

## GIẢM DAO ĐỘNG LẮC LƯ CỦA CÁP CẦN CẦU BẰNG CÁCH ĐIỀU KHIỂN ĐỘ CẢN CỦA BỘ GIẢM CHẤN BÁN CHỦ ĐỘNG

Nguyễn Trọng Kiên<sup>(1)</sup>, Lê Đức Việt<sup>(2)</sup>  
Nguyễn Bá Nghị<sup>(2)</sup>, Nguyễn Thị Thanh Tùng<sup>(1)</sup>  
<sup>1</sup> Trường Đại học Vinh

<sup>2</sup> Viện Cơ học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Ngày nhận bài 10/7/2018, ngày nhận đăng 18/8/2018

**Tóm tắt:** Một trong những giải pháp để giảm dao động lắc lư của cáp cần cầu là sử dụng bộ giảm chấn bị động. Phương pháp cản bị động này áp dụng đơn giản nhưng lại có hiệu quả hạn chế vì sự không linh hoạt trong việc ngăn cản chuyển động bất lợi và không khuếch đại được chuyển động có lợi. Bài báo này đề xuất một bộ điều khiển bật - tắt hệ số cản của bộ giảm chấn bán chủ động để cải thiện bộ giảm chấn bị động. Mục tiêu của điều khiển bật - tắt hệ số cản là khuếch đại chuyển động theo phương hướng tâm của bộ giảm chấn nhằm tăng năng lượng tiêu tán, qua đó làm giảm dao động lắc lư. Hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất được thể hiện qua mô phỏng số chuyển động của cần cầu 2D.

### 1. Giới thiệu

Cần cầu đóng vai trò rất quan trọng trong công nghiệp và việc nâng cao hiệu quả hoạt động của cần cầu mang lại giá trị to lớn về kỹ thuật cũng như về kinh tế. Tuy nhiên, trọng tải của cần cầu treo bởi dây cáp luôn có đặc tính linh động có hữu. Dao động của trọng tải gây ra bởi ngoại lực như gió thường có các hạn chế cơ bản do các điều kiện ban đầu hoặc do sự vận hành không chuẩn xác.

Các phương pháp kiểm soát dao động lắc lư của cáp được trình bày trong các tài liệu đã có thường được thực hiện theo hướng chủ động. Các giá trị đo trạng thái của cần cầu như vị trí, góc lắc được sử dụng để tạo ra các tín hiệu điều khiển [1-4].

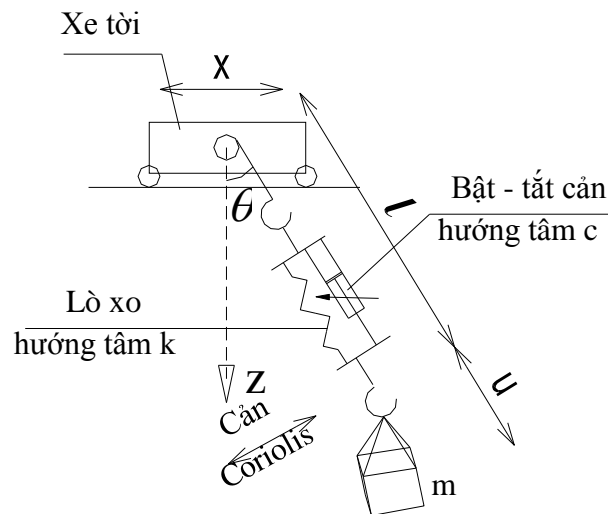
Theo một hướng khác, những hệ thống tiêu tán năng lượng bị động tương đối kinh điển đã được giới thiệu để kiểm soát dao động lắc lư trong một số nghiên cứu gần đây [5, 6]. Trong đó, bộ lò xo - giảm chấn bị động là một dạng điển hình có thể được sử dụng để kiểm soát dao động lắc lư [6]. Bộ lò xo giảm chấn hoạt động dựa trên nguyên lý của cản Coriolis. Phương pháp cản bị động này đơn giản trong áp dụng nhưng hạn chế ở sự không linh hoạt trong việc ngăn cản chuyển động bất lợi và khuếch đại được chuyển động có lợi. Điều khiển bật - tắt hệ số cản nhằm khuếch đại các chuyển động có lợi để tăng khả năng tiêu tán năng lượng của bộ giảm chấn, từ đó làm giảm dao động lắc lư của cáp cần cầu.

