

# ĐỘNG LỰC HỌC CẦN TRỤC CONTAINER ĐẶT TRÊN TÀU CÓ KỀ ĐẾN TÍNH ĐÀN HỒI CỦA CÁP

## DYNAMICS OF A SHIP-MOUNTED CONTAINER CRANE WITH THE FLEXIBILITY OF CABLE

ThS. PHẠM VĂN TRIỆU, TS. HOÀNG MẠNH CƯỜNG  
TS. LÊ ANH TUẤN

Viện Nghiên cứu phát triển, Trường ĐHHH Việt Nam

### Tóm tắt

Bài báo này nghiên cứu động lực học của một cần trục container đặt trên tàu (gọi là cảng lưu động) trong quá trình vận chuyển, có kể đến sự đàn hồi của cáp tời. Các phương trình của chuyển động được thiết lập bằng việc sử dụng phương trình Lagrange loại II. Việc tính toán dao động của hệ vừa được thiết lập được thực hiện nhờ phương pháp Newmark. Các kết quả mô phỏng biểu thị sự dịch chuyển của xe tời, sự dao động của tàu mang cần trục và đặc biệt là sự lắc của cáp tời sau khi kết thúc việc vận chuyển.

### Abstract

This paper studies the dynamics of a ship – mounted container crane (called a Mobile harbor) with the flexibility of cable. The equations of motions are constituted by using the Lagrange Equation II. The vibration calculation of the system is conducted by using Newmark method. The simulation results show the behavior of trolley motion, ship roll and heave, container swing and axial container oscillation.

**Key words:** Dynamics, Container cranes, Mobile harbor.

### 1. Giới thiệu chung

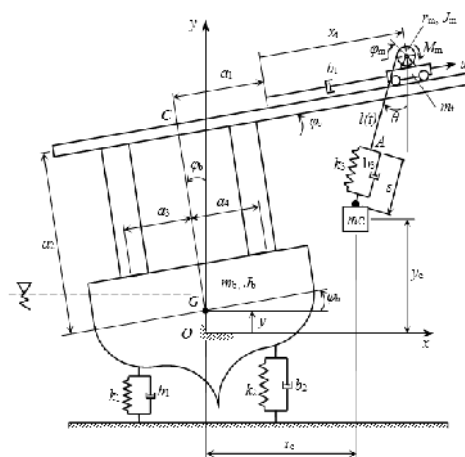
Các cần trục container được sử dụng phổ biến để chuyển các container và các vật thể khác từ vị trí này đến các vị trí khác trên cảng. Trong những năm gần đây, các tàu container ngày càng lớn hơn, các tàu container loại trên 12000 TEU đang trở nên phổ biến. Dự đoán đến năm 2020 các tàu siêu lớn loại 18000 TEU sẽ được đưa vào sử dụng. Để theo kịp sự phát triển kích thước các con tàu, các cần trục container cần phải lớn hơn, vận chuyển nhanh hơn và chính xác hơn. Nhưng một vấn đề vẫn còn tồn tại đối với những cảng container nhỏ là người ta không thể điều chỉnh độ sâu của nước phù hợp với các tàu container loại lớn. Để giải quyết vấn đề này, một tàu trang bị cần trục đặc biệt (“Cảng lưu động”) có khả năng hoạt động trên biển (hình 1).



Hình 1. Hoạt động của cảng lưu động

Trong khi làm việc, do tính đàn hồi của nước và đặc biệt là tính đàn hồi của cáp treo làm ảnh hưởng không tốt đến quá trình khai thác. Một phương pháp điều khiển hợp lý để ngăn chặn sự dao động của container khi đang vận chuyển là cần thiết. Muốn vậy, động lực học hệ cần trục phải được nghiên cứu trước khi thiết kế một hệ điều khiển.

Các công trình nghiên cứu động lực học cần trục trên tàu, hầu hết đều tập trung vào cần trục kiểu cột [6-12]. Trong khi đó, số lượng các công trình nghiên cứu về cần trục container đặt trên tàu là không nhiều. Gần đây, có một số công trình như [4,13] phác thảo hướng nghiên cứu động lực học container trên tàu. Ở các công trình này [4,13], cả sự đàn hồi của cáp treo hàng



Hình 2. Mô hình cơ học của cảng lưu động

và sự thay đổi chiều dài cáp khi cơ cấu nâng hoạt động đều không được tính đến. Hơn nữa, khối lượng tàu và sự đàn hồi và cản nhớt của nước biển đều bị bỏ qua.

