

BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM



PHẠM VĂN TRIỆU

**NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN PHI TUYẾN BỀN VỮNG
CHO CÁN TRÚC CONTAINER ĐẶT TRÊN PHAO NỔI**

Tóm tắt luận án tiến sĩ kỹ thuật

NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ ĐỘNG LỰC; MÃ SỐ 9520116

CHUYÊN NGÀNH: KHAI THÁC, BẢO TRÌ TÀU THỦY

Công trình được hoàn thành tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS. TS. Lê Anh Tuấn
2. TS. Hoàng Mạnh Cường

Phản biện 1: GS. TS. Lê Anh Tuấn

Phản biện 2: GS. TS. Chu Văn Đạt

Phản biện 3: PGS. TS. Trần Thị Thu Hương

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Trường họp tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam vào hồi.....giờ.....phút ngày....tháng....năm....2020

Có thể tìm hiểu luận án tại Thư viện Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Vận chuyển hàng hóa bằng đường biển là phương thức vận chuyển phổ biến và có giá thành rẻ nhất trong các phương thức vận chuyển hiện nay. Chính vì vậy, lượng hàng hóa vận chuyển theo đường biển ngày càng tăng, trong đó vận chuyển hàng hóa bằng container cũng tăng đều theo hàng năm. Để đáp ứng được mức tăng này, ngày càng nhiều các tàu container cỡ lớn sức chở lên đến 20.000 TEU tham gia vào quá trình vận chuyển container trên toàn cầu. Sự tăng trưởng này đòi hỏi phải cải thiện và tái cấu trúc cơ sở hạ tầng các cảng biển để phục vụ xếp dỡ container. Ngoài ra, viện Khoa học và Công nghệ tiên tiến Hàn Quốc (KAIST) đã đề xuất giải pháp vận chuyển container theo đường biển thế hệ mới được gọi là cảng di động (Mobile Harbor). Mục đích của mô hình này là thiết kế và phát triển một hệ thống vận chuyển container thế hệ mới có thể tiếp cận được các tàu container cỡ lớn và thực hiện quá trình xếp dỡ hàng hóa sau đó đưa các container này đến một cảng bất kỳ mà không phụ thuộc vào độ sâu và độ rộng của cảng.

Mô hình cảng di động là tổ hợp các thiết bị cấu thành và quan trọng nhất là cần trục container đặt trên tàu đóng vai trò chuyển tải hàng hóa từ tàu lớn (tàu mẹ) sang tàu nhỏ (tàu con) để đưa container vào sâu trong cảng một cách nhanh nhất và an toàn nhất. Khi làm việc ngoài biển, cảng di động chịu tác động của các yếu tố bất lợi như kích động sóng biển tác động lên thân tàu và tải trọng gió tác động lên cần trục trong quá trình làm việc, hệ quả là hệ tàu-cần trục sẽ dao động từ đó ảnh hưởng đến hiệu quả làm hàng. Trong thiết kế, chế tạo cần trục một bước rất quan trọng là thiết kế hệ thống điều khiển. Đối với bài toán thiết kế hệ thống điều khiển cho cần trục container gắn trên tàu, bộ điều khiển phải đáp ứng được yêu cầu ngay cả khi tàu chịu cấp sóng lớn nhất cho phép xếp dỡ hàng hóa ngoài biển. Hệ thống điều khiển thực hiện đồng thời các chức năng: Điều khiển dẫn động xe con và trống tời tới vị trí mong muốn; giữ góc lắc hàng nhỏ và góp phần ổn định thân tàu trong quá trình làm việc.

Do yêu cầu về thời gian làm hàng đòi hỏi cần trục phải làm việc nhanh hơn. Chuyển động nhanh của cần trục có thể gây ra lắc hàng quá mức, điều đó có thể ảnh hưởng đến độ chính xác, chất lượng, hiệu quả và sự an toàn trong quá trình làm việc của cần trục. Do đó, cần phải có hệ thống điều khiển tốt để đáp ứng được các yêu cầu về thời gian cũng như an toàn trong quá trình hoạt động của cần trục. Đề tài “**Nghiên cứu hệ thống điều khiển phi tuyến bền vững cho cần trục container đặt trên phao nổi**” là nghiên cứu bước đầu để tiến tới tự thiết kế, chế tạo cần trục đặt trên phao nổi ở nước ta.

2. Mục đích nghiên cứu

Xây dựng các thuật toán điều khiển mới áp dụng cho hệ cần trục-tàu. Kết quả nghiên cứu của đề tài sẽ góp phần cải tiến và áp dụng vào thiết kế cần trục container nói chung cũng như cần trục container gắn trên tàu, từ đó nâng cao hiệu quả khai thác cũng như an toàn trong quá trình vận hành cần trục container.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- **Đối tượng nghiên cứu:** Đối tượng nghiên cứu là cần trục container gắn trên mẫu tàu MH-A1-250 do Viện KAIST đề xuất.

- **Phạm vi nghiên cứu:** Nghiên cứu xây dựng hệ thống điều khiển phi tuyến bền vững cho cần trục container đặt trên phao nổi dựa trên mô hình động lực học hai chiều sáu bậc tự do.

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu kết hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm, cụ thể như sau:

- **Nghiên cứu lý thuyết:** Thiết kế các thuật toán điều khiển dựa trên mô hình toán của đối tượng thực. Ứng dụng ngôn ngữ lập trình MATLAB®/Simulink® để mô phỏng số các đáp ứng của thuật toán điều khiển.

- **Nghiên cứu thực nghiệm:** Kiểm chứng các thuật toán điều khiển trên mô hình thực nghiệm trong phòng thí nghiệm.

5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn

- **Ý nghĩa khoa học:** Kết quả của luận án sẽ làm cơ sở cho việc áp dụng các thuật toán điều khiển phi tuyến cho cần trục container đặt trên phao nổi chịu kích động của sóng biển. Ngoài ra, nó là cơ sở cho các nghiên cứu về động lực học và điều khiển cần trục trong tương lai.

- **Ý nghĩa thực tiễn:** Kết quả của luận án sẽ góp phần nâng cao chất lượng hệ thống điều khiển cần trục container đặt trên phao nổi chịu kích động của sóng biển.

6. Những đóng góp mới của luận án

Đề tài đã xây dựng thành công ba thuật toán điều khiển cho cần trục container đặt trên phao nổi chịu kích động của sóng biển là thuật toán điều khiển trượt bậc hai (SOSMC), thuật toán điều khiển trượt bậc hai tích hợp mạng nơ ron (NN-SOSMC) và thuật toán điều khiển trượt bậc hai tích hợp bộ quan sát (OB-SOSMC). Thuật toán điều khiển SOSMC bền vững với các thông số bất định và nhiễu ngoài giới hạn. Trong khi đó, thuật toán điều khiển NN-SOSMC đảm bảo tính thích nghi bền vững khi không cần biết thông tin mô hình động lực học bao gồm cả thông số hệ thống. Bộ quan sát trạng thái được xây dựng để ước lượng vận tốc dịch chuyển của các cơ cấu góp phần giảm giá thành chế tạo hệ thống khi không phải lắp đặt nhiều cảm biến.

7. Kết cấu của luận án

Luận án gồm 115 trang A4 (không kể phụ lục), thứ tự gồm các phần sau: Mở đầu; nội dung chính (được chia thành bốn chương); kết luận; hướng nghiên cứu tiếp theo; danh mục các công trình khoa học công bố kết quả nghiên cứu của đề tài luận án (06 công bố quốc tế, 05 công bố trong nước, 01 đề tài nghiên cứu khoa học cấp bộ); danh mục tài liệu tham khảo (11 tài liệu tham khảo tiếng Việt, 121 tài liệu tham khảo tiếng Anh, 10 tham khảo từ các website) và phụ lục (06 phụ lục).

CHƯƠNG I. TỔNG QUAN

1.1. Đặt vấn đề

Cảng biển là nơi luân chuyển hàng hóa giữa các khu vực khác nhau trên thế giới và là mắt xích quan trọng nhất trong vận chuyển hàng hóa bằng đường biển. Tuy nhiên, một thách thức rất lớn đối với các cảng biển là khả năng tiếp nhận những tàu container cỡ lớn khi năng lực của các cảng biển còn hạn chế, đặc biệt là luồng vào cảng nông và hẹp. Đứng trước cơ hội và thách thức này, các cảng biển phải có những thay đổi về cơ sở hạ tầng để đáp ứng được các yêu cầu khai thác. Tuy nhiên, trên thế giới, một số cảng biển đã đạt đến giới hạn và không cho phép mở rộng, một số khu vực tắc nghẽn, một số khu vực khác hạ tầng chưa phát triển dẫn đến thách thức cho việc thay đổi cơ sở hạ tầng cảng (Hình 1.2).

Việt Nam là quốc gia có đường bờ biển dài, có nhiều lợi thế trong việc phát triển cảng biển. Tuy nhiên, các cảng biển ở Việt Nam lại phân tán, khả năng tiếp nhận tàu đối với các cảng biển còn hạn chế. Theo thống kê chỉ khoảng 1% số cảng ở Việt Nam có khả năng tiếp nhận tàu có trọng tải trên 50.000 DWT. Điều đó ảnh hưởng rất lớn đến khả năng thu hút hàng hóa thông qua các cảng biển Việt Nam. Nguyên nhân chính dẫn đến điều đó là các cảng lớn của Việt Nam có luồng nông và hẹp.

Từ những phân tích ở trên, có thể thấy các cảng biển cần đề xuất các phương án để nâng cao năng lực xếp dỡ và có thể tiếp nhận những tàu container cỡ lớn.



Hình 1.2. Thực trạng các cảng trên thế giới [140]¹

Các phương án trung chuyển hàng hóa ngoài khơi được đưa ra, gồm có: sử dụng cảng nổi; xây dựng cảng trung chuyển ngoài khơi và sử dụng mô hình cảng di động. Trong ba phương án trên, phương án sử dụng mô hình cảng di động (Hình 1.7) đang được quan tâm và phát triển như một phương thức vận chuyển mới trong thế kỷ XXI. Viện KAIST của Hàn Quốc đã đề xuất ba mẫu tàu đóng vai trò như cảng di động tham gia chuyển tải tại các khu vực tàu container cỡ lớn có thể tiếp cận (Hình 1.8). Sau đó, container sẽ được các tàu này đưa vào sâu trong cảng và thực hiện xếp dỡ tại các bến cảng. Có thể thấy, với độ sâu của các cảng ở Việt Nam và khả năng đáp ứng về mặt kinh tế, mẫu tàu MH-A1-250 (có sức chở tối đa 252 TEU, độ sâu luồng yêu cầu là 5,3 m) rất phù hợp trong việc phát triển phương thức chuyển tải mới tại các cảng biển ở nước ta trong giai đoạn hiện nay. Do đó, đề tài sẽ tập trung vào nghiên cứu xây dựng hệ thống điều khiển cho đối tượng này.



