯỜNG

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: cuonghm@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo này tính toán dao động của hệ gồm một cần trục đặt trên một vật thể nổi (được gọi là cần trục nổi) trong quá trình vận hành. Ban đầu một mô hình dao động của hệ đã được xây dựng, dựa trên mô hình này, các phương trình vi phân mô tả chuyển động của hệ đã được thiết lập dựa trên phương trình Lagrange loại II. Việc tính toán dao động của hệ sẽ được thực hiện bằng phương pháp tính toán số.

Từ khóa: Động lực học, dao động, cần trục nổi, phương trình Lagrange.

Abstract

This paper calculates the oscillation of a system consisting of a crane put on a pontoon (is the so called a floating crane) taking system operation into account. The author introduces a dynamic model of a floating crane in which the differential equations describing the system were formulated based on Lagrange's equation. Numerical method applied for calculating system oscillation.

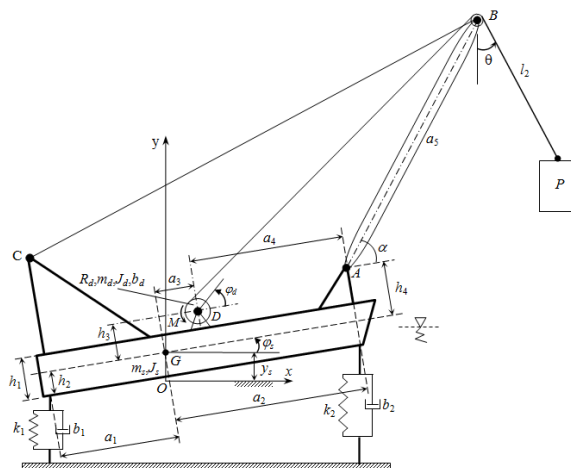
Keywords: Dynamics, oscillation, floating cranes, Lagrange.

1. Mở đầu

Cần trục nổi là một thiết bị gồm một cần trục đặt trên một vật thể nổi, nhằm mục đích thi công lắp đặt các công trình trên sông, biển hoặc vớt các vật dưới nước. Trên Hình 1 là hình ảnh của một cần trục nổi. Khi vận hành, do tính đàn hồi của nước làm ảnh hưởng không tốt đến quá trình thi công lắp đặt. Do đó, một phương pháp điều khiển hợp lý để giảm sự dao động của vật thể, trong và sau khi nâng hạ là rất cần thiết. Muốn vậy, việc nghiên cứu động lực học hệ cần trục phải được nghiên cứu trước tiên.



Hình 1. Hình ảnh của cần trục nổi



Hình 2. Mô hình dao động của cần trục nổi

Đã có nhiều công trình nghiên cứu đề cập đến vấn đề này [2, 5, 6, 7, 8], tuy nhiên hầu hết trong đó đều nghiên cứu về động lực học và điều khiển các cần trục giàn, một số công trình có đề cập đến các cần trục nổi [1, 3, 4], tuy nhiên ở đó cũng chưa đưa ra được mô hình dao động hợp lý.

Bài báo này tập trung xây dựng mô hình và tính toán dao động cần trục nổi. Việc tính toán sẽ được thực hiện bằng các phương pháp số, các kết quả tính toán sẽ được mô tả bằng các đồ thị.

2. Thiết lập phương trình vi phân dao động của cần trục nổi

Mô hình dao động của cần trục nổi được cho như trên Hình 2. Trong đó, Vật thể nổi được xem như vật rắn chuyển động song phẳng có khối lượng m_s , mô men quán tính đối với khối tâm G

của nó là J_s , đặt trên hai gối đỡ đàn hồi với các độ cứng k_1, k_2 và độ cản b_1, b_2 . Hệ thống tời được xem như một tang trống với khối lượng m_d , bán kính R_d , mô men quán tính đối với trục quay là J_d và chịu lực cản với hệ số cản b_d . Vật nặng được xem như một chất điểm có khối lượng m_p được treo vào đầu một dây, đầu còn lại của dây được quấn vào tời sau khi vắt qua ròng rọc B. Các kích thước được cho như trên hình vẽ.

