

ĐIỀU KHIỂN PHI TUYẾN ỚNG DẪN ĐẦU VỚI TÁC ĐỘNG XEN KÊNH DỌC VÀ NGANG TRỰC

Nguyễn Anh Đức*

Trường Đại học Công nghệ thông tin & Truyền thông – ĐHTH Nguyễn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày vấn đề thiết kế bộ điều khiển đặt tại biên để đạt mục tiêu ổn định toàn cục cho hệ thống ống dẫn dầu trong điều kiện có nhiễu tác động. Dựa trên cách tiếp cận thông qua năng lượng của hệ thống, bài báo đã đưa ra được mô hình toán học của hệ thống có xét đến tác động xen kênh. Phương pháp thiết kế dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov được sử dụng để tìm ra bộ điều khiển. Hiệu quả của hệ thống kín được kiểm nghiệm thông qua một số kết quả mô phỏng.

Từ khóa: ống dẫn dầu, điều khiển biên, hệ phi tuyến, tác động xen kênh

ĐẶT VẤN ĐỀ

Ống hút dầu là một bộ phận quan trọng của công trình khai thác dầu khí ngoài khơi mang đặc điểm cơ học mềm dẻo và dễ bị rung động bởi các yếu tố môi trường tác động đến như sóng, gió, dòng chảy. Vì vậy, việc giảm rung động cơ học trong các công trình hàng hải xa bờ là vấn đề cấp thiết được đặt ra cho lĩnh vực điều khiển trong hàng hải.

Động lực học của ống hút dầu được mô tả bởi một tập các phương trình đạo hàm riêng (PDE) với một số điều kiện biên [1]. Những hệ thống được mô tả bởi PDE thu hút được nhiều sự chú ý của giới nghiên cứu vì tính chất phức tạp của nó. Phương pháp điều khiển truyền thống dựa trên phép phân tích modal đối với các mô hình gián lược có thể tìm thấy ở các nghiên cứu [2,3,4,5,6,7]. Tuy nhiên, chỉ một số ít các hệ tham số rải và vô hạn chiều là có thể quan sát được và điều khiển được nên chất lượng điều khiển về cơ bản bị ảnh hưởng bởi phần còn lại của mô hình đã bị gián lược [8]. Thêm vào đó, yêu cầu về tái cấu trúc các cơ cấu chấp hành và thiết bị đo phân tán cũng gây khó khăn trong việc triển khai kỹ thuật điều khiển dựa trên phương pháp modal vào thực tế.

Để loại bỏ được những nhược điểm nói trên, các hệ thống cơ học mềm dẻo được xem như là những hệ vô hạn chiều được mô tả bởi tập các phương trình đạo hàm riêng, từ đó kỹ

thuật điều khiển phù hợp được áp dụng sao cho ổn định được hệ với số lượng cơ cấu chấp hành và thiết bị đo có thể chấp nhận được. Các nghiên cứu [9,10] giới thiệu một phương pháp tiếp cận mới sử dụng phép biến đổi tích phân để chuyển một thanh dạng mảnh Timoshenko thành một hệ mới với tính chất ổn định biết trước. Phép biến đổi thực chất nhằm tìm kiếm một hệ số khuếch đại phù hợp sau đó thực hiện phép biến đổi ngược phức tạp đối với hệ đã cho. Các công trình tương tự có thể tìm thấy ở [11,12,13].

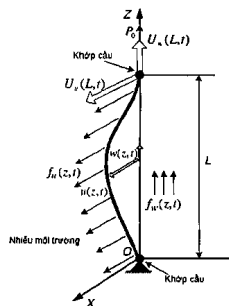
Các bộ điều khiển có ràng buộc cho các hệ mềm theo kiểu dây (string-like) và kiểu thanh (beam-like) được tìm ra dựa trên phương pháp Lyapunov trực tiếp. Các công trình [14,15] đề cập đến vấn đề điều khiển có ràng buộc cho hệ kiểu dây sử dụng các phân hồi bị hạn chế để hệ ổn định theo hàm mũ. Bên cạnh đó, các nghiên cứu [16,17] giải quyết cho các hệ theo kiểu thanh và kiểu dây. Các nghiên cứu về vấn đề này ngày càng thu hút được sự quan tâm bởi tính khả thi trong việc triển khai hệ thống điều khiển như trong một số công trình [18,19,20,21,22,23]. Động học của ống hút dầu được xem xét đến ở công trình [18], thêm vào đó công trình [24] còn xem xét cả động học của tàu. Nghiên cứu [25] đã xem xét một hệ thống kết hợp cả các điều kiện hạn chế của cơ cấu chấp hành lẫn ống hút dầu trong không gian 3 chiều. Trong các nghiên cứu kể trên, lực căng của ống được xem như không biến đổi và quán tính bị bỏ qua nên chất