Hình 1.7. Mô hình cảng di động [140]



Hình 1.8. Ba mẫu tàu do Viện KAIST đề xuất [141]

¹ Thứ tự trích dẫn và thứ tự hình vẽ tuân theo thứ tự trong bản toàn văn luận án

1.2. Tình hình nghiên cứu

Về động lực học: Các nghiên cứu về động lực học cần trục tập trung vào cả đối tượng là cần trục đặt trên nền cứng [15, 26, 38, 65, 67, 76, 77, 93] và cần trục đặt trên nền đàn hồi [70, 120, 123]. Các nghiên cứu này chưa đề cập đầy đủ đến các yếu tố như đàn hồi của cáp nâng, kích động của sóng biển và tải trọng gió tác động lên đối tượng điều khiển.

Về điều khiển: Có rất nhiều thuật toán điều khiển được sử dụng trong nghiên cứu điều khiển cần trục, mỗi thuật toán điều khiển đều có những ưu nhược điểm khác nhau, ở đây có thể kể đến các thuật toán: điều khiển tuyến tính (Linear Control), điều khiển phi tuyến (Non-linear Control), điều khiển tối ưu (Optimal Control), điều khiển bền vững (Robust Control), điều khiển thích nghi (Adaptive Control), điều khiển hiện đại/điều khiển thông minh (Modern Control/Intelligent Control).

- *Điều khiển tuyến tính:* Đa phần các nghiên cứu về điều khiển cần trục sử dụng kết hợp giữa thuật toán điều khiển tuyến tính (PID, PD) với sự hỗ trợ của các thuật toán điều khiển khác để điều khiển vị trí và sự lắc hàng [47, 111, 130]. Một bộ điều khiển tuyến tính khác là bộ điều khiển phản hồi trạng thái (State Feedback Controller) đã được sử dụng cho điều khiển cần trục kiểu cần để điều khiển góc lắc hàng khi cần chuyển động theo phương ngang và phương thẳng đứng [52, 90, 122]. Tuy nhiên, việc thiết kế bộ điều khiển tuyến tính cho hệ cần trục có thể không chính xác với mô hình thực. Các yếu tố phi tuyến như gió, sóng biển, sự thay đổi chiều dài cáp nâng và ma sát không được kể đến.

- *Điều khiển phi tuyến:* Sử dụng kỹ thuật phản hồi tuyến tính hóa (Feedback Linearization) [57, 66, 70, 92] và phi tuyến dựa trên nền tảng Lyapunov [39, 46, 54, 78], với các thuật toán điều khiển này, bộ điều khiển phải biết chính xác mô hình toán của đối tượng thực. Mặt khác, các thuật toán này không bền vững với sự thay đổi của các tham số điều khiển, nếu nhiễu và một số tham số hệ thống thay đổi sẽ làm cho hệ thống điều khiển mất ổn định.

- *Điều khiển tối ưu:* Thuật toán điều khiển tối ưu không tập trung cải thiện chất lượng các đáp ứng (thời gian tăng, lượng quá điều chỉnh,...) mà nó tập trung vào một số mục tiêu cụ thể như tối ưu về năng lượng, thời gian... [37, 73].

- *Điều khiển bền vững:* Thuật toán điều khiển bền vững được biết đến với khả năng ổn định với sự thay đổi của nhiễu và thông số hệ thống. Nhiều thuật toán điều khiển bền vững được áp dụng cho cả hệ phi tuyến và hệ tuyến tính. Thuật toán điều khiển SMC dùng cho cả hệ phi tuyến và hệ tuyến tính. Phương pháp điều khiển áp dụng với bộ điều khiển SMC phù hợp để sử dụng cho hệ thống cần trục vì nó làm việc hiệu quả và chính xác trong các điều kiện làm việc khác nhau cần trục [71]. Có một vài công bố về điều khiển cần trục sử dụng thuật toán SMC [23, 75, 99]. Như vậy, với thuật toán điều khiển bền vững, hệ thống điều khiển không cần mô hình toán quá chính xác, nó bền vững với cả nhiễu ngoài (sóng, gió...) và nhiễu trong (cảm biến, nội tại bộ điều khiển...).

- *Điều khiển thích nghi:* Khả năng thích nghi với sự thay đổi của các thông số hệ thống và nhiễu ngoài tác động đã được các nhà nghiên cứu phát triển bằng việc sử dụng phương pháp điều khiển thích nghi trên hệ thống cần trục [33, 42, 88, 113-115, 117, 129], và trong [112] cho hệ thống cần trục tháp. Bộ điều khiển thích nghi có khả năng ước lượng các tham số không chắc chắn dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Do đó, với ưu điểm này, các nhà nghiên cứu đã thiết kế các thuật toán điều khiển dựa trên mô hình phi tuyến đại diện cho các hệ thống phi tuyến [88]. Điều khiển hệ cần trục hút dẫn động với tham số thay đổi đã được đề xuất trong nghiên cứu [114]. Tính thích nghi của hệ thống ngay cả khi không biết chắc chắn các thông số hệ thống cũng như khả năng dẫn động đến vị trí chính xác và giảm góc lắc hàng.

- **Điều khiển hiện đại:** Hai thuật toán điều khiển hiện đại được áp dụng rất hiệu quả trong các lĩnh vực điều khiển gồm thuật toán điều khiển mạng nơ ron và thuật toán điều khiển logic mờ. Việc sử dụng mạng nơ ron có ý nghĩa như là cách tiếp cận thông minh để đối phó với các vấn đề của mô hình toán [28, 38, 44, 97]. Bộ điều khiển logic mờ có khả năng thích nghi mạnh mẽ và không bắt buộc phải có mô hình chính xác đối tượng điều khiển [16, 89, 95, 103, 104, 119].

Về thực nghiệm: Thực tế cho thấy, trên thế giới đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về động lực học và điều khiển cần trục bao gồm mô phỏng và thực nghiệm đã được công bố. Các nghiên cứu này đều thử nghiệm trên mô hình trong phòng thí nghiệm để kiểm chứng thuật toán điều khiển đề xuất trước khi áp dụng nó vào thực tế [18, 76, 79, 103, 110, 125]. Các nghiên cứu này thường sử dụng mô hình cần trục 3D do hãng INTECO chế tạo. Tuy nhiên, với bài toán điều khiển cần trục đặt trên phao nổi thì mô hình này không thể đáp ứng được. Do đó, cần xây dựng mô hình thí nghiệm sát với yêu cầu nghiên cứu đặt ra.

1.3. Hướng nghiên cứu

Với các phân tích ở trên, đề tài sẽ tập trung vào nghiên cứu điều khiển cần trục container đặt trên tàu. Với đối tượng này, chỉ một vài nghiên cứu đề cập đến [24, 34, 53, 54, 85, 87, 108, 109, 120]. Các nghiên cứu này thường đơn giản mô hình toán để thiết kế bài toán điều khiển. Từ đó, đề tài sẽ đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo để giải quyết các vấn đề còn tồn tại và có những cải tiến sau đây:

Về động lực học: Kể từ nghiên cứu thống kê về động lực học cần trục [13], các công trình đã nghiên cứu trước đó đa số tập trung vào nghiên cứu động lực học cần trục đặt trên nền cứng. Sau đó, các nghiên cứu về động lực học cần trục hầu như không có cải tiến mới về mô hình. Việc cải tiến mô hình sẽ được đề cập đến trong đề tài này bằng việc sử dụng mô hình cần trục đặt trên phao nổi có kể đến đàn hồi và kích động của sóng biển, co giãn của cáp nâng, tác động của gió. Mô hình này sát với thực tế, đã kể đến một số yếu tố mà các công trình nghiên cứu trước đây bỏ qua khi xây dựng mô hình đối tượng điều khiển.

Về điều khiển: Dựa trên mô hình toán đã xây dựng, đề tài sẽ cải tiến và thiết kế ba thuật toán điều khiển phi tuyến bền vững cho đối tượng điều khiển là cần trục container đặt trên phao nổi chịu kích động của sóng biển. Thuật toán SOSMC đảm bảo tính bền vững của bộ điều khiển khi các thông số mô hình và thông số hệ thống thay đổi. Trong khi đó, thuật toán điều khiển NN-SOSMC đảm bảo được cả yếu tố bền vững và thích nghi. Tính thích nghi của thuật toán điều khiển NN-SOSMC được thể hiện ở việc nó có thể tự ước lượng thông số mô hình và cả mô hình toán của đối tượng điều khiển. Thuật toán điều khiển OB-SOSMC góp phần giảm giá thành chế tạo hệ thống điều khiển bằng việc sử dụng bộ quan sát thay cho các cảm biến đo vận tốc của các cơ cấu.

Về thực nghiệm: Mô hình thực nghiệm được xây dựng là mô hình cải tiến so với mô hình do hãng INTECO chế tạo. Mô hình được xây dựng về cơ bản có đầy đủ các đặc điểm của mô hình cần trục do hãng INTECO sản xuất. Tuy nhiên, mô hình này sẽ có những cải tiến sau:

(i) Thiết kế một đế kích động sáu bậc tự do để tiến hành giả lập sóng biển kích động lên cần trục 3D;

(ii) Sử dụng biến tần để điều khiển tốc độ động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha theo hai phương thay cho việc sử dụng hoàn toàn động cơ điện một chiều.

1.4. Kết luận chương 1

Với các nội dung trình bày, chương này đã giải quyết được các vấn đề sau:

Phân tích được nhu cầu vận chuyển hàng hóa bằng đường biển, nêu được thực trạng cảng biển trên thế giới và Việt Nam, từ đó chỉ ra các vấn đề tồn tại khi khai thác cảng biển, đặc biệt là khả năng tiếp nhận tàu container cỡ lớn.

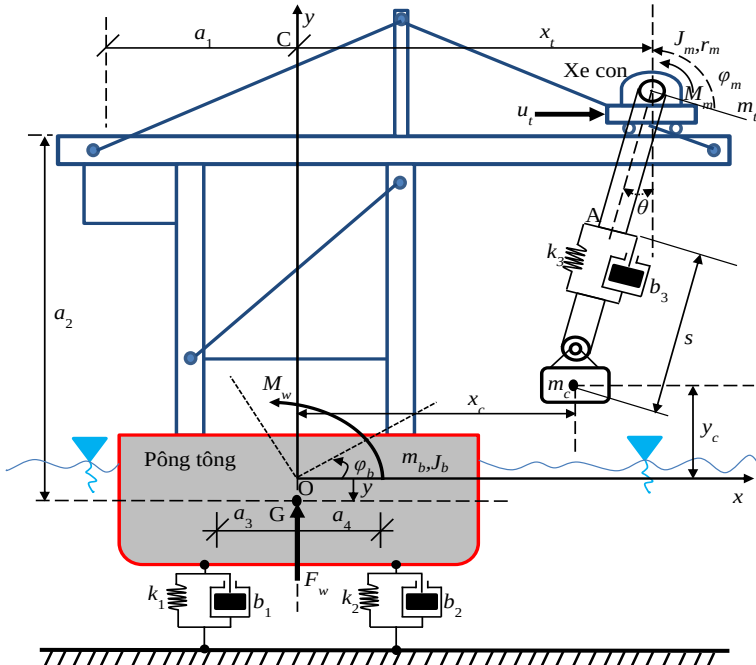
Phân tích được các phương án được sử dụng để chuyển tải khi tàu container cỡ lớn không thể cập cảng được. Từ đó chỉ ra phương án khả thi nhất là sử dụng mô hình cảng di động (Mobile Harbor) do Viện KAIST của Hàn Quốc đề xuất trong việc chuyển tải container.