Bài báo này tập trung phân tích động lực học của cần trục đặt trên một tàu, trong đó có kể đến tính đàn hồi của cáp tời. Các kết quả tính toán cho thấy các đáp ứng động lực học của hệ cần trục container trong hai trường hợp là khi tàu không chịu các tác động từ sóng biển và trường hợp tàu có chịu các tác động của sóng biển.

## 2. Mô hình động lực học của cẳng lưu động

Xét mô hình động lực học của cần trục được cho như trên hình 2. Trong đó cẳng lưu động được xem như vật rắn chuyển động song phẳng có khối lượng  $m_b$ , đặt trên một nền đàn hồi, mômen quán tính đối với khối tâm G của nó là  $J_b$ . Tời được xem như một vật chuyển động song phẳng với khối lượng  $m_t$ , mômen quán tính đối với trục quay là  $J_m$ , bán kính của trống là  $r_m$ . Container được xem như một chất điểm có khối lượng  $m_c$  được treo vào dây đàn hồi.

Bỏ qua sự dịch chuyển theo phương ngang của tàu, ta thấy cơ hệ có 6 bậc tự do, ta chọn hệ tọa độ suy rộng đủ là:  $q_1 = x_t, q_2 = \varphi_m, q_3 = \theta, q_4 = s, q_5 = y, q_6 = \varphi_b$ .

Động năng của hệ có dạng:

$$T = \frac{1}{2} m_b \dot{y}^2 + \frac{1}{2} J_b \dot{\varphi}_b^2 + \frac{1}{2} m_t (\dot{x}_{mt}^2 + \dot{y}_{mt}^2) + \frac{1}{2} J_m (\dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_m)^2 + \frac{1}{2} m_c (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) \quad (1)$$

trong đó

$$\begin{cases} x_{mt} = (a_1 + x_t) \cos(\varphi_b) - a_2 \sin(\varphi_b) \\ y_{mt} = y + (a_1 + x_t) \sin(\varphi_b) + a_2 \cos(\varphi_b) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_c = x_{mt} - r \cos(\theta) - (l_0 - r_m \varphi_m + r\theta + s + \Delta s) \sin(\theta) \\ y_c = y_{mt} + r \sin(\theta) - (l_0 - r_m \varphi_m + r\theta + s + \Delta s) \cos(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

Thế năng của cơ hệ có dạng:

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y - \Delta y - a_3 \varphi_b)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y - \Delta y + a_4 \varphi_b)^2 + \frac{1}{2} k_3 (s + \Delta s)^2 + m_b g y + m_t g y_{mt} + m_c g y_c \quad (4)$$

Hàm hao tán có dạng

$$\Phi = \frac{1}{2} b_1 (\dot{y} - a_3 \dot{\varphi}_b)^2 + \frac{1}{2} b_2 (\dot{y} + a_4 \dot{\varphi}_b)^2 + \frac{1}{2} b_t \dot{x}_t^2 + \frac{1}{2} b_s \dot{s}^2 + \frac{1}{2} b_m \dot{\varphi}_m^2 \quad (5)$$

Các lực suy rộng của các lực không thế

$$Q_{x_t} = u(t), Q_{\varphi_m} = M_m(t), Q_\theta = 0; Q_s = 0, Q_y = 0, Q_{\varphi_b} = 0. \quad (6)$$

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

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q_i \quad (7)$$

ta được hệ 6 phương trình vi phân mô tả dao động của cần trục container đặt trên tàu có dạng

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

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T, \mathbf{G}(\mathbf{q}) = [g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6]^T, \mathbf{U} = [u(t), M_m(t), 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{61} & \dots & m_{66} \end{bmatrix}, \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{61} & \dots & c_{66} \end{bmatrix}$$

với

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_c + m_t, m_{12} = m_c r_m \sin(q_6 + q_3), m_{13} = -m_c (l_0 + \Delta s + q_4 - r_m q_2 + r_m q_3) \cos(q_6 + q_3), \\ m_{14} &= -m_c \sin(q_6 + q_3), m_{15} = (m_t + m_c) \sin q_6, m_{16} = -(m_t + m_c) a_2, m_{21} = m_{12}, m_{22} = J_m + m_c r_m^2, \end{aligned}$$