Bỏ qua sự dịch chuyển theo phương ngang của tàu, ta thấy cơ hệ có 4 bậc tự do, ta chọn hệ tọa độ suy rộng đủ là: $q_1 = \varphi_d, q_2 = \theta, q_3 = y_s, q_4 = \varphi_s$, trong đó, φ_d là góc quay của tời, θ là góc lắc của dây cáp tời so với phương thẳng đứng, y_s là dịch chuyển theo phương thẳng đứng của trọng tâm tàu so với vị trí cân bằng tĩnh, φ_s là góc lắc của tàu so với phương nằm ngang, khi đó động năng, thế năng, hàm hao tán được xác định như sau:

Động năng của hệ:

$$T = \frac{1}{2} m_s \dot{q}_3^2 + \frac{1}{2} J_s \dot{q}_4^2 + \frac{1}{2} m_d (\dot{x}_D^2 + \dot{y}_D^2) + \frac{1}{2} J_d (\dot{q}_4 + \dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_P^2 + \dot{y}_P^2) \quad (1)$$

trong đó:

$$\begin{cases} x_D = a_3 \cos(\varphi_s) - h_3 \sin(\varphi_s) \\ y_D = y_s + a_3 \sin(\varphi_s) + h_3 \cos(\varphi_s) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_P = a_4 \cos(\varphi_s) - h_4 \sin(\varphi_s) + a_5 \cos(\varphi_s + \alpha) + l_2 \sin(\theta) \\ y_P = a_4 \sin(\varphi_s) + h_4 \cos(\varphi_s) + a_5 \sin(\varphi_s + \alpha) - l_2 \cos(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

Thế năng của cơ hệ:

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_s - \Delta y_s - a_1 \varphi_s)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_s - \Delta y_s + a_2 \varphi_s)^2 + m_s g y_s + m_d g y_D + m_p g y_P \quad (4)$$

Hàm hao tán:

$$\Phi = \frac{1}{2} b_1 (\dot{y}_s - a_1 \dot{\varphi}_s)^2 + \frac{1}{2} b_2 (\dot{y}_s + a_2 \dot{\varphi}_s)^2 + \frac{1}{2} b_d \dot{\varphi}_d^2 \quad (5)$$

Các lực suy rộng của các lực hoạt động không thế:

$$Q_1 = M_d(t), Q_2 = 0, Q_3 = 0; Q_4 = 0 \quad (6)$$

Thay các biểu thức động năng, thế năng, hàm hao tán vào phương trình Lagrange loại II:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q_i; \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

ta được hệ 4 phương trình vi phân mô tả dao động của cần trục container đặt trên tàu có dạng:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{U}(t) \quad (8)$$

Trong đó:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} M_d(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

với:

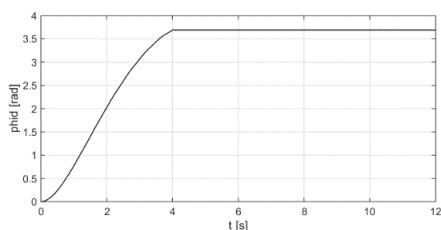
$$\begin{aligned} m_{11} &= J_d + m_p R_d^2, \quad m_{12} = m_{21} = 0, \quad m_{13} = m_{31} = m_p R_d \cos q_2, \quad m_{22} = m_p (l_{20} - R_d q_1)^2, \\ m_{14} &= m_{41} = J_d + m_p R_d a_2 \cos(q_2 - q_4) + m_p R_d h_4 \sin(q_2 - q_4) + m_p R_d a_5 \cos(\alpha - q_2 + q_4), \\ m_{23} &= m_{32} = m_p (l_{20} - R_d q_1) \sin q_2, \quad m_{33} = m_p + m_d + m_s, \\ m_{24} &= m_{42} = m_p (l_{20} - R_d q_1) [a_5 \sin(q_2 + q_4 + \alpha) + h_4 \cos(q_2 + q_4) + a_2 \sin(q_2 + q_4)], \\ m_{34} &= m_{43} = m_d [(a_3 \cos q_4 - h_3 \sin q_4) + (a_5 \cos(q_4 + \alpha) + a_2 \cos q_4 - h_4 \sin q_4)], \\ m_{44} &= J_s + J_d + m_d (h_3^2 + a_3^2) + m_p (a_2^2 + a_5^2 + h_4^2) + 2m_p a_5 (a_2 \cos \alpha + h_4 \sin \alpha), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_1 &= b_d \dot{q}_1 - J_d (\dot{q}_4 + \dot{q}_1) - R_d \dot{q}_1 m_p - R_d \dot{q}_3 m_p \cos q_2 - R_d a_5 \dot{q}_4 m_p \cos(\alpha - q_2 - q_4) \\
&\quad + R_d a_2 \dot{q}_4^2 m_p \sin(q_2 - q_4) - R_d a_5 \dot{q}_4^2 m_p \sin(\alpha - q_2 + q_4) - R_d \dot{q}_2 \dot{q}_3 m_p \sin q_2 \\
&\quad - R_d \dot{q}_4 h_4 m_p \sin(q_2 - q_4) + R_d \dot{q}_2 \dot{q}_4 h_4 m_p \cos(q_2 - q_4) - R_d a_2 \dot{q}_2 \dot{q}_4 m_p \sin(q_2 - q_4) \\
&\quad + R_d a_5 \dot{q}_2 \dot{q}_4 m_p \sin(\alpha - q_2 + q_4) - R_d \dot{q}_4^2 h_4 m_p \cos(q_2 - q_4) - R_d a_2 \dot{q}_4 m_p \cos(q_2 - q_4) \\
c_2 &= -m_p (\dot{q}_2 l_{20}^2 + \dot{q}_3 l_{20} \sin q_2 + R_d \dot{q}_2 q_1^2 - a_5 \dot{q}_4 l_{20} \sin(\alpha - q_2 + q_4) + \dot{q}_4^2 h_4 l_{20} \sin(q_2 - q_4) - 2R_d \dot{q}_1 \dot{q}_2 q_1 \\
&\quad + a_5 \dot{q}_4^2 l_{20} \cos(\alpha - q_2 + q_4) + R_d \dot{q}_1 \dot{q}_3 \sin q_2 - \dot{q}_2 \dot{q}_3 l_{20} \cos q_2 - R_d \dot{q}_3 q_1 \sin q_2 - \dot{q}_4 h_4 l_{20} \cos(q_2 - q_4) \\
&\quad + a_2 \dot{q}_4 l_{20} \sin(q_2 - q_4) + 2R_d \dot{q}_1 \dot{q}_2 l_{20} - 2R_d \dot{q}_2 l_{20} q_1 + a_2 \dot{q}_4^2 l_{20} \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_2 \dot{q}_4 h_4 l_{20} \sin(q_2 - q_4) \\
&\quad - R_d a_2 \dot{q}_4^2 q_1 \cos(q_2 - q_4) - R_d a_5 \dot{q}_1 \dot{q}_4 \sin(\alpha - q_2 + q_4) - a_5 \dot{q}_2 \dot{q}_4 l_{20} \cos(\alpha - q_2 + q_4) \\
&\quad + R_d a_5 \dot{q}_4 q_1 \sin(\alpha - q_2 + q_4) - R_d \dot{q}_4^2 h_4 q_1 \sin(q_2 - q_4) - R_d a_5 \dot{q}_4^2 q_1 \cos(\alpha - q_2 + q_4) \\
&\quad + R_d \dot{q}_2 \dot{q}_3 q_1 \cos q_2 - R_d \dot{q}_1 \dot{q}_4 h_4 \cos(q_2 - q_4) + R_d a_2 \dot{q}_1 \dot{q}_4 \sin(q_2 - q_4) + R_d \dot{q}_4 h_4 q_1 \cos(q_2 - q_4) \\
&\quad - a_2 \dot{q}_2 \dot{q}_4 l_{20} \cos(q_2 - q_4) - R_d a_2 \dot{q}_4 q_1 \sin(q_2 - q_4) + R_d a_2 \dot{q}_2 \dot{q}_4 q_1 \cos(q_2 - q_4) \\
&\quad + R_d \dot{q}_2 \dot{q}_4 h_4 q_1 \sin(q_2 - q_4) + R_d a_5 \dot{q}_2 \dot{q}_4 q_1 \cos(\alpha - q_2 + q_4)) \\
c_3 &= (b_1 + b_2) \dot{q}_3 - (m_p + m_d + m_s) \dot{q}_3 - a_1 b_1 \dot{q}_4 + a_2 b_2 \dot{q}_4 - a_5 \dot{q}_4 m_p \cos(\alpha + q_4) - R_d \dot{q}_1 m_p \cos q_2 \\