Phân tích được các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến động lực học và điều khiển cần trục. Từ đó đề xuất hướng nghiên cứu cho đề tài với việc xây dựng hệ thống điều khiển phi tuyến bền vững cho cần trục container đặt trên phao nổi chịu kích động của sóng biển, đàn hồi cáp nâng, thay đổi tải trọng gió dựa trên cải tiến về mô hình đối tượng điều khiển, thuật toán điều khiển và phương thức thực nghiệm.

CHƯƠNG II. ĐỘNG LỰC HỌC CẦN TRỤC CONTAINER ĐẶT TRÊN PHAO NỔI

2.1. Xây dựng mô hình dao động

Một số giả thiết khi xây dựng mô hình: Chuyển động cần trục được thực hiện trong không gian hai chiều (2D); Đàn nhót của nước biển được quy về hai đệm đàn hồi có độ cứng và hệ số cản lần lượt là (k_1, b_1) và (k_2, b_2) ; Tàu và cần trục được coi là một vật, khối lượng cần trục được quy đổi về khối lượng tàu. Do khối lượng tàu lớn, trọng tâm của hệ được quy đổi về trọng tâm tàu và nằm xung quanh mặt phẳng sườn giữa của tàu; Bỏ qua khối lượng của cáp nâng, đàn hồi của cáp nâng là tuyến tính; Góc lắc cáp nâng được giới hạn trong khoảng $(-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$, góc lắc tàu được giới hạn trong khoảng $(-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_b \leq \frac{\pi}{2})$; Ma sát trên đường chạy của xe con, ma sát khi quay tời là tuyến tính; Bỏ qua khe hở lắp ráp, khe hở động cơ.



Hình 2.2. Mô hình vật lý cần trục container đặt trên phao nổi

Mô hình dao động cần trục container đặt trên phao nổi, tàu có khối lượng và mô men $(m_b; J_b)$ đặt trên nền đàn hồi nước biển với hệ số đàn hồi k_1 và k_2 . Chọn hệ quy chiếu Oxy là hệ quy chiếu tuyệt đối, trọng tâm tàu có tọa độ là y nghiêng một góc φ_b . Cần trục được gắn trên tàu với xe con có khối lượng m_t được gắn trống tời có bán kính r_m và mô men J_m , cáp nâng có chiều dài $l(t)$ được gắn vào trống tời bị thay đổi chiều dài khi trống tời quay. Cáp nâng có giả thiết là đàn hồi với hệ số đàn hồi k_3 , container có khối lượng m_c . Khi hoạt động, cáp nâng lắc với góc θ . Như vậy, hệ trên là hệ 6 bậc tự do, gồm có: dịch chuyển của xe con x_t , góc quay tời φ_m , góc lắc cáp nâng θ , độ dãn cáp nâng s , dịch chuyển trọng tâm tàu theo phương thẳng đứng y và góc lắc tàu φ_b , (x_{mt}, y_{mt}) là tọa độ suy rộng ứng với xe con, (x_c, y_c) là tọa độ suy rộng với container.

2.2. Thiết lập phương trình vi phân chuyển động

Từ mô hình dao động cần trục container đặt trên phao nổi, dựa trên phương trình Lagrange loại hai, ta xây dựng được hệ phương trình vi phân chuyển động gồm sáu phương trình vi phân cấp hai, hệ phương trình vi phân cấp hai được viết gọn dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{U} + \mathbf{W} \quad (2.15)^2$$

Trong đó,

$\mathbf{U} = [u_t \quad M_m \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ là véc tơ lực dẫn động, gồm lực kéo xe con để thay đổi vị trí xe con và mô men quay tời để thay đổi chiều dài cáp nâng; $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{6 \times 6}$ là ma trận quán tính khối lượng; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{6 \times 6}$ là ma trận quán tính ly tâm và Coriolis; $\mathbf{G}(\mathbf{q}) = [g_1 \quad g_2 \quad g_3 \quad g_4 \quad g_5 \quad g_6]^T$ là véc tơ lực trọng trường; $\mathbf{W} = [0 \quad 0 \quad f_w \quad 0 \quad F_w \quad M_w]^T$ là véc tơ nhiễu ngoài tác động lên cần trục, gồm kích động sóng biển và tải trọng gió.

2.3. Mô hình không gian trạng thái

Để mô phỏng số, phương trình chuyển động của hệ được chuyển thành mô hình không gian trạng thái với 12 biến trạng thái, trong đó

$$x_1 = \dot{x}_t, x_2 = x_t, x_3 = \dot{\varphi}_m, x_4 = \varphi_m, x_5 = \dot{\theta}, x_6 = \theta, x_7 = \dot{s}, x_8 = s, x_9 = \dot{y}, x_{10} = y, x_{11} = \dot{\varphi}_b, x_{12} = \varphi_b.$$

2.4. Phương pháp số giải hệ phương trình vi phân phi tuyến

Có nhiều phương pháp tính toán số để giải các hệ phương trình vi phân phi tuyến, có thể kể đến: phương pháp Runge-Kutta [29], phương pháp Runge-Kutta-Nyström [36], phương pháp Adams [72], phương pháp dự báo hiệu chỉnh (predictor-corrector) [81], phương pháp Newmark [31]. Trong đó, phương pháp Newmark là phương pháp tích phân một bước. Véc tơ trạng thái tại thời điểm $t_{n+1} = t_n + h$ được xác định từ véc tơ trạng thái tại thời điểm t_n qua khai triển Taylor các hàm dịch chuyển và vận tốc. Phương pháp Newmark sẽ được lựa chọn để giải trực tiếp hệ phương trình vi phân chuyển động (2.15).

2.5. Các kết quả tính toán

Để tính toán động lực học cần trục container đặt trên phao nổi mô hình Hình 2.2, đầu tiên ta tính toán lực và mô men đưa vào để dịch chuyển các cơ cấu và được mô tả trong công thức (2.60) & (2.61) trong quyền toàn văn luận án. Các thông số tính toán được thể hiện trong Bảng 2.1.

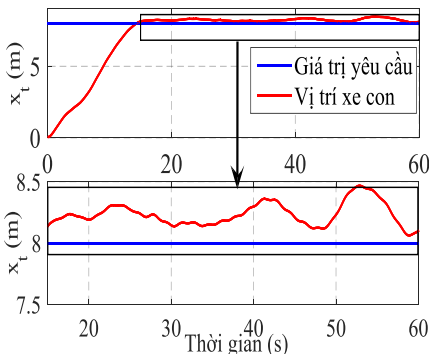
² Số thứ tự công thức tuân theo số thứ tự trong bản toàn văn luận án

Bảng 2.1. Thông số tính toán động lực học

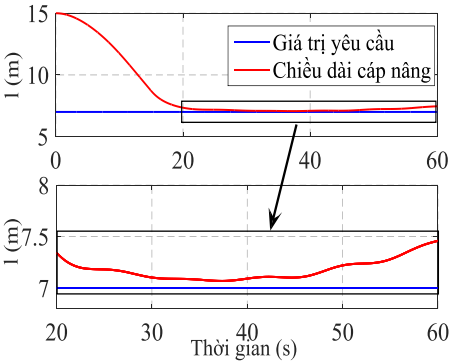
Thông số hệ thống	Kích động sóng biển
$a_2 = 32 \text{ m}, a_3 = 12.5 \text{ m}, a_4 = 12.5 \text{ m},$ $r_m = 0.325 \text{ m}, l_0 = 15 \text{ m}, m_b = 4500000 \text{ kg},$ $m_t = 5900 \text{ kg}, m_c = 24000 \text{ kg},$ $J_b = 571875000 \text{ kgm}^2, J_m = 41700 \text{ kgm}^2,$ $k_1 = 1250000 \text{ N/m}, k_2 = 1250000 \text{ N/m},$ $k_3 = 12000 \text{ N/m}, b_1 = 200 \text{ Ns/m},$ $b_2 = 200 \text{ Ns/m}, b_3 = 220 \text{ Ns/m}, b_t = 50 \text{ Ns/m},$ $g = 9.81 \text{ m/s}^2, b_m = 70 \text{ Ns/m}.$	$a_0 = c_0 = 0 \text{ N}, a_1 = b_1 = 3.10^5 \text{ N},$ $c_1 = d_1 = 6.10^5 \text{ Nm},$ $\omega_F = \omega_M = 0.35 \text{ rad/s}.$
	Tải trọng gió
	$\rho_a = 1.22 \text{ kg/m}^3, v_0 = 7,1 \text{ m/s}, C_w = 1.1,$ $K_r = 0.85, K_h = 1.15, K_{wd} = 0.9,$ $C_g = 1.05, A_c = 14,06 \text{ m}^2.$

Thông số hệ thống được lấy theo thiết kế mẫu tàu MH-A1-250 của Viện KAIST [141], thông số kích động sóng biển được lấy dựa trên phân tích dữ liệu sóng trên phần mềm mô phỏng Marine Systems Simulator (MSS) của nhóm nghiên cứu gồm Thor I. Fossen và Tristan Perez đến từ trường đại học Bách khoa Na Uy (Norwegian University of Science and Technology), Na Uy [139], thông số tải trọng gió được lấy theo tài liệu “Influence of wind on crane operation” [142]. Ngoài ra, mẫu tàu MH-A1-250 có sức chở tối đa 252 TEU thì các thông số động lực của tàu có thể tham khảo thông số mẫu tàu tương tự được trình bày trong tài liệu “*Đặc điểm thiết kế tàu container*”[1].

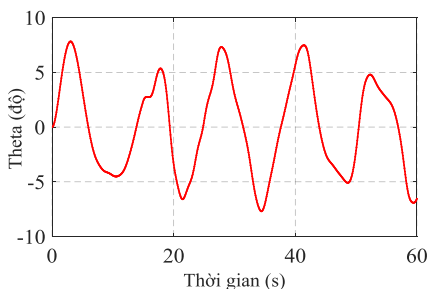
Với yêu cầu điều khiển đưa container đến vị trí yêu cầu, người điều khiển thông qua tay trang sẽ điều khiển dịch chuyển xe con và trống quay tời để container đến được vị trí yêu cầu. Vị trí yêu cầu sẽ là 8 m so với vị trí ban đầu đối với dịch chuyển xe con và chiều dài cáp nâng được nâng lên vị trí 7 m so với vị trí ban đầu cáp nâng có chiều dài 15 m. Xe con mất 15,44 giây để đạt đến trạng thái xác lập. Tuy nhiên, giá trị xác lập này không tiến đến giá trị yêu cầu và có dao động lớn. Có thể thấy, xe con dao động với nhiều tần số, giá trị biên độ dao động có xu hướng tăng lên và sai số xác lập có thời điểm lên đến 0,5 m (Hình 2.4). Sự tồn tại dao động và sai số xác lập lớn là do quá trình điều khiển xe con đến vị trí yêu cầu, người điều khiển thực hiện việc phanh đột ngột làm cho hàng dao động lớn, bên cạnh đó, do dao động của thân tàu dưới tác động của sóng biển và tải trọng gió sẽ làm cho hàng dao động liên tục. Điều này có thể thấy rõ đáp ứng góc lắc cáp nâng dao động với biên độ dao động lớn $\theta_{max} \approx 7,8^\circ$, biên độ dao động góc lắc cáp nâng được lặp lại ở các chu kỳ khác nhau và không có dấu hiệu tắt dần ngay cả khi xe con và trống tời xác lập vị trí mới (Hình 2.6).