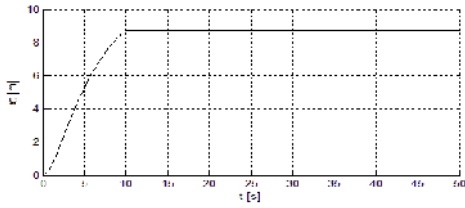
$$\begin{aligned}
 m_{24} &= -m_c r_m, m_{25} = m_c r_m \cos q_3, m_{26} = -J_m - m_c r_m a_2 \sin(q_6 + q_3) + m_c r_m (q_1 + a_1) \cos(q_6 + q_3), m_{31} = m_{13}, \\
 m_{33} &= m_c \left[ (l_0 + \Delta s)^2 + q_4^2 + r_m^2 (q_3 - q_2)^2 + 2(l_0 + \Delta s)q_4 - 2r_m(q_2 - q_3)(l_0 + \Delta s) - 2r_m(q_2 q_4 - q_3 q_4) \right] \\
 m_{36} &= m_c a_2 (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \cos(q_6 + q_3) + m_c (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) (q_1 + a_1) \sin(q_6 + q_3) \\
 m_{35} &= m_c (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \sin q_3, m_{41} = m_{14}, m_{42} = m_{24}, m_{44} = m_c, m_{45} = -m_c \cos q_3, m_{51} = m_{15}, \\
 m_{46} &= -m_c ((q_1 + a_1) \cos(q_6 + q_3) - a_2 \sin(q_6 + q_3)), m_{52} = m_{25}, m_{53} = m_{35}, m_{54} = m_{45}, m_{55} = m_t + m_b + m_c, \\
 m_{56} &= \{(m_t + m_c) a_1 + (m_t + m_c) q_1\} \cos q_6 - (m_t + m_c) a_2 \sin q_6, m_{61} = m_{16}, m_{62} = m_{26}, m_{63} = m_{36}, \\
 m_{64} &= m_{46}, m_{65} = m_{56}, m_{66} = J_b + J_m + (m_t + m_c) (q_1^2 + a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 q_1), m_{23} = m_{32} = m_{34} = m_{43} = 0 \\
 c_{11} &= b_t, c_{12} = 2m_c r_m \dot{q}_3 \cos(q_6 + q_3), c_{16} = -(m_t + m_c) (a_1 + q_1) \dot{q}_6, c_{21} = 2m_c r_m \dot{q}_6 \cos(q_6 + q_3), c_{22} = b_m, \\
 c_{13} &= -m_c (r_m \dot{q}_3 + 2\dot{q}_4) \cos(q_6 + q_3) + m_c (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \dot{q}_3 \sin(q_6 + q_3), \\
 c_{23} &= m_c r_m (l_0 + \Delta s + q_4 - r_m q_2 + r_m q_3) \dot{q}_3, c_{26} = -m_c r_m (q_1 + a_1) \dot{q}_6 \sin(q_6 + q_3) - m_c r_m a_2 \dot{q}_6 \cos(q_6 + q_3), \\
 c_{31} &= 2m_c (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \dot{q}_6 \sin(q_6 + q_3), c_{32} = -2m_c r_m (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \dot{q}_3, \\
 c_{32} &= -2m_c r_m (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \dot{q}_3, c_{33} = m_c (l_0 + \Delta s + q_4 - r_m q_2 + r_m q_3) (2\dot{q}_4 + r_m \dot{q}_3), \\
 c_{36} &= m_c (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) (q_1 + a_1) \cos(q_6 + q_3) \dot{q}_6 - m_c a_2 (l_0 + \Delta s + q_4 - r_m q_2 + r_m q_3) \sin(q_6 + q_3) \dot{q}_6, \\
 c_{41} &= -2m_c \dot{q}_6 \cos(q_6 + q_3), c_{43} = -m_c (l_0 + \Delta s + q_4 - r_m q_2 + r_m q_3) \dot{q}_3, c_{44} = b_3, \\
 c_{46} &= m_c (q_1 + a_1) \sin(q_6 + q_3) \dot{q}_6 + m_c a_2 \cos(q_6 + q_3) \dot{q}_6, c_{51} = 2(m_t + m_c) \cos q_6 \dot{q}_6, \\
 c_{53} &= m_c (l_0 + \Delta s + q_4 - r_m q_2 + r_m q_3) \cos q_3 \dot{q}_3 + m_c (r_m \dot{q}_3 - 2r_m \dot{q}_2 + 2\dot{q}_4) \sin q_3, c_{55} = b_1 + b_2, \\
 c_{56} &= b_2 a_4 - b_1 a_3 - (m_t + m_c) a_2 \cos q_6 \dot{q}_6 - (m_t + m_c) (a_1 + q_1) \sin q_6 \dot{q}_6, c_{61} = 2(m_t + m_c) (q_1 + a_1) \dot{q}_6, \\
 c_{63} &= m_c \{(q_1 + a_1) (2\dot{q}_4 - 2r_m \dot{q}_2 + r_m \dot{q}_3) - a_2 (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \dot{q}_3\} \sin(q_6 + q_3) \\
 &\quad + m_c \{a_2 (2\dot{q}_4 - 2r_m \dot{q}_2 + r_m \dot{q}_3) + (q_1 + a_1) (l_0 + \Delta s + q_4 + r_m q_3 - r_m q_2) \dot{q}_3\} \cos(q_6 + q_3) \\
 c_{65} &= b_2 a_4 - b_1 a_3, c_{66} = b_2 a_4^2 + b_1 a_3^2, c_{14} = c_{15} = c_{24} = c_{25} = c_{34} = c_{35} = c_{42} = c_{45} = c_{52} = c_{54} = c_{62} = c_{64} = 0. \\
 g_1 &= (m_t + m_c) g \sin q_6, g_2 = m_c g r_m \cos q_3, g_3 = m_c g (l_0 + \Delta s + q_4 - r_m q_2 + r_m q_3) \sin q_3, \\
 g_4 &= k_3 (q_4 + \Delta s) - m_c g \cos q_3, g_5 = (m_b + m_t + m_c) g - (k_1 a_3 - k_2 a_4) q_6 + (k_1 + k_2) (q_5 - \Delta y), \\
 g_6 &= -(k_1 a_3 - k_2 a_4) (q_5 - \Delta y) + (k_1 a_3^2 + k_2 a_4^2) q_6 + (m_t + m_c) g (a_1 + q_1) \cos q_6 - (m_c + m_t) g a_2 \sin q_6.
 \end{aligned}$$