Điều khiển bật - tắt hệ số cản hay còn gọi là phương pháp bán chủ động là một phương pháp đầy triển vọng [7, 8]. Thiết bị cho phương pháp này không khác nhiều so với thiết bị cho phương pháp bị động. Ngoài ra, nó còn có sự thích ứng và rất linh hoạt của một hệ chủ động. Phương pháp điều khiển bán chủ động đã được nghiên cứu và công bố bởi nhiều nhà khoa học [7-10], tuy nhiên những nghiên cứu này chỉ nghiên cứu giảm dao động theo phương biến dạng của bộ giảm chấn. Trong bài báo này, dao động cần giảm không cùng phương với biến dạng của bộ giảm chấn. Nhóm tác giả đã đề xuất một

bộ điều khiển bật - tắt hệ số cản cho thiết bị giảm chấn bán chủ động, được treo vào giữa trọng tải và cáp cần cầu dạng cầu trục. Mục tiêu của bộ điều khiển này là trợ giúp sự dịch chuyển của bộ giảm chấn nhằm tăng nhanh năng lượng tiêu tán.

## 2. Mô hình toán học

Hệ lò xo giảm chấn hướng tâm đã được đề xuất để giảm dao động tự do gây ra bởi điều kiện ban đầu [5, 6]. Hình 1 thể hiện mô hình cáp cần cầu dạng cầu trục có gắn lò xo và hệ số cản được bật tắt hướng tâm. Mô hình này thường được áp dụng trong cầu trục nhà công nghiệp hoặc ở dạng cầu trục tháp trong xây dựng. Trên hình 1, chuyển động lắc lư của trọng tải tạo ra lực ly tâm. Do kết nối lò xo giảm chấn giữa trọng tải và cáp, chuyển động hướng tâm của trọng tải được kích hoạt. Chuyển động này về phần nó tạo ra lực cản Coriolis tác động vào chuyển động lắc lư để kiểm soát chuyển động đó. Cản Coriolis là phi tuyến và chỉ thể hiện hiệu quả trong dao động lớn. Trong trường hợp độ cản là bị động, nếu độ cản quá lớn sẽ ngăn cản chuyển động hướng tâm và do đó lực cản Coriolis sẽ giảm. Ngược lại, độ cản quá nhỏ sẽ gây ra chuyển động cộng hưởng. Trường hợp độ cản được bật - tắt sẽ khắc phục được những hạn chế của độ cản quá cao hoặc quá thấp.



**Hình 1:** Mô hình cáp cần cầu dạng cầu trục có gắn lò xo và hệ số cản được bật - tắt hướng tâm

Để minh họa cho kỹ thuật được đề xuất ta đưa ra các giả thiết sau:

- Chỉ xét cần trục trong mặt phẳng có một lệnh được thực hiện: Di chuyển của xe tời,  $x$  thay đổi (không xét lệnh nâng cáp:  $l = \text{const}$ ). Giả thiết rằng tải trọng được nâng lên ở một độ cao nhất định rồi người lái cầu mới cho di chuyển xe tời. Trường hợp này hay gặp trong thực tế.

- Khối lượng lò xo và giảm chấn có thể bỏ qua so với khối lượng trọng tải.
- Độ cứng của cáp đủ lớn khi so sánh với độ cứng của lò xo để bỏ qua biến dạng của cáp.

Các ký hiệu được sử dụng trong bài báo được miêu tả chi tiết trong Bảng 1.