* Tel: 0912 282848, Email: naduc@ictu.edu.com

lượng điều khiển có thể không thỏa mãn trong một số trường hợp không thỏa mãn điều kiện giả thiết. Đối với các ứng dụng thực tế, lực căng thẳng giáng trong không gian và quán tính cần phải được xem xét đối với vật thể có đường kính lớn.

Trong bài báo này, vấn đề điều khiển để ổn định toàn cục cho ống hút dầu mềm với lực căng thay đổi và có xét đến quán tính sẽ được xem xét. Các phương trình chuyển động được mô tả dạng PDE theo phương pháp năng lượng với các điều kiện hạn chế. Bộ điều khiển hạn chế được thiết kế dựa trên phương pháp Lyapunov trực tiếp đảm bảo hệ thống ổn định toàn cục theo hàm mũ tại điểm cân bằng và lân cận điểm cân bằng khi xét đến các tác động của môi trường.

MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA HỆ THỐNG



Hình 1. Mô tả động học ống hút dầu

Mô hình toán của hệ thống được xây dựng dựa trên các giả thiết sau:

- Ống được xem như một thanh vì tỷ số giữa chiều dài và đường kính là lớn;
- Bỏ qua biến dạng xoắn;
- Ống được xem là cứng cục bộ;
- Vật liệu chế tạo ống là đồng nhất;
- Bỏ qua tác động của môi trường đến phân bố mô men xoắn;

- Khớp nối cầu được đặt ở cả hai đầu ống;
- Các nhiễu tác động bởi môi trường bị chặn.

Phương trình mô tả động năng của ống được viết như sau.

$$T = \frac{m_0}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega(z,t)}{\partial t} \right)^2 \right] dz \quad (1)$$

Trong đó $u(z,t)$ và $\omega(z,t)$ là các dịch chuyển theo phương ngang X và Y , $\omega(z,t)$ là dịch chuyển dọc theo phương Z ; L là chiều dài của thanh; $m_0 = \rho A$ là khối lượng dao động riêng trên một đơn vị chiều dài của thanh; A là diện tích mặt cắt ngang, và ρ là khối lượng riêng. Giả thiết rằng ống có hằng số (dương) lực căng là P_0 . Thế năng của ống được mô tả là:

$$P = \frac{EI}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} \right)^2 dz + \frac{P_0}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} \right)^2 dz + \frac{EA}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial \omega(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} \right)^2 \right)^2 dz \quad (2)$$

Trong đó, E là mô-đun Young, I là mô-men mặt cắt ngang của ống. Thành phần đầu tiên trong phương trình diễn tả lực uốn, thành phần thứ 2 diễn tả lực căng và thành phần thứ 3 diễn tả thế năng biến dạng của ống. Tác động của môi trường được cho bởi:

$$W_f = \int_0^L f_u(z,t)u(z,t)dz + \int_0^L f_w(z,t)\omega(z,t)dz \quad (3)$$

Trong đó $f_u(z,t)$, $f_w(z,t)$ lần lượt là các lực tác động của dòng chảy lên ống dẫn theo các phương X , Z .