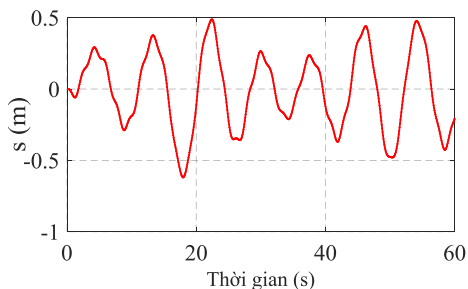
Hình 2.4. Dịch chuyển xe con (không điều khiển)



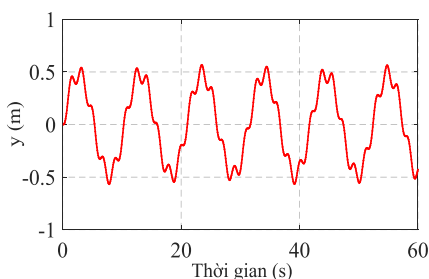
Hình 2.5. Chiều dài cáp nâng ((không điều khiển)



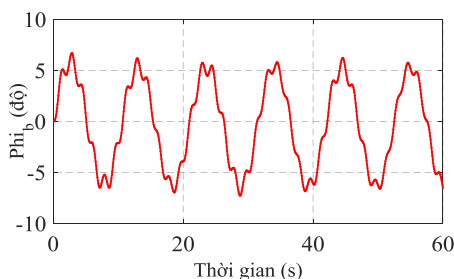
Hình 2.6. Góc lắc cấp nâng
(không có điều khiển)



Hình 2.7. Dao động container dọc theo cấp nâng
(không có điều khiển)



Hình 2.8. Dao động thẳng đứng thân tàu
(không điều khiển)



Hình 2.9. Dao động lắc ngang thân tàu
(không có điều khiển)

Chiều dài cấp nâng thay đổi và đạt đến giá trị xác lập sau khoảng 22 giây kể từ lúc người vận hành bắt đầu thực hiện việc điều khiển tay trang và cũng dao động xung quanh vị trí yêu cầu với sai số xác lập và biên độ dao động lớn. Điều này là do hai yếu tố chính tác động gồm dịch chuyển trọng tâm tàu theo phương thẳng đứng và đàn hồi của cấp nâng. Nếu không khống chế được các dao động này thì hàng có xu hướng hạ xuống thấp do lực kéo tác động lên cấp nâng thay đổi liên tục. Điều đó có thể thấy rõ kể từ giây thứ 40, vị trí xác lập ngày càng có xu hướng tăng dần giá trị của nó. Giá trị sai số xác lập này có thể thấy rõ với sai số lên đến 0,5 m tại giây thứ 60. Với sai số xác lập và dao động với biên độ lớn của container, cấp nâng và xe con sẽ dẫn đến việc không thể thực hiện xếp/dỡ hàng do hệ thống không thể dẫn động các cơ cấu đến vị trí yêu cầu một cách chính xác được.

Do tác động của sóng biển, quá trình lắc hàng không được khống chế sẽ dẫn đến việc chiều dài cấp thay đổi liên tục, sự thay đổi đó cùng với các thay đổi bất lợi khác trong quá trình làm hàng. Điều này sẽ làm cho việc tiếp cận đích đến của container trở nên khó khăn hơn và tốn nhiều thời gian điều chỉnh hơn cho một lần dịch chuyển container. Dao động lắc ngang thân tàu và dao động thẳng đứng thân tàu được biểu thị trên các Hình 2.8 & Hình 2.9. Dao động thân tàu chịu ảnh hưởng của việc làm hàng do dịch chuyển của các cơ cấu tạo ra dao động cường bức với biên độ nhỏ. Có thể thấy, các cơ cấu dịch chuyển vẫn dao động xung quanh vị trí của nó ở chế độ xác lập đồng thời góc lắc cấp nâng dao động với biên độ lớn. Điều này sẽ dẫn đến việc không thể thực hiện việc xếp/dỡ hàng do góc lắc cấp nâng lớn gây ra độ lệch vị trí hàng ở đích đến, hơn nữa nó có thể gây va đập với hàng hóa và thiết bị lân cận nếu như không kiểm soát được góc lắc cấp nâng dẫn đến tai nạn và hư hỏng trong quá trình làm hàng. Do vậy, cần trực container gắn trên tàu cần thiết phải được trang bị hệ thống điều khiển để tạo ra các đáp ứng tốt góp phần nâng cao hiệu suất làm hàng cũng như giảm được những tai nạn và hỏng hóc trong quá trình làm việc của cần trục.

2.6. Kết luận chương 2

Chương này đã thực hiện được các nội dung chính sau:

Xây dựng được mô hình động lực học cần trục container đặt trên phao nổi là mô hình phẳng, sáu bậc tự do, kể đến kích động của sóng biển, thay đổi tải trọng gió, đàn hồi của cáp nâng. Trên cơ sở đó, xây dựng được phương trình vi phân chuyển động của hệ dựa trên phương trình Lagrange loại hai. Hệ phương trình thu được gồm sáu phương trình vi phân phi tuyến cấp hai. Đây là cơ sở để xây dựng các thuật toán điều khiển;

Phân tích được các phương pháp tính toán số được sử dụng để giải trực tiếp phương trình vi phân cấp hai, từ đó lựa chọn phương pháp Newmark để giải hệ phương trình vi phân đã xây dựng;

Sử dụng phần mềm MATLAB® dựa trên phương pháp Newmark để mô phỏng số các đáp ứng động lực học cần trục container đặt trên phao nổi. Các kết quả tính toán chỉ ra các cơ cấu không được dẫn động chính xác, góc lắc container và dao động container dọc theo cáp nâng lớn. Do đó, cần trục container cần được trang bị hệ thống điều khiển với quy luật điều khiển tốt để đảm bảo quá trình làm việc của cần trục an toàn và hiệu quả.

CHƯƠNG III. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN

3.1. Đặc điểm đối tượng điều khiển

Đối tượng điều khiển là cần trục gắn trên tàu được mô hình hóa như Hình 2.2, đây là hệ hệt dẫn động với sáu tín hiệu cần điều khiển $\mathbf{q} = [x_t \ \varphi_m \ \theta \ s \ y \ \varphi_b]^T$ nhưng chỉ được dẫn động bởi hai tín hiệu điều khiển $\mathbf{U} = [u_t \ M_m \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. Đối tượng điều khiển là hệ hệt dẫn động nên việc điều khiển sẽ khó khăn hơn rất nhiều so với điều khiển hệ đủ cơ cấu chấp hành. Để thiết kế thuật toán điều khiển, hệ (2.15) sẽ được tác thành hai hệ con

$$\mathbf{M}_{11}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{G}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{M}_{22}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{G}_2(\mathbf{q}) = \mathbf{W}_2 \quad (3.2)$$

Trong đó, $\mathbf{M}_{11}(\mathbf{q}) \in R^{2 \times 2}$, $\mathbf{M}_{12}(\mathbf{q}) \in R^{2 \times 4}$, $\mathbf{M}_{21}(\mathbf{q}) \in R^{4 \times 2}$, $\mathbf{M}_{22}(\mathbf{q}) \in R^{4 \times 4}$ là các ma trận con của $\mathbf{M}(\mathbf{q})$. $\mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{2 \times 2}$, $\mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{2 \times 4}$, $\mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{4 \times 2}$, $\mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{4 \times 4}$ là các ma trận con của $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$. $\mathbf{G}_1(\mathbf{q}) \in R^2$ và $\mathbf{G}_2(\mathbf{q}) \in R^4$ là ma trận con của ma trận $\mathbf{G}(\mathbf{q})$. $\mathbf{W}_2 = [f_w \ 0 \ F_w \ M_w]^T$ là véc tơ nhiễu sóng và gió tác động lên hệ.

Các ma trận nói trên được sắp xếp như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11}(\mathbf{q}) & \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q}) & \mathbf{M}_{22}(\mathbf{q}) \end{bmatrix}, \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) & \mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) & \mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

và

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = [\mathbf{G}_1(\mathbf{q}) \ \mathbf{G}_2(\mathbf{q})]. \quad (3.4)$$

3.2. Điều khiển trượt bậc hai

Thuật toán điều khiển trượt bậc hai (SOSMC) được xây dựng để đưa $\mathbf{q}_a = [x_t \ \varphi_m]^T$ đến giá trị đặt $\mathbf{q}_{ad} = [x_d \ \varphi_{md}]^T$ và đưa $\mathbf{q}_u = [\theta \ s \ y \ \varphi_b]^T$ đến giá trị mong muốn $\mathbf{q}_{ud} = [\theta_d \ s_d \ y_d \ \varphi_{bd}]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. Thuật toán điều khiển SOSMC đảm bảo hệ thống bền vững, bất chấp hệ chịu tác động của nhiễu và sự thay đổi tham số. $\mathbf{M}_{22}(\mathbf{q})$ là ma trận xác định dương, do đó hệ con bị động (3.2) được biến đổi thành:

$$\ddot{\mathbf{q}}_u = \mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q}) \{ \mathbf{W}_2 - \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{G}_2(\mathbf{q}) \} \quad (3.5)$$

Thay phương trình (3.5) vào phương trình (3.1) ta được dạng đơn giản của hệ tương đương:

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{U}} \quad (3.6)$$

Trong đó các thành phần của hệ tương đương được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) &= \mathbf{M}_{11}(\mathbf{q}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{21}(\mathbf{q}) \\ \bar{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \bar{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) &= \mathbf{G}_1(\mathbf{q}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{G}_2(\mathbf{q}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

với tín hiệu vào tương đương $\bar{\mathbf{U}}$ là sự tương tác giữa tín hiệu điều khiển $\mathbf{U}_1$ và kích động sóng biển $\mathbf{W}_2$ được xác định bằng:

$$\bar{\mathbf{U}} = \mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{W} \quad (3.8)$$

Chú ý rằng, $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})$ là ma trận xác định dương. Xem $\mathbf{q}_a$ là tín hiệu ra của hệ thống, phương trình (3.6) được viết thành:

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = \bar{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q})\{\mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{W}_2 - \bar{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a - \bar{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u - \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})\} \quad (3.9)$$

Luật điều khiển được tạo ra $\mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ với các tín hiệu hồi tiếp $[\mathbf{q} \ \dot{\mathbf{q}}]^T$ sẽ đưa trạng thái của hệ $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_a \ \mathbf{q}_u]$ đến mặt trượt và đưa $\mathbf{q}$ đến vị trí mong muốn. Một dạng mặt trượt chuyển mạch có dạng sau:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}}_a + \beta \mathbf{e}_a + \rho \mathbf{e}_u \quad (3.10)$$

Trong đó, $\mathbf{e}_a = \mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}$ và $\mathbf{e}_u = \mathbf{q}_u - \mathbf{q}_{ud}$ là các véc tơ sai số; $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^2$, $\beta = \text{diag}(\beta_1, \beta_2)$

và $\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & \rho_2 \\ 0 & \rho_3 & \rho_4 & 0 \end{bmatrix}$ là các ma trận tham số điều khiển. Với tác động của luật điều

khiển, quỹ đạo trạng thái $\mathbf{q}$ sẽ được đẩy đến vị trí trên mặt trượt và được giữ ở trên mặt trượt mãi mãi. Để làm được điều đó, phương trình ổn định động học của mặt trượt đóng-mở được xét đến

$$\dot{\mathbf{s}} + \beta \mathbf{s} + \mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{s}) = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

Trong đó, $\mathbf{K} = \text{diag}(K_1, K_2)$ là một ma trận xác định dương. Thành phần $\dot{\mathbf{s}} + \beta \mathbf{s}$ đảm bảo ổn định số mũ, trong khi thành phần $\mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{s})$ duy trì tính bền vững của ổn định mặt trượt.