**Bảng 1: Mô tả các ký hiệu**

Ký hiệu	Mô tả
$m$	Khối lượng trọng tải
$k, c$	Hệ số lò xo và bộ giảm chấn
$\theta, \theta_0$	Góc lắc lư và góc ban đầu
$l$	Khoảng cách giữa xe tời và trọng tải trong điều kiện tĩnh
$u$	Chuyển động hướng tâm của trọng tải đo từ vị trí tĩnh
$x$	Chuyển dịch của xe tời
$g$	Gia tốc trọng trường
$\omega_s = \sqrt{g/l}$	Tần số riêng của con lắc
$\tau = \omega_s t$	Thời gian phi thứ nguyên với tỷ lệ $\omega_s^{-1}$
$\alpha = \frac{\sqrt{k/m}}{\omega_s}$	Tỷ số giữa các tần số
$\zeta = \frac{c}{2m\omega_s}$	Tỷ số cản của bộ giảm chấn
$u_n = u/l, x_n = x/l$	Dạng phi thứ nguyên của chuyển dịch hướng tâm và chuyển động của xe tời

Căn cứ vào hình 1, vị trí của tải trọng ( $x_P, y_P$ ) có dạng:

$$x_P = x + (l+u)\sin\theta; \quad y_P = (l+u)\cos\theta. \quad (1)$$

- Hàm động năng, hàm thế năng và hàm tiêu tán năng lượng sau khi được biến đổi có dạng :

$$E_k = \frac{m}{2}(\dot{x}_P^2 + \dot{y}_P^2); \quad E_p = \frac{ku^2}{2} + mg(l+u-y_P) + \frac{ku_0^2}{2}; \quad E_D = \frac{1}{2}cu^2. \quad (2)$$

Trong đó biến đổi chi tiết của hàm thế năng  $E_P$  như sau:

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{k(u+u_0)^2}{2} + mg(l-y_P) = \frac{ku^2}{2} + ku_0u + \frac{k.u_0^2}{2} + mg(l-y_P) = \frac{ku^2}{2} + k\frac{mg}{k}u + \frac{ku_0^2}{2} + mg(l-y_P) = \\ &= \frac{ku^2}{2} + mg(l+u-y_P) + \frac{ku_0^2}{2} \end{aligned}$$

Ở đây  $u_0$  là độ giãn tĩnh của lò xo.

Hệ có hai bậc tự do ( $\theta, u$ ). Hai phương trình Lagrange của hệ:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial(E_K - E_P)}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial(E_K - E_P)}{\partial q} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}} = 0 \quad (q = \theta, u) \quad (3)$$

Sau khi đạo hàm và thay thế các hàm năng lượng vào phương trình Lagrange ta được hai phương trình chuyển động như sau:

$$2\dot{\theta}\dot{u} + \ddot{x}\cos\theta + \ddot{\theta}(l+u) + g\sin\theta = 0$$

$$m\ddot{x}\sin\theta + m\ddot{u} - m\dot{\theta}^2(l+u) + mg(1-\cos\theta) + ku + cu = 0. \quad (4)$$

Sử dụng một số tham số phi thứ nguyên được liệt kê trong bảng 1, ta rút gọn hai phương trình (4) về dạng phi thứ nguyên:

$$2\dot{\theta}_n\dot{u}_n + \ddot{x}_n\cos\theta + \ddot{\theta}(1+u_n) + \sin\theta = 0$$

$$\ddot{x}_n\sin\theta + \ddot{u}_n - \dot{\theta}^2(1+u_n) + (1-\cos\theta) + \alpha^2u_n + 2\zeta\dot{u}_n = 0. \quad (5)$$