&\quad - a_2 \dot{q}_4 m_p \cos q_4 - a_3 \dot{q}_4 m_d \cos q_4 + \dot{q}_4 h_4 m_p \sin q_4 + \dot{q}_4 h_3 m_d \sin q_4 - \dot{q}_2 l_{20} m_p \sin q_2 \\
&\quad - a_5 \dot{q}_4^2 m_p \sin(\alpha + q_4) - \dot{q}_4^2 h_4 m_p \cos q_4 - \dot{q}_4^2 h_3 m_d \cos q_4 + \dot{q}_2^2 l_{20} m_p \cos q_2 - a_2 \dot{q}_4^2 m_p \sin q_4 \\
&\quad - a_3 \dot{q}_4^2 m_d \sin q_4 - R_d \dot{q}_2^2 m_p q_1 \cos q_2 - 2R_d \dot{q}_1 \dot{q}_2 m_p \sin q_2 + R_d \dot{q}_2 m_p q_1 \sin q_2 \\
c_4 &= (a_2 b_2 - a_1 b_1) \dot{q}_3 - (J_d + J_s) \dot{q}_4 - J_d \dot{q}_1 + a_1^2 b_1 \dot{q}_4 + a_2^2 b_2 \dot{q}_4 - a_2^2 \dot{q}_4 m_p - a_5^2 \dot{q}_4 m_p - a_3^2 \dot{q}_4 m_d - \dot{q}_4 h_4^2 m_p \\
&\quad - \dot{q}_4 h_3^2 m_d - a_5 \dot{q}_3 m_p \cos(\alpha + q_4) - a_2 \dot{q}_3 m_p \cos q_4 - a_3 \dot{q}_3 m_d \cos q_4 + \dot{q}_3 h_4 m_p \sin q_4 + \dot{q}_3 h_3 m_d \sin q_4 \\
&\quad + \dot{q}_2 h_4 l_{20} m_p \cos(q_2 - q_4) - a_2 \dot{q}_2 l_{20} m_p \sin(q_2 - q_4) - R_d a_5 \dot{q}_1 m_p \cos(\alpha - q_2 + q_4) - a_3 \dot{q}_3 \dot{q}_4 m_d \sin q_4 \\
&\quad + a_2 \dot{q}_2^2 l_{20} m_p \cos(q_2 - q_4) + a_5 \dot{q}_2^2 l_{20} m_p \sin(\alpha - q_2 + q_4) + \dot{q}_2^2 h_4 l_{20} m_p \sin(q_2 - q_4) - 2a_5 \dot{q}_4 h_4 m_p \sin \alpha \\
&\quad - a_5 \dot{q}_3 \dot{q}_4 m_p \sin(\alpha + q_4) - 2a_2 a_5 \dot{q}_4 m_p \cos \alpha + a_5 \dot{q}_2^2 l_{20} m_p \cos(\alpha - q_2 + q_4) - \dot{q}_3 \dot{q}_4 h_4 m_p \cos q_4 \\
&\quad - R_d a_2 \dot{q}_1 m_p \cos(q_2 - q_4) - R_d \dot{q}_1 h_4 m_p \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_3 \dot{q}_4 h_3 m_d \cos q_4 - a_2 \dot{q}_3 \dot{q}_4 m_p \sin q_4 \\
&\quad - R_d a_5 \dot{q}_2^2 m_p q_1 \cos(\alpha - q_2 + q_4) + 2R_d \dot{q}_1 \dot{q}_2 h_4 m_p \cos(q_2 - q_4) - R_d \dot{q}_1 \dot{q}_4 h_4 m_p \cos(q_2 - q_2) \\
&\quad - 2R_d a_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 m_p \sin(q_2 - q_4) + R_d a_2 \dot{q}_1 \dot{q}_4 m_p \sin(q_2 - q_4) - R_d \dot{q}_2 h_4 m_p q_1 \cos(q_2 - q_4) \\
&\quad - a_2 \dot{q}_2 \dot{q}_4 l_{20} m_p \cos(q_2 - q_4) + R_d a_2 \dot{q}_2 m_p a_1 \sin(q_2 - q_4) - R_d a_5 \dot{q}_1 \dot{q}_4 m_p \sin(\alpha - q_2 + q_4) \\
&\quad - \dot{q}_2 \dot{q}_4 h_4 l_{20} m_p \sin(q_2 - q_4) - R_d a_2 \dot{q}_2^2 m_p q_1 \cos(q_2 - q_4) + 2R_d a_5 \dot{q}_1 \dot{q}_2 m_p \sin(\alpha - q_2 + q_4) \\
&\quad - a_5 \dot{q}_2 \dot{q}_4 l_{20} m_p \cos(\alpha - q_2 - q_4) - a_5 \dot{q}_2 m_p q_1 \sin(\alpha - q_2 + q_4) - R_d \dot{q}_2^2 h_4 m_p q_1 \sin(q_2 - q_4) \\
&\quad + R_d a_5 \dot{q}_2 \dot{q}_4 m_p q_1 \cos(\alpha - q_2 + q_4) + R_d a_2 \dot{q}_2 \dot{q}_4 m_p q_1 \cos(q_2 - q_4) + R_d \dot{q}_2 \dot{q}_4 h_4 m_p q_1 \sin(q_2 - q_4) \\
g_1 &= m_p g R_d \cos q_2, \quad g_2 = m_p g (l_{20} - R_d q_1) \sin q_2, \quad g_3 = k_1 (q_3 - a_1 q_4) + k_2 (q_3 + a_2 q_4) \\
g_4 &= m_p g (a_5 \cos(q_4 + \alpha) + a_2 \cos q_4 - h_4 \sin q_4) + m_d g (a_3 \cos q_4 - h_3 \sin q_4) \\
&\quad - a_1 k_1 (q_3 - \Delta_{ys} - a_1 q_4) + a_2 k_2 (q_3 - \Delta_{ys} + a_2 q_4)
\end{aligned}$$