Thay phương trình (3.9) và (3.10) vào phương trình (3.11) ta được thuật toán SOSMC có dạng:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{W}_2 + \{\bar{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})\} \\ &\quad - \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\{2\beta\dot{\mathbf{q}}_a + \rho\dot{\mathbf{q}}_u + \beta^T\beta(\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) + \beta\rho(\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_{ud}) + \mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{s})\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Ma trận hệ số điều khiển $\mathbf{K}$ được chọn bằng phép thử sai để chắc chắn rằng giai đoạn tiến tới mặt trượt không quá dài trong khi hiện tượng rung (chattering) sẽ giảm. Trong thực tế, hệ thống điều khiển không lắp đặt cảm biến để đo nhiễu động bên ngoài. Không được cung cấp thông tin của nhiễu $\mathbf{W}_2$, bộ điều khiển được đề xuất vẫn làm việc tốt khi chịu tác động của nhiễu. Trong trường hợp này, thành phần $\mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{W}_2$ có thể được loại bỏ và thuật toán điều khiển (3.12) sẽ được đơn giản thành:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = & -\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \left\{ 2\beta \dot{\mathbf{q}}_a + \rho \dot{\mathbf{q}}_u + \beta^T \beta (\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) + \beta \rho (\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_{ud}) + \mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{s}) \right\} \\ & + \bar{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Phân tích ổn định của hệ (2.15) với sự dẫn động của bộ điều khiển SOSMC (3.13) dựa trên ổn định Lyapunov ta chứng minh được $\mathbf{s}$ bị chặn và mặt trượt ổn định tiệm cận, $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{s} = \mathbf{0}$.

3.3. Điều khiển trượt tích hợp bộ quan sát

Trong mô phỏng, tín hiệu phản hồi trạng thái gồm véc tơ tọa độ suy rộng $\mathbf{q} = [x_t \ \varphi_m \ \theta \ s \ y \ \varphi_b]^T$ và đạo hàm của nó $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{x}_t \ \dot{\varphi}_m \ \dot{\theta} \ \dot{s} \ \dot{y} \ \dot{\varphi}_b]^T$. Trong thực tế, hệ thống điều khiển sử dụng sáu cảm biến để đo sáu thành phần véc tơ tín hiệu ra $\mathbf{q}$, trong khi sáu thành phần của véc tơ phản hồi vận tốc $\dot{\mathbf{q}}$ được xấp xỉ bằng đạo hàm số hoặc bằng bộ quan sát trạng thái. Trong phần này, tác giả thiết kế một bộ quan sát để ước lượng thành phần vận tốc nếu $\mathbf{q}$ được xem như tín hiệu ra của hệ thống thì mô hình động lực học cần trục (2.15) có thể được viết lại dưới dạng mô hình không gian trạng thái:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \quad (3.19)$$

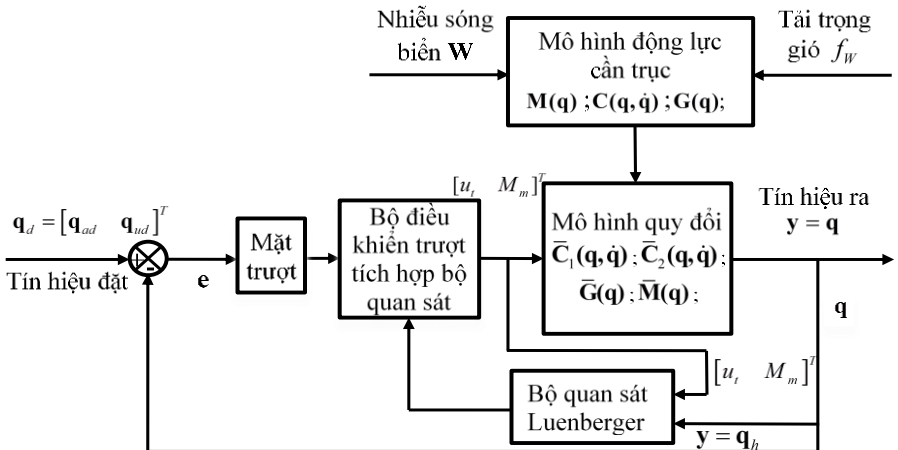
$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \hat{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{x}_1) [\hat{\mathbf{F}} - \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{x}_1)] \quad (3.20)$$

Trong đó, $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q} \in R^6$ và $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}} \in R^6$ được định nghĩa như là trạng thái hệ thống. Dựa trên dạng của mô hình động lực học (3.19) & (3.20) và tham khảo kết quả của công trình nghiên cứu [30], tác giả xây dựng một bộ ước lượng Luenberger như sau:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_2 + \rho \gamma (\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1) \quad (3.21)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 = \hat{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{x}_1) [\hat{\mathbf{F}} - \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{x}_1, \sigma_v(\mathbf{x}_2)) - \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{x}_1)] + \rho^2 \delta (\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1) \quad (3.22)$$

Trong đó, $(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2)$ là giá trị xấp xỉ của $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$. γ, δ , và ρ là ma trận thông số bộ quan sát. $\mathbf{V} \in R^6$ là véc tơ giới hạn của vận tốc $\mathbf{x}_2$, các yếu tố này phải thỏa mãn $|x_i| \leq V_i (i=1-6)$. $\sigma_v(\mathbf{x}_2)$ là một hàm tới hạn.



Hình 3.1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển trượt bậc hai tích hợp bộ quan sát

Do đó, tương ứng với tín hiệu vào $\hat{\mathbf{F}} = [\hat{\mathbf{F}}_c \quad \mathbf{0}]^T$ và tín hiệu ra $\mathbf{q}$ của hệ thống điều khiển, bộ quan sát Luenberger (3.21) & (3.22) được sử dụng để xấp xỉ $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ trong trường hợp $\mathbf{q}$ đo được và $\dot{\mathbf{q}}$ không đo được. Tiếp đó, thông số trạng thái được xấp xỉ $(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) = (\hat{\mathbf{q}}, \hat{\dot{\mathbf{q}}})$ được hồi tiếp đến bộ điều khiển. Tương ứng với bộ quan sát (3.21) & (3.22). Với bộ điều khiển SOSMC, bộ quan sát tích hợp vào bộ điều khiển được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{U}_1(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) = -\bar{\mathbf{M}}(\hat{\mathbf{x}}_1) \left\{ 2\beta \dot{\hat{\mathbf{q}}}_a + \rho \dot{\hat{\mathbf{q}}}_u + \beta^T \beta (\hat{\mathbf{q}}_a - \mathbf{q}_{ad}) + \beta \rho (\hat{\mathbf{q}}_u - \mathbf{q}_{ud}) + \mathbf{K} \text{sgn}(\hat{\mathbf{s}}) \right\} \\ + \bar{\mathbf{C}}_1(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \dot{\hat{\mathbf{q}}}_a + \bar{\mathbf{C}}_2(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \dot{\hat{\mathbf{q}}}_u + \bar{\mathbf{G}}(\hat{\mathbf{x}}_1) \quad (3.24)$$

và

$$\hat{\mathbf{s}} = \hat{\mathbf{e}}_a + \beta \hat{\mathbf{e}}_u + \rho \hat{\mathbf{e}}_u \quad (3.25)$$

với $\hat{\mathbf{e}}_a = \hat{\mathbf{q}}_a - \mathbf{q}_{ad}$ và $\hat{\mathbf{e}}_u = \hat{\mathbf{q}}_u - \mathbf{q}_{ud}$.

Nghiên cứu của nhóm tác giả trong bài báo [30] chứng tỏ rằng bộ quan sát động lực học (3.21) & (3.22) ổn định toàn cục theo số mũ sai số ước lượng và tốc độ hội tụ phụ thuộc vào thông số thiết kế của bộ quan sát.

3.4. Điều khiển trượt tích hợp mạng nơ ron

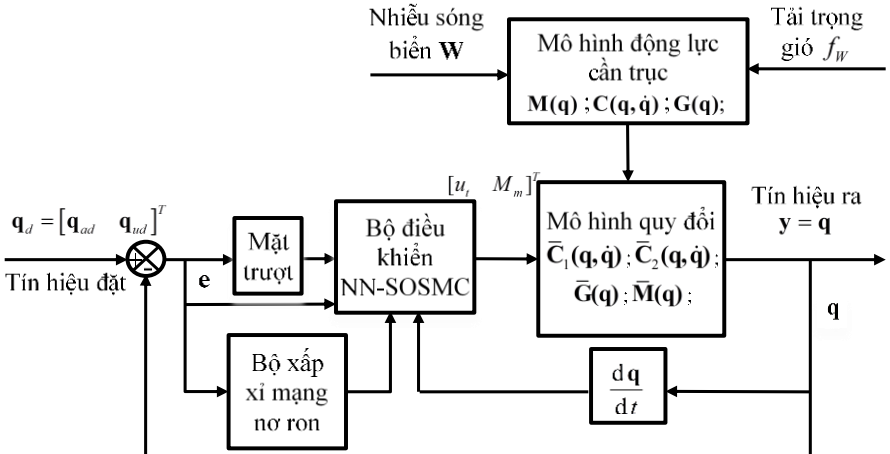
Bộ điều khiển SOSMC (3.13) được sử dụng hiệu quả trong cả trường hợp không biết chắc chắn thông số hệ thống. Mặc dù bộ điều khiển (3.13) giữ cho đáp ứng của hệ thống nhất quán nhưng nó vẫn yêu cầu thông tin từ cấu trúc của đối tượng điều khiển. Một bộ điều khiển thích nghi-bền vững trong đó bộ điều khiển không cần thiết phải biết hầu hết các thành phần của đối tượng điều khiển là cần thực container gắn trên tàu được đề xuất. Bộ ước lượng RBFN được thiết kế và tích hợp vào vòng lặp điều khiển để ước lượng cấu trúc của đối tượng điều khiển bao gồm $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ và $\mathbf{G}(\mathbf{q})$. Khi đó, thuật toán điều khiển SOSMC (3.13) được viết lại thành:

$$\mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \left\{ 2\beta \dot{\mathbf{q}}_a + \rho \dot{\mathbf{q}}_u + \beta^T \beta (\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) + \beta \rho (\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_{ud}) + \mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{s}) \right\} \quad (3.27)$$

với

$$\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \bar{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \quad (3.28)$$

trở thành hệ mô hình cần thực phi tuyến phức tạp.