Bộ lò xo giảm chấn bị động như trên hình 1 đã được nghiên cứu trong trường hợp dao động tự do [6]. Các công thức giải tích của các tham số tối ưu đã được giới thiệu trong [6] và được đưa ra sau đây:

$$\alpha_{opt} = 2$$

$$\zeta_{opt}^2 = \theta_0^2 \frac{12 + 27\zeta_{opt}^2 - 9\zeta_{opt}^4}{8(3\zeta_{opt}^2 + 4)^2} \quad (6)$$

Ở đây  $\alpha_{opt}$  và  $\zeta_{opt}$  là các tham số tối ưu của  $\alpha$  và  $\zeta$  của bộ lò xo giảm chấn bị động,  $\theta_0$  là góc dao động ban đầu và ký tự dưới *opt* ký hiệu các tham số phi thứ nguyên. Tỷ số cản tối ưu của bộ giảm chấn  $\zeta_{opt}$  thu được bằng cách giải phương trình bậc 3 đối với  $\zeta_{opt}^2$ . Lời giải của phương trình này phụ thuộc vào góc ban đầu  $\theta_0$ . Đó là hệ quả của tính phi tuyến sẵn có của cản Coriolis. Trong thực tế tính toán, một giá trị thiết kế nhất định của  $\theta_0$  cần được đặt trước để tính  $\zeta_{opt}$ .

### 3. Điều khiển bật - tắt hệ số cản

Để đánh giá hiệu quả bộ điều khiển bật - tắt hệ số cản, tỉ số cản  $\zeta$  của bộ giảm chấn bị động được thay đổi giữa giá trị cao  $\zeta_h$  và giá trị thấp  $\zeta_l$ . Mục tiêu của việc này là trợ giúp sự di chuyển của bộ giảm chấn bị động. Xấp xỉ phương trình thứ 2 của (5) ở dạng dao động tự do theo [6] ta được :

$$\ddot{u}_n + 2\zeta\dot{u}_n + \alpha^2 u_n = \dot{\theta}^2 - \frac{\theta^2}{2}. \quad (7)$$

Xét dao động ở tần số cộng hưởng  $\theta = \theta_0 \sin \tau$ , trong đó  $\theta_0$  là biên độ góc lắc. Lực của con lắc ở (7) được viết lại như sau:

$$\dot{\theta}^2 - \frac{\theta^2}{2} = \theta_0^2 \cos^2 \tau - \frac{\theta_0^2 \sin^2 \tau}{2} = \frac{\theta_0^2}{4} - \frac{3}{4}(\dot{\theta}^2 - \theta^2). \quad (8)$$

Trong (8), phần thứ nhất là phần tĩnh, không có tác dụng khuếch đại bộ phận tiêu tán năng lượng di chuyển. Ngược lại, phần động  $\frac{3}{4}(\dot{\theta}^2 - \theta^2)$  có vai trò quan trọng trong việc khuếch đại di chuyển của bộ phận tiêu tán năng lượng. Do đó cách điều khiển hệ số cản được đề xuất như sau:

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_h & \dot{u}_n(\dot{\theta}^2 - \theta^2) < 0 \\ \zeta_l & \dot{u}_n(\dot{\theta}^2 - \theta^2) > 0 \end{cases}$$

- Khi  $\dot{u}_n(\dot{\theta}^2 - \theta^2) < 0$ , phần động trong (8) cản trở sự di chuyển của bộ giảm chấn nên độ cản được bật lên giá trị cao  $\zeta_h$  để hạn chế xu hướng đó.

- Khi  $\dot{u}_n(\dot{\theta}^2 - \theta^2) > 0$ , phần động của bộ giảm chấn trong (8) làm tăng tốc độ di chuyển của bộ giảm chấn nên độ cản được bật xuống giá trị thấp  $\zeta_l$  để giải phóng bộ giảm chấn. Mục đích của việc này là làm tăng nhanh quá trình tiêu tán năng lượng.

### 4. Mô phỏng số

Để minh họa hiệu quả của kỹ thuật điều khiển bật - tắt hệ số cản, quá trình dao động của tải trọng dưới tác dụng của lệnh điều khiển xe tời được tính toán mô phỏng số. Giá trị tính toán được chọn như sau:

- Góc lắc ban đầu được chọn  $\theta_0 = 30^\circ$ , các giá trị ban đầu khác được chọn bằng không.