Lực tác động chủ động của cơ cấu chấp hành được cho bởi:

$$W_m = U_u(L,t)u(L,t) + U_w(L,t)\omega(L,t) \quad (4)$$

Ở đó $U_u(L,t)$, $U_w(L,t)$ là các lực tác động bị chặn. Như vậy, tổng lực tác động lên hệ thống là:

$$W = \int_0^L f_u(z,t)u(z,t)dz + \int_0^L f_w(z,t)\omega(z,t)dz + U_u(L,t)u(L,t) + U_w(L,t)\omega(L,t) \quad (5)$$

Theo nguyên tắc Hamilton mở rộng ta có:

$$\int_1^2 \delta(T - P + W) dt = 0 \quad (6)$$

Trong bài báo này, như thể hiện trên hình 1, ống hút dầu có các khớp cầu đặt ở hai đầu và hai đầu được gắn cố định. Thay (4) vào phương trình động học của ống như dưới đây:

$$\begin{aligned}
 & -m_0 u_{tt} - EI u_{zzzz} + P_0 u_{zz} + \frac{3EA}{2} u_z^2 u_{zz} \\
 & + EA \omega_{zz} u_z + EA \omega_z u_{zz} - \Omega_{1D} u_t + f_{ut} = 0, \\
 & -m_0 \omega_{tt} - EA \omega_{zz} + EA u_z u_{zz} - \Omega_{2D} \omega_t + f_{\omega t} = 0, \\
 & -EI u_{zz}(L, t) + P_0 u_z(L, t) + \frac{EA}{2} u_z^3(L, t) \\
 & + EA \omega_z(L, t) u_z(L, t) = U_u(L, t), \\
 & EA \omega_z(L, t) + \frac{EA}{2} u_z^2(L, t) + \frac{EA}{2} v_z^2(L, t) = U_\omega(L, t), \\
 & u_{zz}(L, t) = v_{zz}(L, t) = u_z(0, t) = v_z(0, t), \\
 & u(0, t) = v(0, t) = \omega(0, t) = 0,
 \end{aligned} \tag{7}$$

Trong đó ký hiệu

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\bullet)}{\partial z} &= (\bullet)_z, \quad \frac{\partial^2(\bullet)}{\partial z^2} = (\bullet)_{zz}, \quad \frac{\partial^3(\bullet)}{\partial z^3} = (\bullet)_{zzz}, \\
 \frac{\partial(\bullet)}{\partial t} &= (\bullet)_t, \quad \frac{\partial^2(\bullet)}{\partial t^2} = (\bullet)_{tt}, \quad \text{và} \quad \frac{\partial^3(\bullet)}{\partial t^3} = (\bullet)_{ttt}.
 \end{aligned}$$

Thiết kế bộ điều khiển

Xét ứng hàm Lyapunov sau:

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{m_0}{2} \int_0^L (u_z^2 + \omega_z^2) dz + \frac{P_0}{2} \int_0^L u_z^2 dz \\
 &+ \frac{EA}{2} \int_0^L \left(\omega_z + \frac{u_z^2}{2} \right) dz + \frac{EI}{2} \int_0^L u_{zz}^2 dz \\
 &+ \rho_1 \int_0^L u u_t dz + \rho_2 \int_0^L \omega \omega_t dz \\
 &+ \left(k_1 + \frac{k_2 \rho_1}{m_0} \right) u^2(L, t) \\
 &+ \left(k_3 + \frac{k_4 \rho_2}{m_0} \right) \omega^2(L, t).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Sau một số phép biến đổi, ta có:

$$\begin{aligned}
 V &\geq \left(\frac{m_0}{2} - \frac{\rho_1}{\gamma_1} \right) \int_0^L u_z^2 dz + \left(\frac{m_0}{2} - \frac{\rho_2}{\gamma_2} \right) \int_0^L \omega_z^2 dz \\
 &+ \left(\frac{P_0}{2} - 4L^2 \gamma_1 \rho_1 \right) \int_0^L u_z^2 dz \\
 &+ \left(\frac{EA}{2} - 4L^2 \gamma_2 \rho_2 \right) \int_0^L \omega_z^2 dz \\
 &+ \frac{EA}{8} \int_0^L u_z^4 dz + \frac{EA}{4} \int_0^L \omega_z u_z^2 dz \\
 &+ \frac{EI}{2} \int_0^L u_{zz}^2 dz + \frac{1}{2} \left(k_1 + \frac{k_1 \rho_1}{m_0} \right) u^2(L, t)
 \end{aligned}$$