Hình 3.2. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển trượt bậc hai tích hợp mạng nơ ron

Không biết thông tin mô hình hệ thống, bộ điều khiển bền vững (3.27) sẽ không có thông tin của đối tượng điều khiển $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ và $\mathbf{G}(\mathbf{q})$, khi đó các thành phần của bộ điều khiển $\bar{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\bar{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ là những đại lượng chưa biết. Gọi $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^2$ là xấp xỉ phi tuyến của $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, thuật toán điều khiển (3.27) được viết dưới dạng thích nghi như sau:

$$\mathbf{U}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \left\{ \begin{array}{l} 2\beta \dot{\mathbf{q}}_a + \rho \dot{\mathbf{q}}_a + \beta^T \beta (\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) \\ + \beta \rho (\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) + \mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{s}) \end{array} \right\} \quad (3.29)$$

trong đó $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \hat{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \hat{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ là một véc tơ của hàm phi tuyến, có thể được ước lượng.

Mô hình xác định $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ được nhận dạng ngoại tuyến. Khi ước lượng mô hình $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ đủ chính xác, nó sẽ được thay vào cấu trúc của bộ điều khiển (3.29). Nhìn chung, mạng RBF bao gồm một lớp tín hiệu vào, một lớp tín hiệu ẩn và một lớp tín hiệu ra. Đầu vào của mạng nơ ron RBF được cho bởi:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{e}_a \quad \mathbf{e}_{uc} \quad \mathbf{e}_{us}]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 2} \quad (3.30)$$

với $\mathbf{e}_{uc} = [(\theta - \theta_d) \quad (s - s_d)]^T \in \mathbb{R}^2$ và $\mathbf{e}_{us} = [(y - y_d) \quad (\varphi_b - \varphi_{bd})]^T \in \mathbb{R}^2$ là các véc tơ sai số từng phần của biến trạng thái bị động tương ứng với cần trục và tàu. Tín hiệu ra xấp xỉ của mạng nơ ron $\mathbf{f}(\mathbf{z})$ được xác định bằng:

$$\mathbf{f}(\mathbf{z}) = \mathbf{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{z}) + \varepsilon \quad (3.31)$$

Trong đó, $\mathbf{W}$ là ma trận trọng số lý tưởng, $\mathbf{h}(\mathbf{z})$ là hàm kích hoạt, ε là sai số mô hình mạng nơ ron, ta có:

$$\mathbf{h}(\mathbf{z}) = \exp \left(- \frac{\|\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}\|^2}{2\delta^2} \right) \quad (3.32)$$

với $\boldsymbol{\mu} = [\mu_{ij}]$ là véc tơ trung tâm, $\delta = [\delta_j]$ là véc tơ độ lệch chuẩn. Tiếp đó, tín hiệu ra của mạng RBFN là xấp xỉ $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{z})$ được biểu thị bằng:

$$\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{z}) = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(\mathbf{z}) \quad (3.33)$$

Sai số mô hình ε là nhỏ, do đó, nó có thể được loại bỏ như được thấy trong phương trình (3.27). Áp dụng ổn định Lyapunov, một cơ cấu xác định được đề xuất để trực tiếp ước lượng thành phần phi mô hình $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{z})$ bằng việc xấp xỉ ma trận trọng số $\hat{\mathbf{W}}$ như sau:

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}} = -\Gamma \mathbf{h}(\mathbf{z}) \mathbf{s}^T \quad (3.34)$$

với $\Gamma = \text{diag}(\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_m)$ là một ma trận chéo xác định dương của thông số thích nghi. Thực tế, cơ cấu (3.40) trực tiếp xấp xỉ $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{z})$ bằng việc xác định xấp xỉ ma trận trọng số $\hat{\mathbf{W}}$ và ánh xạ tín hiệu vào ở đó xấp xỉ cơ hệ $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{z})$ là càng gần càng tốt để xác định thành phần $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$.

Phân tích ổn định của hệ (2.15) với sự dẫn động của bộ điều khiển NN-SOSMC (2.29) dựa trên ổn định Lyapunov ta chứng minh được $\mathbf{s}$ và $\hat{\mathbf{W}}$ bị chặn và mặt trượt ổn định tiệm cận, $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{s} = \mathbf{0}$.

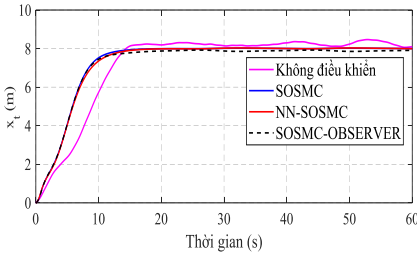
3.5. Mô phỏng

Các thông số đầu vào mô phỏng được cho trong Bảng 3.1, trong đó các thông số hệ động lực, thông số sóng biển kích động, thông số tải trọng gió được chọn theo các phân tích và lý giải chọn thông số trong Bảng 2.1. Các tham số của bộ điều khiển SOSMC, NN-SOSMC và OB-SOSMC được chọn bằng phương pháp thử sai.

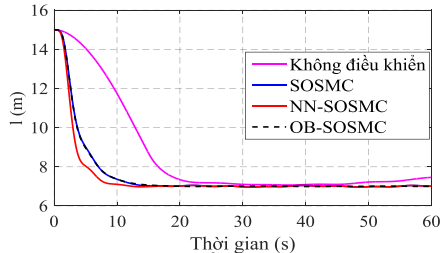
Bảng 3.1. Các thông số mô phỏng

Hệ động lực	Sóng biển
$a_2 = 32 \text{ m},$ $a_3 = 12.5 \text{ m},$ $a_4 = 12.5 \text{ m},$ $r_m = 0.325 \text{ m},$ $l_0 = 15 \text{ m},$ $m_b = 450000 \text{ kg},$ $m_t = 5900 \text{ kg},$ $m_c = 24000 \text{ kg},$ $J_b = 571875000 \text{ kgm}^2,$ $J_m = 41700 \text{ kgm}^2,$ $k_1 = 1250000 \text{ N/m},$ $k_2 = 1250000 \text{ N/m},$ $k_3 = 12000 \text{ N/m},$ $b_1 = 200 \text{ Ns/m},$ $b_2 = 200 \text{ Ns/m},$ $b_3 = 220 \text{ Ns/m},$ $b_t = 50 \text{ Ns/m},$ $g = 9.81 \text{ m/s}^2,$ $b_m = 70 \text{ Ns/m}.$	$a_{w0} = c_{w0} = 0 \text{ N}, a_{w1} = b_{w1} = 3.10^5 \text{ N}, c_{w1} = d_{w1} = 6.10^5 \text{ Nm},$ $\omega_F = \omega_M = 0.35 \text{ rad/s}.$
	Tải trọng gió
	$\rho_a = 1.22 \text{ kg/m}^3, \nu_0 = 7,1 \text{ m/s}, C_w = 1.1, K_r = 0.85,$ $K_h = 1.15, K_{wd} = 0.9, C_g = 1.05, A_c = 14,06 \text{ m}^2.$
	Thuật toán điều khiển SOSMC
	$\beta_1 = 0.21, \beta_2 = 0.3, \rho_1 = 13, \rho_2 = 1, \rho_3 = 4, \rho_4 = 0.1,$ $K_1 = K_2 = 2.$
	Thuật toán điều khiển NN-SOSMC
	$\beta_1 = 0.2, \beta_2 = 0.4, \rho_1 = 13, \rho_2 = 1, \rho_3 = 4, \rho_4 = 0.1,$ $K_1 = K_2 = 2, \Gamma_i = 12,$ $\mu = 0.1 \begin{bmatrix} -1.5 & -1 & -0.5 & 0.1 & 0.5 & 1 & 1.5 & -0.5 & -1 & -1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0.1 & 0.5 & 1 & 1.5 & -0.5 & -1 & -1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0.1 & 0.5 & 1 & 1.5 & -0.5 & -1 & -1.5 \end{bmatrix},$ $\delta = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2].$
	Bộ quan sát
	$\hat{x}_1(0) = \hat{q}(0) = [0 \ 0 \ 4^\circ \ 0 \ 0 \ 0]^T,$ $\hat{x}_2(0) = \dot{\hat{q}}(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$ $v = [1 \ 1 \ 0.1 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T, \rho = 5, \gamma = 1, \delta = 1.$

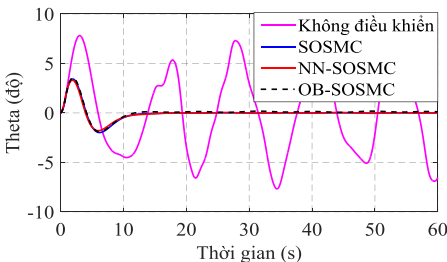
Dựa trên ngôn ngữ lập trình MATLAB®/Simulink® để mô phỏng cho ta các đáp ứng từ Hình 3.4 đến Hình 3.11. Để tăng hiệu suất khai thác, việc nâng hạ container và dịch chuyển xe con sẽ được mô phỏng thực hiện đồng thời. Dưới tác động của lực u_t và mô men M_m , cả dịch chuyển xe con (Hình 3.5) và chuyển động của tời (Hình 3.7) đều tiệm cận với giá trị đặt của nó trong khi góc lắc cấp nâng nhỏ (Hình 3.8).



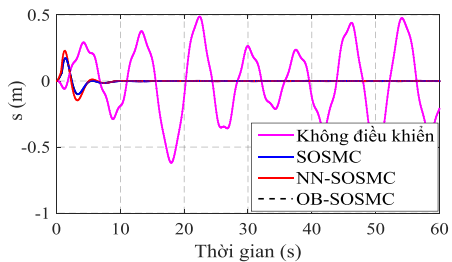
Hình 3.5. Vị trí xe con



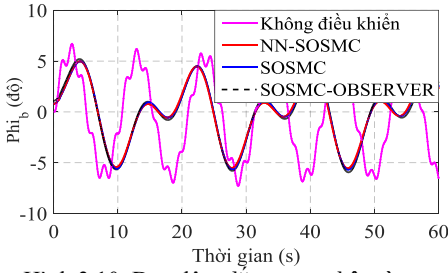
Hình 3.7. Chiều dài cáp nâng



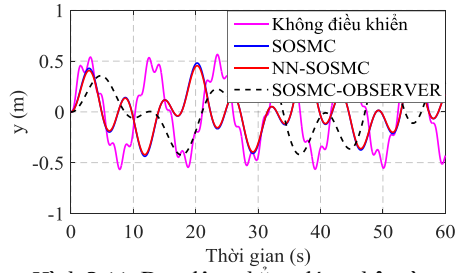
Hình 3.8. Góc lắc cấp nâng



Hình 3.9. Dao động container dọc theo cáp nâng



Hình 3.10. Dao động lắc ngang thân tàu



Hình 3.11. Dao động thẳng đứng thân tàu

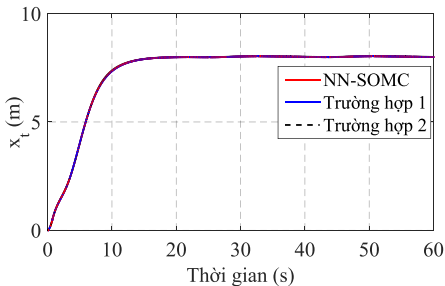
Góc lắc cấp nâng (Hình 3.8) và dao động dọc cấp nâng (Hình 3.9) hầu như không đáng kể ở đích đến của container mặc dù chuyển động của hệ là đáng kể. Trên Hình 3.8, ta có thể dễ dàng nhận thấy đáp ứng góc lắc cấp nâng đối với cả ba thuật toán điều khiển gần như đồng nhau. Ở giai đoạn quá độ, góc lắc lớn nhất đối với 3 thuật toán điều khiển gần như bằng nhau, với thuật toán điều khiển NN-SOSMC thì $\theta_{\max}=2,7^\circ$, trong khi đó góc lắc cực đại đối với hai thuật toán điều khiển SOSMC và OB-SOSMC $\theta_{\max}=2,8^\circ$. Biên độ dao động lớn nhất dao động container dọc theo cấp nâng đối với thuật toán điều khiển SOSMC và OB-SOSMC là giống nhau $s_{\max}=0,18$ m, trong khi đó với thuật toán điều khiển NN-SOSMC thì biên độ dao động lớn nhất của container dọc theo cấp nâng là $s_{\max}=0,22$ m (Hình 3.9). Tuy nhiên, khi ở trạng thái xác lập thì các thuật toán điều khiển này cho các đáp ứng điều khiển tương đương nhau và đều tiệm cận với giá trị đặt.