- Các độ cản bật tắt được chọn là  $\zeta_h = 20\zeta_{opt}$ ,  $\zeta_l = 0,05\zeta_{opt}$ .

- Lò xo giảm chấn hướng tâm được thiết kế cho góc dao động lớn tới  $60^\circ$ .

- Kết quả của các tham số tối ưu được tính bằng:  $\zeta_{opt} = 0,3296$ ,  $\alpha_{opt} = 2$ .

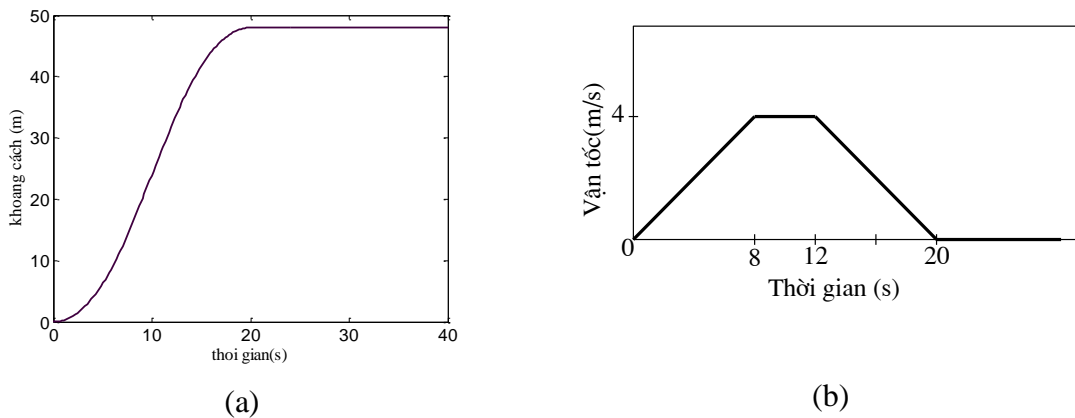
Lệnh di chuyển xe tời được thực hiện như sau:

- Giai đoạn 1, từ 0 đến 8s, xe tời di chuyển từ 0 đến 16m, vận tốc thay đổi từ 0 đến 4m/s.

- Giai đoạn 2, từ 8s đến 12s, xe tời di chuyển từ vị trí 16m đến 32m, vận tốc không đổi là 4m/s.

- Giai đoạn 3, từ 12s đến 20s, xe tời di chuyển từ vị trí 32m đến 48m, vận tốc giảm từ 4m/s về 0.

Quá trình vận hành xe tời được thể hiện trên hình 2.