### 3. Các kết quả mô phỏng

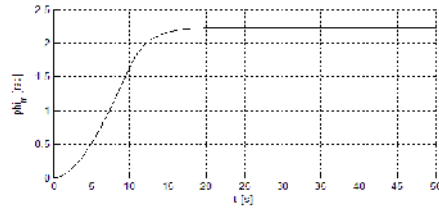
Phương trình vi phân phi tuyến (8), đã được giải bằng phương pháp Newmark [5]. Để tính toán số, giá trị các tham số của hệ được cho như sau:  $g = 9.81(\text{m/s}^2)$ ;  $a_2 = 32(\text{m})$ ;  $a_3 = a_4 = 12.5(\text{m})$ ;  $r_m = 0.325(\text{m})$ ;  $l_0 = 30(\text{m})$ ;  $m_b = 4500000(\text{kg})$ ;  $m_t = 5900(\text{kg})$ ;  $m_c = 650(\text{kg})$ ;  $J_b = 571875000(\text{kg.m}^2)$ ;  $J_m = 41700(\text{kg.m}^2)$ ;  $k_1 = k_2 = 2,625.10^7(\text{N/m})$ ;  $k_3 = 6000(\text{N/m})$ ;  $b_1 = b_2 = 200(\text{Ns/m})$ ;  $b_3 = 50(\text{Ns/m})$ .

Với các số liệu cho như trên sau khi tính toán, ta được một số kết quả mô phỏng cho trên các hình 3-14. Trong đó các hình 3, 4, 5, 7, 9 biểu diễn kết quả tính toán trong trường hợp tàu không chịu tác động của sóng và bỏ qua tính đàn hồi của dây cáp. Các hình 6, 8, 10, 11 biểu diễn kết quả tính toán trong trường hợp tàu không chịu tác động của sóng nhưng có kể đến tính đàn hồi của dây cáp tời. Còn các hình 12, 13, 14 biểu diễn kết quả tính toán trong trường hợp tàu chịu tác động của sóng biển.