Tác động của sóng lên thân tàu sẽ gây ra dao động nghiêng và chúi thân tàu trong Hình 3.10 & Hình 3.11. Các dao động này chỉ thoáng qua được kích thích bởi chu kỳ dao động với 2 tần số: Dao động riêng của hệ cần trục-tàu và dao động cưỡng bức của sóng biển. Mục đích chính của bộ điều khiển được đề xuất là ổn định tiệm cận với tín hiệu đặt để dịch chuyển container tới vị trí yêu cầu và giữ cho góc lắc và dao động dọc cấp của container nhỏ. Các thuật toán điều khiển này không thể hoàn toàn dập tắt được dao động thân tàu do kích động của sóng biển. Tuy nhiên, chúng gián tiếp góp phần vào việc ổn định biên của tàu nếu cần trục container ổn định tiệm cận.

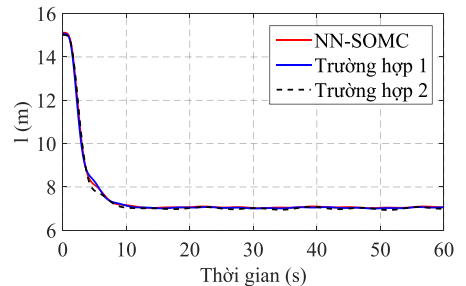
Trong quá trình khai thác cần trục có rất nhiều yếu tố thay đổi tác động lên hệ thống với dải thay đổi rộng. Để xem xét tính bền vững của hệ thống điều khiển, đề tài sẽ mô phỏng xem xét đáp ứng của hệ thống cho hai trường hợp sau đây:

Trường hợp 1: Thay đổi tần số sóng kích động $\omega_F = \omega_M = 0,2$ rad/s, khối lượng tàu 2.800.000 kg. Sử dụng container 20 feet với diện tích chắn gió $A_c = 14,06$ m², tốc độ gió $v_0 = 5,2$ m/s (ứng với cấp gió Bô-phô cấp 3), khối lượng hàng 24.000 kg.

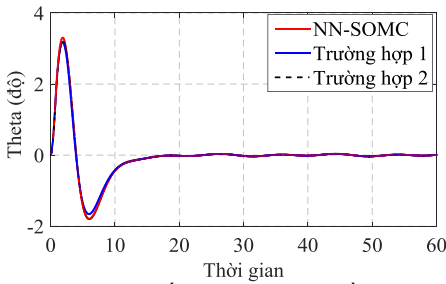
Trường hợp 2: Thay đổi tần số sóng kích động $\omega_F = \omega_M = 0,5$ rad/s, khối lượng tàu 4.500.000 kg. Sử dụng container 40 feet với diện tích chắn gió $A_c = 28,7$ m², tốc độ gió $v_0 = 8,8$ m/s (ứng với cấp gió Bô-phô cấp 5), khối lượng hàng 30.480 kg.



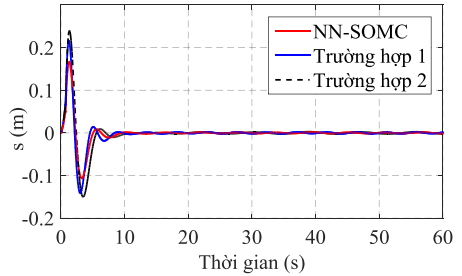
Hình 3.14. Vị trí xe con (thứ tính bền vững của hệ thống điều khiển)



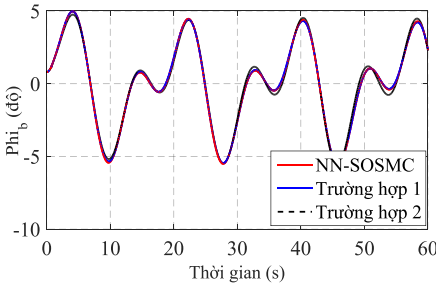
Hình 3.15. Chiều dài cấp nâng (thứ tính bền vững của hệ thống điều khiển)



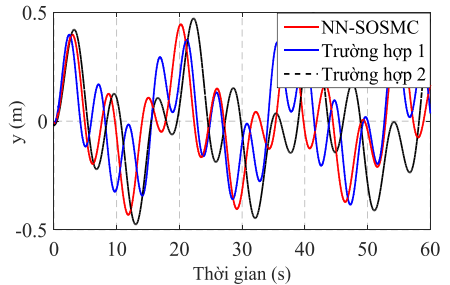
Hình 3.16. Góc lắc cấp nâng (tính bền vững của hệ thống điều khiển)



Hình 3.17. Dao động container dọc theo cấp nâng (tính bền vững của hệ thống điều khiển)



Hình 3.18. Dao động lắc ngang thân tàu (tính bền vững của hệ thống điều khiển)



Hình 3.19. Dao động thẳng đứng thân tàu (tính bền vững của hệ thống điều khiển)

Khi nhiễu và thông số hệ thống thay đổi, hệ thống điều khiển vẫn đảm bảo ổn định với dải thay đổi lớn. Các đáp ứng của hệ thống vẫn đạt được các yêu cầu trong quá trình làm việc. Cơ cấu dẫn động vẫn đưa container đến vị trí yêu cầu một cách chính xác. Vị trí xe con (Hình 3.14) và chiều dài cấp nâng (Hình 3.15) trong hai trường hợp đề xuất đều đạt được giá trị yêu cầu, không tồn tại độ quá điều chỉnh và sai số xác lập rất nhỏ. Góc lắc cấp nâng (Hình 3.16) và dao động container dọc theo cấp nâng (Hình 3.17) được giữ nhỏ ở giai đoạn chuyển tiếp và triệt tiêu ở đích đến. Chức năng chính của hệ thống điều khiển là dẫn động các cơ dịch chuyển đến vị trí yêu cầu. Tuy nhiên, tính bền vững của hệ thống điều khiển được thể hiện rất rõ ở việc khối lượng hàng và khối lượng tàu thay đổi lớn nhưng dao động lắc ngang thân tàu (3.18) và dao động thẳng đứng thân tàu (3.19) vẫn giữ ổn định biên. Như vậy, khi thay đổi các thông số của nhiễu, thông số hệ thống, hệ thống điều khiển vẫn đảm bảo được sự ổn định trong quá trình làm việc.

Kết luận chương 3

Chương 3 đã thực hiện được các nội dung chính sau:

Xây dựng được ba thuật toán điều khiển phi tuyến bền vững cho cần trục container đặt trên phao nổi dựa trên mô hình toán ở Chương 2, gồm: thuật toán điều khiển trượt bậc hai (SOSMC), thuật toán điều khiển trượt bậc hai tích hợp mạng nơ ron (NN-SOSMC), thuật toán điều khiển trượt tích hợp bộ quan sát (OB-SOSMC). Các thuật toán điều khiển được xây dựng có sự kế thừa và bổ sung cho nhau. Các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng hệ thống điều khiển bền vững với sự thay đổi của nhiễu và thay đổi thông số hệ thống.

CHƯƠNG IV. THỰC NGHIỆM

4.1. Mô hình thực nghiệm

Hệ thống cần trục container được thiết kế với chiều cao 1 m, chiều rộng 1 m, chiều dài 1.6 m, cho phép nâng hạ và chuyển tải với tải trọng hàng tối đa là 20 kg. Xe con được dẫn

động bởi động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha dịch chuyển trên dầm chính của cần trục container. Dầm chính được dẫn động bởi động cơ xoay chiều ba pha để thay đổi vị trí làm hàng của cần trục container và động cơ điện một chiều dẫn động quay tời để thay đổi chiều dài cáp nâng. Cũng giống như bài toán mô phỏng, quá trình thực nghiệm cả ba cơ cấu này sẽ được thực hiện đồng thời để nâng cao hiệu quả và giảm thời gian làm hàng. Mô hình hệ thống cần trục container trong phòng thí nghiệm được mô tả trong Hình 4.1. Dưới tác động của đế kích động, cần trục sẽ liên tục dao động. Cần trục sẽ rung lắc và mất ổn định nếu các cơ cấu không được điều khiển chính xác. Bộ điều khiển sẽ phải đáp ứng được các yêu cầu điều khiển và phải giữ cho hệ thống ổn định trong suốt quá trình cần trục container làm việc.

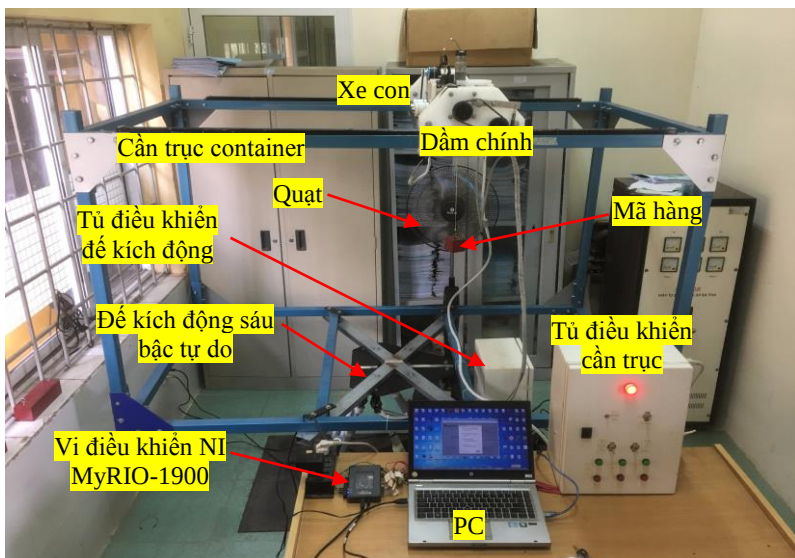
Khi xây dựng mô hình thực nghiệm cần trục cần có tính tương đồng với đối tượng thực càng nhiều càng tốt. Tuy nhiên, mô hình này vẫn còn một số điểm khác biệt, một số giả thiết cần được kể đến khi xây dựng mô hình và tiến hành thực nghiệm. Sự khác biệt và các giả thiết đưa vào khi thiết kế mô hình cần trục về cơ bản không ảnh hưởng đến tính trung thực của kết quả thực nghiệm và mục đích của bài toán đặt ra. Các giả thiết đó bao gồm:

Hệ cần trục-đế kích động sẽ dao động với cùng tần số ngay cả ở giai đoạn chuyển tiếp và sẽ tiếp tục ở giai đoạn ổn định do liên kết cứng giữa đế kích động và cần trục.