$$+ \left(k_3 + \frac{k_4 \rho_2}{m_0} \right) \omega^2(L, t) \tag{9}$$

và

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &\leq \left(\frac{m_0}{2} + \frac{\rho_1}{\gamma_1} \right) \int_0^L u_t^2 dz + \left(\frac{m_0}{2} + \frac{\rho_2}{\gamma_2} \right) \int_0^L \omega_t^2 dz \\
 &+ \left(\frac{P_0}{2} + 4L^2 \gamma_1 \rho_1 \right) \int_0^L u_z^2 dz \\
 &+ \left(\frac{EA}{2} + 4L^2 \gamma_2 \rho_2 \right) \int_0^L \omega_z^2 dz \\
 &+ \frac{EA}{8} \int_0^L u_z^4 dz + \frac{EA}{4} \int_0^L \omega_z u_z^2 dz \\
 &+ \frac{EI}{2} \int_0^L u_{zz}^2 dz + \frac{1}{2} \left(k_1 + \frac{k_2 \rho_1}{m_0} \right) u^2(L, t) \\
 &+ \left(k_3 + \frac{k_4 \rho_2}{m_0} \right) \omega^2(L, t)
 \end{aligned} \tag{10}$$

Nếu chọn $\rho_1, \rho_2, \gamma_1, \gamma_2$ sao cho:

$$\begin{aligned}
 \frac{m_0}{2} - \frac{\rho_1}{\gamma_1} &= c_1, \quad \frac{m_0}{2} - \frac{\rho_2}{\gamma_2} = c_2 \\
 \frac{P_0}{2} - 4L^2 \gamma_1 \rho_1 &= c_3, \quad \frac{P_0}{2} - 4L^2 \gamma_2 \rho_2 = c_4
 \end{aligned}$$

Khi đó ta có:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \left(u_t(L, t) + \frac{\rho_1}{m_0} u(L, t) \right) (-EI u_{zz}(L, t) \\
 &+ P_0 u_z(L, t) + \frac{EA}{2} u_z^3(L, t) \\
 &+ EA \omega_z(L, t) u_z(L, t)) \\
 &+ \left(\omega_t(L, t) + \frac{\rho_2}{m_0} \omega(L, t) \right) (EA \omega_z(L, t) \\
 &+ \frac{EA}{2} u_z^2(L, t)) - (\Omega_{1D} - \rho_1) \int_0^L u_t^2 dz \\
 &- (\Omega_{2D} - \rho_2) \int_0^L \omega_t^2 dz - \frac{\rho_1 EI}{m_0} \int_0^L u_{zz}^2 dz \\
 &- \frac{\rho_1 P_0}{m_0} \int_0^L u_z^2 dz - \frac{\rho_1 EA}{2 m_0} \int_0^L u_z^4 dz dz \\
 &- \frac{EA}{m_0} \left(\rho_1 + \frac{\rho_2}{2} \right) \int_0^L u_z^2 \omega_z dz \\
 &- \frac{\rho_1 \Omega_{1D}}{m_0} \int_0^L u u_t dz + \frac{\rho_1}{m_0} \int_0^L u f_{ut} dz \\
 &- \frac{\rho_2 EA}{m_0} \int_0^L \omega_z^2 dz - \frac{\rho_2 \Omega_{2D}}{m_0} \int_0^L \omega \omega_t dz \\
 &+ \int_0^L u_t f_{ut} dz + \int_0^L \omega_t f_{\omega t} dz + \frac{\rho_2}{m_0} \int_0^L \omega f_{\omega t} dz \\
 &+ \left(k_1 + \frac{k_2 \rho_1}{m_0} \right) u(L, t) u_t(L, t)
 \end{aligned}$$

$$+ \left(k_3 + \frac{k_4 \rho_2}{m_0} \right) \omega(L, t) \omega_1(L, t) \quad (11)$$

Chú ý rằng:

$$-Eiu_{zz}(L, t) + P_0 u_z(L, t) + \frac{EA}{2} u_z^2(L, t) + EA \omega_z(L, t) u_1(L, t) = U_u \quad (12)$$

$$EA \omega_z(L, t) + \frac{EA}{2} u_z^2(L, t) = U_\omega(L, t) \quad (13)$$

Thì luật điều khiển được lựa chọn như sau:

$$U_u = -k_1 u(L, t) - k_2 u_1(L, t), \quad (14)$$

$$U_\omega = -k_3 \omega(L, t) - k_4 \omega_1(L, t). \quad (15)$$

Trong đó k_i , với $i=1..4$ là các hằng số dương, chặt. Sử dụng (14), (15) thay vào (11) chứng minh được:

$$\dot{V} \leq -\frac{k_1 \rho_1}{m_0} u^2(L, t) - k_2 u_1^2(L, t) - \frac{k_3 \rho_2}{m_0} \omega^2(L, t)$$

$$- k_4 \omega_1^2(L, t) - \left(\Omega_{1D} - \rho_1 - \frac{\Omega_{1D} \rho_1}{\gamma_3 m_0} \right) \int_0^L u_i^2 dz$$

$$- \left(\Omega_{2D} - \rho_2 - \frac{\Omega_{2D} \rho_2}{\gamma_4 m_0} \right) \int_0^L \omega_i^2 dz$$

$$- \frac{\rho_1 EI}{m_0} \int_0^L u_{zz}^2 dz - \left(\frac{\rho_1 P_0}{m_0} - \frac{4L^2 \Omega_{1D} \rho_1 \gamma_1}{m_0} \right) \int_0^L u_z^2 dz$$

$$- \left(\frac{\rho_2 EA}{m_0} - \frac{4L^2 \Omega_{2D} \rho_2 \gamma_4}{m_0} \right) \int_0^L \omega_z^2 dz$$

$$- \frac{\rho_1 EA}{2m_0} \int_0^L u_z^2 dz - \frac{EA}{m_0} \left(\rho_1 + \frac{\rho_2}{2} \right) \int_0^L u_z^2 \omega dz$$

$$- \frac{\rho_1 \Omega_{1D}}{m_0} \int_0^L u \omega dz + \frac{\rho_1}{m_0} \int_0^L f_{ul} dz$$

$$- \frac{\rho_2 \Omega_{2D}}{m_0} \int_0^L \omega \omega dz + \int_0^L \omega f_{\omega L} dz$$

$$+ \int_0^L \omega_i f_{\omega i} dz + \frac{\rho_2}{m_0} \int_0^L \omega f_{\omega L} dz \quad (16)$$

Từ (16), các tham số được lựa chọn như sau:

$$\Omega_{1D} - \rho_1 - \frac{\Omega_{1D} \rho_1}{\gamma_1 m_0} = c_1, \quad \Omega_{2D} - \rho_2 - \frac{\Omega_{2D} \rho_2}{\gamma_4 m_0} = c_6, \quad (17)$$

$$\frac{\rho_1 P_0}{m_0} - \frac{4L^2 \Omega_{1D} \rho_1 \gamma_1}{m_0} = c_7, \quad \frac{\rho_2 P_0}{m_0} - \frac{4L^2 \Omega_{2D} \rho_2 \gamma_4}{m_0} = c_8,$$

Trong đó c_i , với $i=5..8$ là các hằng số dương chặt. Sử dụng (10) và (16), ta có:

$$\dot{V} \leq -\frac{k_1 \rho_1}{m_0} u^2(L, t) - k_2 u_1^2(L, t)$$

$$- \frac{k_3 \rho_2}{m_0} \omega^2(L, t) - k_4 \omega_1^2(L, t)$$

$$- cV + \frac{\rho_1}{m_0} \int_0^L u f_{ul} dz + \int_0^L u_i f_{ul} dz$$

$$+ \int_0^L \omega_i f_{\omega L} dz + \frac{\rho_2}{m_0} \int_0^L \omega f_{\omega L} dz \quad (18)$$

Trong đó:

$$c = \frac{\min \left\{ c_1, c_6, c_7, c_8, \frac{\rho_1 EI}{m_0}, \frac{\rho_2 EA}{2m_0}, \beta_1 \right\}}{\max \left\{ \frac{m_2}{2} + \frac{\rho_1}{\gamma_1} \frac{m_0}{2} + \frac{\rho_2}{\gamma_2} \frac{P_2}{2} + 4L^2 \gamma_1 \rho_1 \frac{EA}{2} + 4L^2 \gamma_2 \rho_2 \frac{EA}{2}, \frac{EA}{2}, \frac{EI}{2}, \beta_1 \right\}} \quad (19)$$

$$\beta_1 = \left\{ \frac{EA}{m_0} \left(\rho_1 + \frac{\rho_2}{2} \right), k_1 \frac{\rho_1}{m_0}, k_3 \frac{\rho_2}{m_0} \right\}, \quad (20)$$