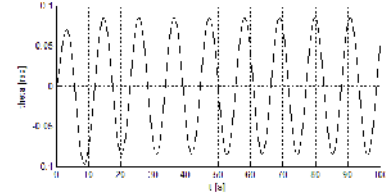
So sánh các hình 5, 7, 9 với các hình 6, 8, 10 ta thấy, tính đàn hồi của dây cáp không ảnh hưởng nhiều đến quá trình vận chuyển Container. Nhưng so sánh các hình 3, 4, 5 với các hình 12, 13, 14, ta thấy sự ảnh hưởng của sóng biển đến quá trình vận chuyển Container là rất lớn. Cũng từ các kết quả tính toán ta thấy, trong mọi trường hợp, khi kết thúc quá trình vận chuyển thì tải trọng luôn mất ổn định và sự mất ổn định còn phức tạp hơn nữa khi có sự tác động từ sóng biển đến tàu mang cần trục. Do đó, việc thiết kế một quy luật điều khiển hợp lý đối với các cần trục hoạt động ngoài khơi là rất cần thiết.



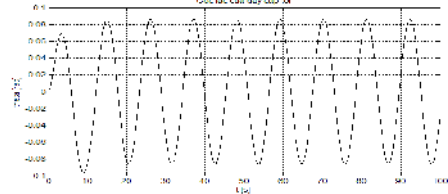
Hình 3. Dịch chuyển của xe tời



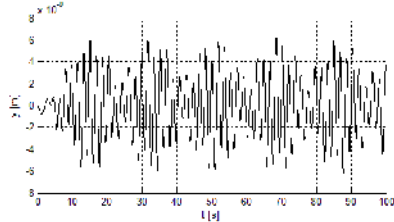
Hình 4. Góc quay của tời



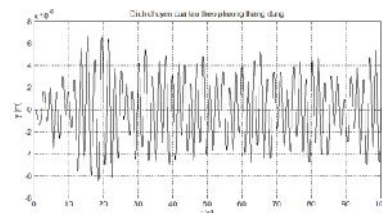
Hình 5. Góc lắc của dây cáp khi cáp không đàn hồi



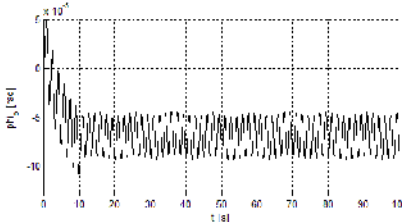
Hình 6. Góc lắc dây cáp khi cáp đàn hồi



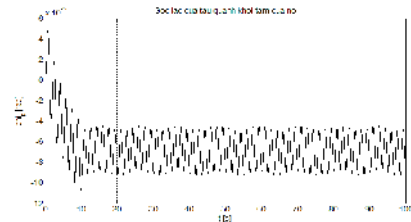
Hình 7. Dịch chuyển của tàu khi cáp không đàn hồi



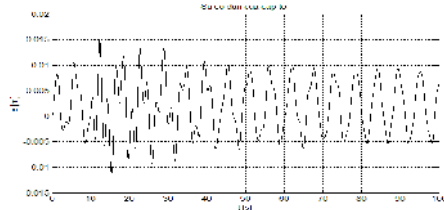
Hình 8. Dịch chuyển của tàu khi cáp đàn hồi



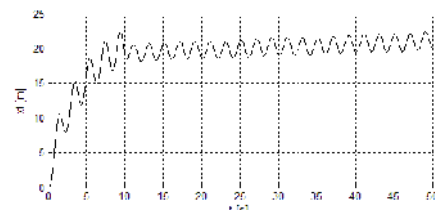
Hình 9. Góc lắc của tàu khi cáp không đàn hồi



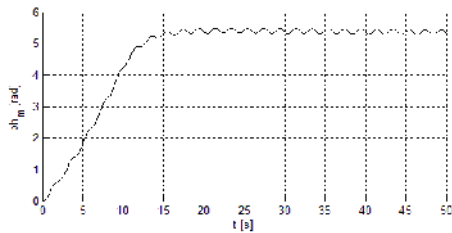
Hình 10. Góc lắc của tàu khi cáp đàn hồi