**Hình 2:** Quá trình vận hành xe tời

a) Di chuyển của xe tời theo phương ngang

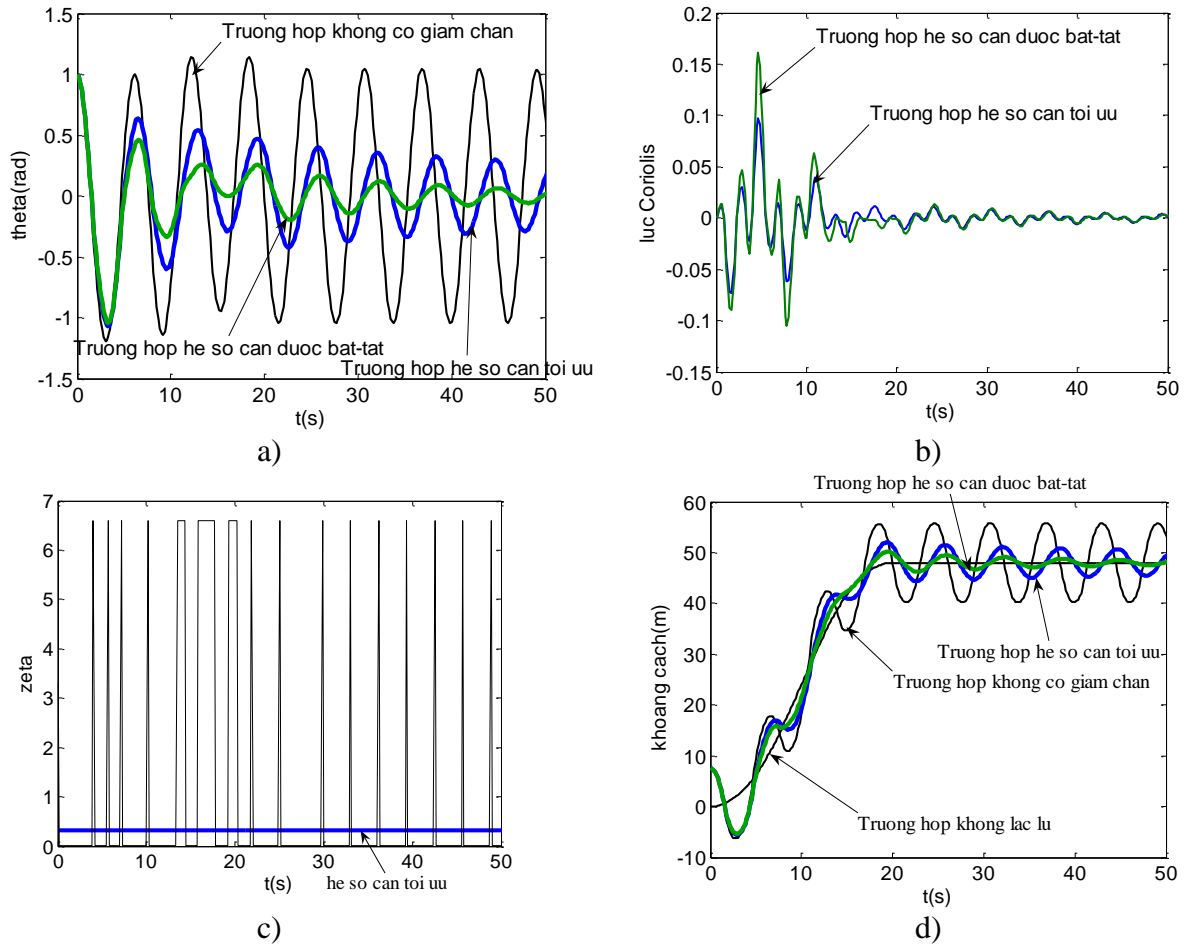
b) Lệnh điều khiển vận tốc

Hình 3a-d biểu thị sự biến thiên của các đại lượng nghiên cứu theo thời gian  $t(s)$ , bao gồm góc lắc  $\theta$ , lực cản Coriolis, hệ số cản  $\zeta$  và khoảng cách di chuyển của tải trọng theo phương ngang.

Đồ thị hình 3a cho thấy, góc lắc trong trường hợp hệ số cản được điều khiển bật - tắt nhỏ hơn trường hợp hệ số cản tối ưu bị động. Điều đó thể hiện hiệu quả giảm dao động lắc lư của phương pháp được đề xuất. Trên hình 3b, lực cản Coriolis trong trường hợp hệ số cản được điều khiển bật - tắt lớn hơn trường hợp hệ số cản tối ưu bị động, chứng tỏ khi hệ số cản được điều khiển sẽ làm tăng lực cản Coriolis theo phương dao động dẫn đến làm giảm dao động lắc lư.