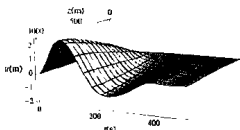
$$\beta_2 = \left\{ \frac{1}{2} \left(k_1 + \frac{k_2 \rho_1}{m_0} \right), \frac{1}{2} \left(k_3 + \frac{k_4 \rho_2}{m_0} \right) \right\}$$

KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

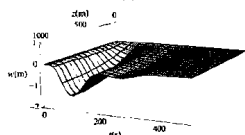
Để minh họa hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất trong phần trên, ở phần này ta tiến hành một số mô phỏng. Các tham số của ống hút dầu được cho trong Bảng 1.

Bảng 1: Tham số của ống hút dầu

Ký hiệu	Mô tả	Giá trị
L	Chiều dài	1.000 m
D	Đường kính	0,2 m
ρ	Khối lượng riêng	8.200 kg/m ³
E	Mô-đun Young	2 x 10 ⁸ kg/m ²
P ₀	Lực căng	1,1 x 10 ⁴ N
C _D	Hệ số lực kéo dịch chuyển ngang ngang	1,2 x 10 ⁴ N
C _M	Hệ số gia tốc dịch chuyển ngang	1,4 x 10 ⁴ N
C _L	Hệ số lực nâng	0,6 x 10 ⁴ N
Ω_{1D}	Hệ số suy giảm theo phương X	80 s/m ²
Ω_{2D}	Hệ số suy giảm theo phương Y	80 s/m ²
Ω_{3D}	Hệ số suy giảm theo phương Z	60 s/m ²

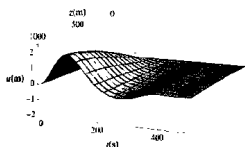


(a)

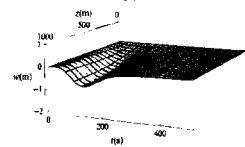


(b)

Hình 2. Chuyển động của ống dẫn dầu khi chưa có điều khiển: (a) $u(z,t)$ và (b) $w(z,t)$

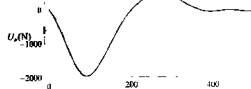


(a)

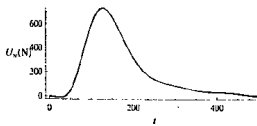


(b)

Hình 3. Chuyển động của ống dẫn dầu khi chưa có điều khiển: (a) $u(z,t)$ và (b) $w(z,t)$



(a)



(b)

Hình 4. Lực tác động: (a) $u(z,t)$ và (b) $w(z,t)$

KẾT LUẬN

Phương trình động học của hệ thống ống dẫn dầu thể hiện tính phi tuyến cũng như quan hệ xen kẽ của hai phương chuyển động được xây dựng nhờ áp dụng linh hoạt Định lý Hamilton mở rộng. Dựa vào phương trình chuyển động của ống dẫn dầu, các tác giả đã thiết kế bộ điều khiển để làm giảm chuyển động dựa trên phương pháp Lyapunov trực tiếp. Khả năng đưa ống dẫn dầu về trạng thái cân bằng của bộ điều khiển được minh chứng qua mô phỏng. Đóng góp của bài báo được thể hiện thông qua việc đưa ra mô hình động học của hệ thống với các tác động xen kẽ cũng như việc thiết kế thành công bộ điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. J. M. Niedzwecki and P. Y. F. Liagre, (2003), "System identification of distributed-parameter marine riser model" *Ocean Engineering*, vol 30, pp. 1387-1415.
2. *Principles and Techniques of Vibrations*. Eaglewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall, (1997).
3. Cavallo and G. De Maria, (1999), "Robust active control of flexible systems with second order sliding." *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Proceeding's., pp. 162-166.
4. Mei and B. R. Mace, (2002), "Reduction of control spillover in active vibration control of distributed structures using multi-optimal schemes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 251, no. 1, pp. 184-192.
5. M. Demetriou and F. Fahroo, (2006), "Model reference adaptive control of structurally perturbed second-order distributed parameter systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 16, no. 16, pp. 773-799.
6. S. S. Ge, T. H. Lee, and G. Zhu, (1994), "A nonlinear feedback controller for a single-link