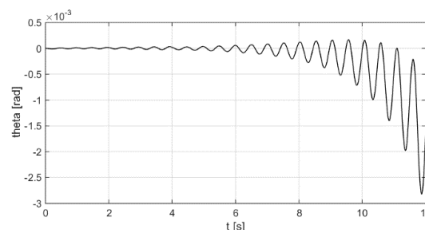
3. Các kết quả mô phỏng

Để tính toán số, giá trị các tham số của hệ được cho như sau: $g = 9,81$ (m/s²); $a_1 = 53$ (m); $a_2 = 57$ (m); $a_3 = 2$ (m); $a_5 = 130$ (m); $h_1 = 7,5$ (m); $h_2 = 3$ (m); $h_3 = 4$ (m); $h_4 = 18$ (m); $R_d = 0,15$ (m); $\alpha = \pi/3$; $l_{20} = 80$ (m); $m_s = 18149.10^3$ (kg); $m_d = 100.10^3$ (kg); $m_p = 300.10^3$ (kg); $J_s = 1,83.10^{10}$ (kg.m²); $J_d = 11250$ (kg.m²); $k_1 = k_2 = 57.10^7$ (N/m); $b_1 = b_2 = 200$ (Ns/m), thời gian khởi động khi nâng vật là $t_{kd} = 4$ (s).