Hình 3d thể hiện khoảng cách di chuyển của tải trọng theo phương ngang trong 2 trường hợp: sử dụng bộ giảm chấn bị động và sử dụng bộ giảm chấn bán chủ động với hệ số cản được điều khiển bật - tắt. Kết quả thể hiện trên đồ thị hình 3d cho thấy sự lắc lư của tải trọng trong trường hợp hệ số cản được điều khiển bật - tắt là nhỏ hơn trường hợp hệ số cản tối ưu bị động. Điều này thể hiện khi hệ số cản được điều khiển thì dao động lắc lư của tải trọng theo phương ngang đã giảm xuống.

Từ các phân tích ở trên, có thể nhận thấy rõ sự hiệu quả của bộ giảm chấn bán chủ động trong việc giảm dao động lắc lư của cáp cần cầu so với trường hợp bộ giảm chấn bị động.



**Hình 3:** Lịch sử thời gian của: a) góc lắc, b) lực Coriolis, c) hệ số cản, d) di chuyển của tải trọng theo phương ngang

### 5. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất một bộ điều khiển bật - tắt hệ số cản cho bộ giảm chấn bán chủ động. Bộ điều khiển này được xây dựng trên ý tưởng khuếch đại chuyển động của bộ giảm chấn bán chủ động theo phương hướng tâm nhằm tăng nhanh quá trình tiêu tán năng lượng, qua đó làm giảm dao động lắc lư của cáp cần cầu. Kết quả mô phỏng số đã chỉ ra hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất. Cụ thể là: dao động lắc lư (góc lắc) của tải trọng trong trường hợp hệ số cản được điều khiển bật - tắt là nhỏ hơn so với trường hợp hệ số cản tối ưu bị động.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Dongho Kim and Youngjin Park, 2015, *Tracking control in x-y plane of an offshore container crane*, Journal of Vibration and Control, doi: 10.1177/1077546315581091.
- [2] Kim D. H. and Lee J. W., *Model-based PID control of a crane spreader by four auxiliary cables*, Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science, 220, 1151-1165, 2006.
- [3] Masoud. Z., *Oscillation control of quay-side container cranes using cable-length manipulation*, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 129, 224-228, 2007.
- [4] Lee. H. H., Liang. Y., Segura. D., *A sliding-mode antiswing trajectory control for overhead cranes with high-speed load hoisting*, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 128, 842-845, 2006.
- [5] La Duc Viet and Youngjin Park, *A Cable-Passive Damper System for Sway and Skew Motion Control of a Crane Spreader*, Shock and Vibration, Volume 2015, Article ID 507549, 2015.
- [6] L. D. Viet, *Crane sway reduction using Coriolis force produced by radial spring and damper*, Journal of Mechanical Science and Technology, Volume 29, Issue 3, pp 973-979, 2015.
- [7] F. Casciati, F. Marazzi, *Technology of Semi-active Devices and Applications in Vibration Mitigation*, Wiley, UK, 2006.
- [8] L. D. Viet (2012), *Semi-active on-off damping control of a dynamic vibration absorber using Coriolis force*, Journal of Sound and Vibration, 331(15), 3429-3436.
- [9] M. Couillard, P. Micheau, P. Masson, *Improved clipped periodic optimal control for semi-active harmonic disturbance rejection*, Journal of Sound and Vibration 318 (2008) 737-756.
- [10] J. N. Potter, S. A. Neild, D. J. Wagg, *Generalisation and optimisation of semi-active, on-off switching controllers for single degree-of-freedom systems*, Journal of Sound and Vibration 329 (2010) 2450-2462.

## SUMMARY

### ANTI-SWAY OF CRANE'S CABLE BY DAMPING CONTROL OF SEMI-ACTIVE DAMPER

One of the solutions to reduce the sway oscillation motion of crane' cables is to use a passive damper. The application of this method is simple but limited in the insufficient flexibility to prevent adverse movements and to amplify the favorable ones. This paper proposes an on-off damping controller of semi-active damper to improve the passive damper. The aim of the on-off damping control is to amplify the radial motion of damper to increase the energy dissipated, then reduce the sway motion. The effectiveness of proposed controller are verified by numerical simulations of a 2D crane.