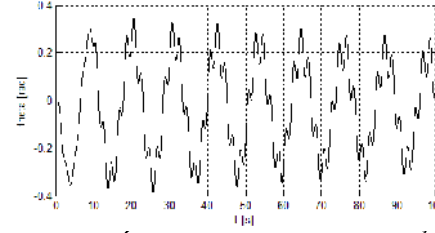
Hình 11. Dao động dọc của dây cáp



Hình 12. Dịch chuyển của xe tời khi có sóng biển



Hình 13. Góc quay của tời khi có sóng biển



Hình 14. Góc lắc của cáp tời khi có sóng biển

#### 4. Kết luận

Trong bài báo này, đã tập trung nghiên cứu động lực học của cần trục container đặt trên một tàu, trong đó có kể đến sự đàn hồi của cáp tời. Từ các kết quả tính toán, ta thấy, khi xe tời đã kết thúc sự dịch chuyển thì tải trọng vẫn tiếp tục lắc lư và điều này làm cho toàn bộ hệ mất ổn định. Sự mất ổn định này được gây ra bởi sự dừng đột ngột khi xe tời đến vị trí mong muốn. Sự mất ổn định này ít bị ảnh hưởng bởi tính đàn hồi của cáp tời mà nó chịu ảnh hưởng rất lớn bởi các kích động của sóng biển.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Ju-Hwan Cha, Myung-II 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] G.F. Clauss, M. Vannahme, K. Ellermann, E. Kreuzer (2000), “Subharmonic Oscillations of Moored Floating Cranes”, *Offshore Technology Conference 11953*, pp.1-8.
- [3] Bùi Khắc Gày, *Nghiên cứu khảo sát động lực học của cần trục*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Hà Nội. 1998
- [4] Keum-Shik Hong, Quang Hieu Ngo (2012), “*Dynamics of the container crane on a mobile harbor*”, *Ocean Engineering* 53, pp.16-24.
- [5] Đinh Văn Phong, *Phương pháp số trong cơ học*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội. 1999
- [6] R.J. Henry, Z.N. Masoud, A.H. Nayfeh and D.T. Mook, “Cargo Pendulation Reduction on Ship-Mounted Cranes Via Boom-Luff Angle Actuation,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, pp.1253-1264, 2001.
- [7] C.-M. Chin, A. H. Nayfeh and D. T. Mook, “Dynamics and Control of Ship-Mounted Cranes,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, pp.891-904, 2001.
- [8] K. Ellermann, E. Kreuzer, and M. Markiewicz,” Nonlinear Dynamics of Floating Cranes,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 27, pp. 107–183, 2002.
- [9] K. Ellermann and E. Kreuzer, “Nonlinear Dynamics in the Motion of Floating Cranes,” *Multibody System Dynamics*, vol. 9, pp. 377–387, 2003.
- [10] 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.
- [11] Y. Al-Sweiti and D. Soeffker, “Modelling and control of an elastic ship-mounted crane using variable-gain model-based controller,” *Multi-body Dynamics*, vol. 220, pp. 239-255, 2006.
- [12] 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.
- [13] 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.

**Người phản biện: TS. Nguyễn Mạnh Thường; TS. Cao Đức Thiệp**

**THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VI PHÂN - TỈ LỆ HỒI TIẾP TUYẾN TÍNH HÓA  
CHO CẦN TRỤC CONTAINER GẮN TRÊN TÀU**  
DESIGN OF A PROPORTIONAL - DERIVATIVE FEEDBACK  
LINERIZATION CONTROLLER FOR A SHIP - MOUNTED CONTAINER CRANE

**TS. LÊ ANH TUẤN**

*Khoa Cơ khí, Trường ĐHHH Việt Nam*

**Tóm tắt**

*Chúng tôi xây dựng hai bộ điều khiển cho hệ thống cần container gắn trên tàu dựa trên sự phối hợp của ba kỹ thuật điều khiển: Hồi tiếp tuyến tính hóa, trượt, và vi phân-tỉ lệ (PD). Các nhiễu gồm độ đàn nhót của nước biển, độ đàn hồi của cáp treo, kích động của sóng biển gây ra chuyển động của tàu được kể đến đầy đủ trong quá trình thiết kế. Bộ điều khiển được thiết kế để thực hiện đồng thời bốn nhiệm vụ: Điều khiển xe con chuyển động chính xác đến vị trí yêu cầu, nâng hoặc hạ container chính xác, giảm dao động dọc và giảm lắc ngang container. Công trình gồm hai phần: Phần này tập trung xây dựng mô hình toán và thiết kế bộ điều khiển PD hồi tiếp tuyến tính hóa (PDTTH). Phần thứ hai thiết kế bộ điều khiển PD trượt sẽ được trình bày trong bài báo tiếp theo.*