- flexible manipulator based on a finite element model," *Journal of Robotic Systems*, vol. 13, no. 5, p. 454.
7. Amrmaou and P. Christofides, (2000), "Wave suppression by nonlinear finite-dimensional control," *Chemical Engineering Science*, vol. 55, no. 14, pp. 2627-2640.
8. M. J. Balas, (1978), "Active control of flexible systems," *Journal of Optimization Theory and Application*, vol. 25, no. 3, pp. 415-436.
9. M. Krstic, A. A. Siranosian, and A. Smyshlyaev, (2006), "Backstepping boundary controllers and observers for the slender timoshenko beam: Part i-design," *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, pp. 2412-2417.
10. M. Krstic, A. A. Siranosian, A. Smyshlyaev, and M. Bement, (2006), "Backstepping boundary controllers and observers for the slender timoshenko beam: Part ii-stability and simulations," *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3938-3943.
11. M. Krstic and A. Smyshlyaev, (2008), "Backstepping boundary control for first-order hyperbolic PDEs and application to systems with actuator and sensor delays," *System and Control Letters*, vol. 57, no. 19, pp. 750-758.
12. M. Krstic and A. Smyshlyaev, (2008), "Adaptive control of pdes," *Annual Reviews in Control*, vol. 32, no. 2, pp. 149-160.
13. M. Krstic and A. Smyshlyaev, (2008), "Adaptive boundary control for unstable parabolic PDEs, part i: Lyapunov design," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 7, pp. 1575-2008.
14. S. M. Shahruz and C. A. Narasimha, (1997), "Suppression of vibration in stretched strings by the boundary control," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 204, pp. 835-840.
15. S. M. Shahruz and D. A. Kurmaj, (1997), "Vibration suppression of a nonlinear axially moving string by boundary control," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 201, pp. 145-152.
16. M. P. Fard and S. I. Sagatun, (2001), "Exponential stabilization of a transversely vibrating beam via boundary control," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 240, pp. 613-622.
17. M. S. D. Queiroz, M. Dawson, S. Nagarkatti, and F. Zhang, (2000), *Lyapunov-Based Control of Mechanical Systems*. Boston. Birkhauser.
18. K. D. Do and J. Pan, (2008), "Boundary control of transverse motion of marine risers with actuator dynamics," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 318, pp. 768-791.
19. B. V. E. How, S. S. Ge, and Y. S. Choo, (2009), "Active control of flexible marine risers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 320, pp. 758-776.
20. S.S. Ge, W. He, B.V.E. How, and Y.S. Choo, (2010), "Boundary control of a coupled nonlinear flexible marine riser," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, pp. 1080-1091.
21. T. L. Nguyen, K. D. Do, and J. Pan, (2012), "Boundary control of marine risers with bending couplings," *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1615-1620.
22. W. He, S.S. Ge, B.V. How, and Y.S. Choo, (2013), *Dynamics and Control of Mechanical Systems in Offshore Engineering*. London, UK: Springer.
23. W. He, S. Zhang, and S. S. Ge, (2013), "Boundary control of a flexible riser with application to marine installation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 5802-5810.
24. W. He, S.S. Ge, B.V.E. How, Y.S. Cho, and K.-S. Hong, (2011), "Robust adaptive boundary control of a flexible marine riser with vessel dynamics," *Automatica*, vol. 47, no. 4, pp. 722-732.
25. K. D. Do and J. Pan, (2009), "Boundary control of three-dimensional inextensible marine risers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 327, pp. 299-321.

SUMMARY

NONLINEAR CONTROL OF A MARINE RISER WITH TRANSVERSE AND AXIAL COUPLINGS

Nguyen Anh Duc^{*}
College of Information and Communication Technology - TNU

The paper present a controller placed at the top end of a marine riser to achieve global stability under environmental disturbances. Based on a energy approach, the equations of motion of the system with motion couplings are derived. Lyapunov's direct method is employed to design the controller. The stability of the closed loop is verified via numerical simulation scenarios.

Keywords: Marine riser, boundary control, nonlinear systems, couplings.

^{*} Tel: 0912 282848, Email: naduc@ictu.edu.com