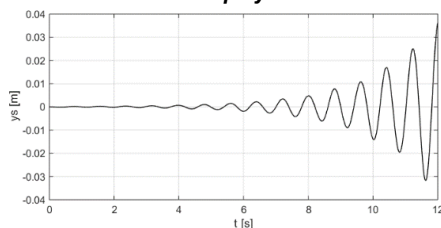
Với các số liệu cho như trên sau khi tính toán, ta được một số kết quả mô phỏng cho trên các hình 3, 4, 5, 6. Từ các kết quả tính toán ta thấy, khi kết thúc quá trình vận chuyển, tời đã dừng, nhưng do quá trình dừng tời không hợp lý, dẫn đến tải trọng mất ổn định và bắt đầu dao động, điều này làm ảnh hưởng đến tàu và cũng làm cho tàu vừa lắc vừa dao động lên xuống, điều này tác động ngược trở lại tải trọng, dẫn đến dao động lắc của dây cáp tời và các dao động của tàu càng ngày càng tăng lên.



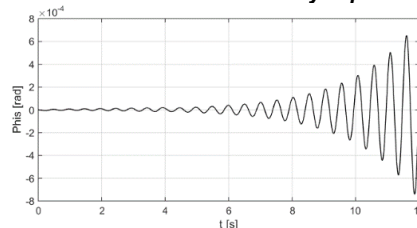
Hình 3. Góc quay của tời



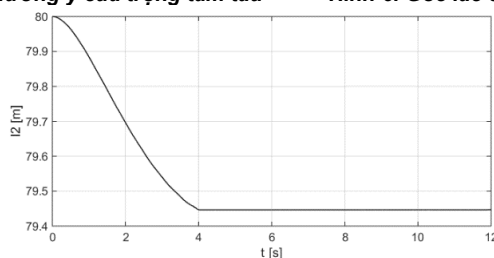
Hình 4. Góc lắc của dây cáp tời



Hình 5. Dịch chuyển theo phương y của trọng tâm tàu



Hình 6. Góc lắc của tàu so với phương ngang



Hình 7. Sự thay đổi của dây cáp tời

4. Kết luận

Trong bài báo này, đã tập trung tính toán dao động của cần trục nổi trong quá trình làm việc. Từ các kết quả tính toán, ta thấy, khi việc dừng tải trọng một cách đột ngột khi vật đến vị trí mong muốn sẽ làm cho toàn bộ hệ thống mất ổn định, điều này có thể dẫn đến hệ thống bị hư hỏng và nguy hiểm đến người vận hành. Do đó việc thiết kế một quy luật điều khiển hợp lý để hệ không mất ổn định trong quá trình vận hành là việc hết sức cần thiết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ju-Hwan Cha, Myung-Il Roh, Kyu-Yeul Lee, "Dynamic Response Simulation of a Heavy Cargo Suspended by a floating crane Based on Multibody System Dynamics", Ocean Engineering 37, pp. 1273-1291, 2010.
- [2] Keum-Shik Hong, Quang Hieu Ngo, "Dynamics of the container crane on a mobile harbor", Ocean Engineering 53, pp.16-24, 2012.
- [3] K. Ellermann, E. Kreuzer, and M. Markiewicz, "Nonlinear Dynamics of Floating Cranes," Nonlinear Dynamics, vol. 27, pp. 107-183, 2002.
- [4] K. Ellermann and E. Kreuzer, "Nonlinear Dynamics in the Motion of Floating Cranes," Multibody System Dynamics, Vol. 9, pp. 377-387, 2003.
- [5] Z. N. Masoud, A. H. Nayfeh and D. T. Mook, "Cargo Pendulation Reduction of Ship-Mounted Cranes," Nonlinear Dynamics, Vol. 35, pp. 299-311, 2004.
- [6] Y. Al-Sweiti and D. Söffker, "Modelling and control of an elastic ship-mounted crane using variable-gain model-based controller," Multi-body Dynamics, Vol. 220, pp. 239-255, 2006.
- [7] Y. Al-Sweiti and D. Söffker, "Cargo pendulation suppression of ship cranes with elastic booms," Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Vol. 13, no. 6, pp. 503-529, 2007.
- [8] Y. Al-Sweiti and D. Söffker, "Modeling and Control of an Elastic Ship-mounted Crane Using Variable Gain Model-based Controller," Journal of Vibration and Control, Vol. 13, no. 5, pp. 657-685, 2007.

Ngày nhận bài: 26/03/2019
 Ngày nhận bản sửa: 02/04/2019
 Ngày duyệt đăng: 03/04/2019