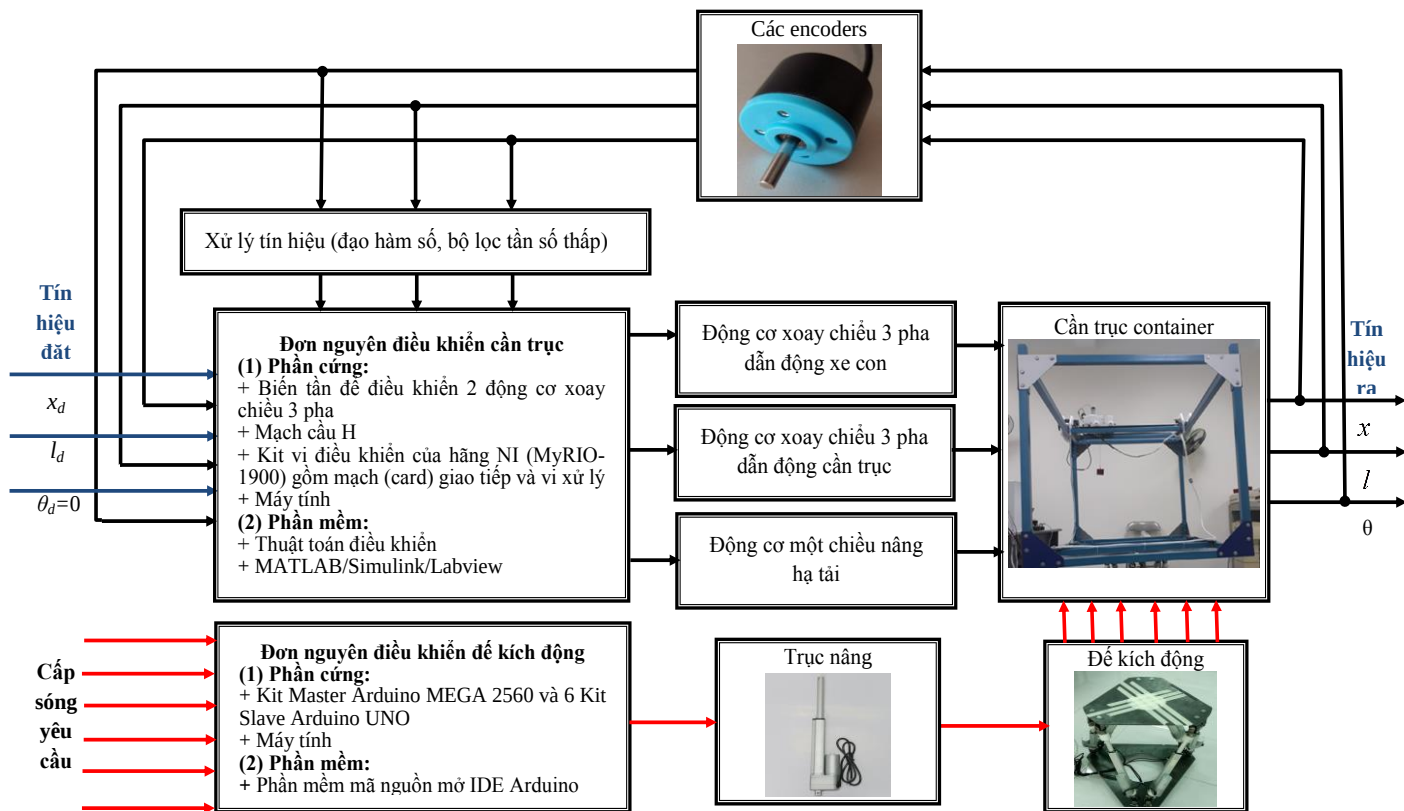
Biên độ của đế kích động thay đổi tuần hoàn với một vài tần số được lựa chọn tương đương với tần số dao động của sóng biển;

Chưa tính đến đàn hồi của cáp nâng vì sự thay đổi chiều dài cáp nâng khi thực hiện trong phòng thí nghiệm là nhỏ.

Mô hình thực nghiệm được xây dựng là mô hình có khả năng thực hiện chuyển động trong không gian ba chiều (3D). Thực nghiệm chuyển động trong không gian hai chiều (2D) để phù hợp với mô phỏng hoàn toàn có thể thực hiện được với việc dầm chính không chuyển động. Mặt khác, đế kích động có thể tạo dao động với sáu bậc tự do, việc tạo ra dao động theo hai bậc tự do (heave, roll) hoàn toàn có thể thực hiện được. Các kích thước hình học của cần trục không ảnh hưởng lớn đến kết quả thử nghiệm vì bản chất của việc thử nghiệm là thử đáp ứng của các thuật toán điều khiển.



Hình 4.1. Hệ thống cần trục container trong phòng thí nghiệm



Hình 4.4. Sơ đồ khối hệ thống thực nghiệm

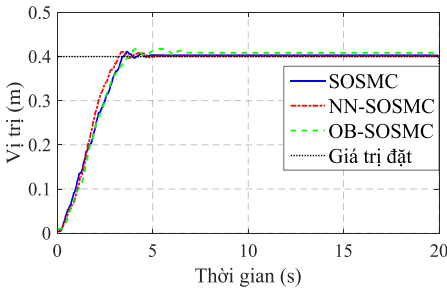
4.2. Hệ thống điều khiển

Mô hình cần trục container trong phòng thí nghiệm được thể hiện chi tiết trong sơ đồ Hình 4.4, hệ thống gồm hai phần là cần trục container và đế kích động.

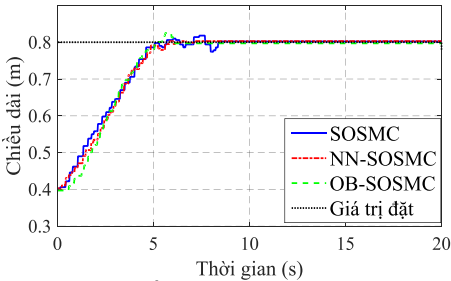
Cần trục container được trang bị ba động cơ điện, trong đó hai động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha sử dụng để dẫn động xe con và dẫn động dầm chính, một động cơ điện một chiều sử dụng để quay tời với mục đích thay đổi chiều dài cáp nâng. Sở dĩ đề tài này sử dụng đồng thời cả động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha và động cơ điện một chiều là vì có thể kết hợp đồng thời hai phương pháp điều khiển tốc độ động cơ là điều khiển bằng biến tần đối với động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha và điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều bằng PWM. Ngoài ra, như đã đề cập thì việc sử dụng động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha có ưu điểm là gần với thực tế hơn vì trong thực tế việc dẫn động các cơ cấu của cần trục hoàn toàn sử dụng động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha. Dưới các yêu cầu điều khiển, bộ điều khiển đã được thiết kế sẽ đưa ra các tín hiệu để điều khiển hai động cơ xoay chiều ba pha dùng để dẫn động xe con và dẫn động cần trục và một động cơ điện một chiều để nâng/hạ hàng tiến tới giá trị yêu cầu đồng thời giữ cho góc lắc hàng nhỏ trong quá trình làm việc của cần trục. Các tín hiệu ra sẽ được đo bởi các cảm biến và được phản hồi về bộ điều khiển dưới dạng các chuyển vị. Các tín hiệu vận tốc sẽ được xử lý thông qua việc đạo hàm số, bộ quan sát, và bộ lọc tần số thấp.

Đề kích động là một robot song song sáu bậc tự do được dùng để tạo kích động như kích động sóng tác động lên thân tàu khi tàu làm việc ngoài biển. Với yêu cầu là các cấp sóng khác nhau dưới tác động của hệ thống điều khiển mạch hở, đề kích động sẽ dịch chuyển và tạo ra kích động ứng với từng cấp sóng đưa vào bộ điều khiển. Các dữ liệu về cấp sóng này là dữ liệu ngẫu nhiên để đảm bảo tính tương đồng giữa mô hình thực nghiệm trong phòng thí nghiệm và mô hình thực tế.

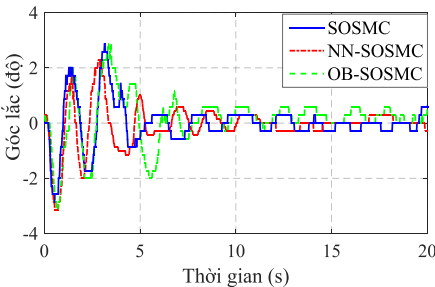
4.3. Kết quả thực nghiệm



Hình 4.16. Vị trí xe con (thực nghiệm)



Hình 4.17. Chiều dài cáp nâng (thực nghiệm)



Hình 4.18. Góc lắc cáp nâng (thực nghiệm)

Dưới kích động của đề kích động, cả hệ cần trục-đề kích động sẽ dao động liên tục với các tần số dao động ngẫu nhiên. Nhiệm vụ của hệ thống điều khiển là dẫn động xe con và nâng/hạ tải có khối lượng 5 kg đến vị trí yêu cầu đồng thời giữ cho góc lắc cáp nâng nhỏ trong quá trình làm việc. Sự sai số của bất kỳ một khâu nào cũng ảnh hưởng đến hiệu suất làm hàng. Giống như mô phỏng, đề tăng năng suất làm hàng, quá trình thực nghiệm sẽ thực hiện đồng thời việc dịch chuyển xe con và nâng/hạ hàng. Xe con mất khoảng 4 giây để dịch chuyển đến vị trí là 0,4 m so với vị trí ban đầu, trong khi đó cơ cấu nâng phải mất khoảng 5,5 giây để hạ tải từ vị trí có chiều dài cáp nâng là 0,4 m xuống vị trí có chiều dài cáp nâng là 0,8 m. Khi đạt đến trạng thái xác lập, nhìn chung cả 3 thuật toán điều khiển được tích hợp vào hệ thống đều cho các đáp ứng tốt. Tuy nhiên, có thể thấy, với hệ thống điều khiển tích hợp bộ quan sát thì tồn tại dao động và sai lệch tĩnh ở trạng thái xác lập. Điều này có tính tương đồng với quá trình mô phỏng. Mặt khác, với việc điều khiển xe con đến vị trí yêu cầu, có tồn tại độ quá điều chỉnh là do bộ điều khiển chịu nhiễu ngoài tác động liên tục. Tại vị trí xác lập, hệ thống điều khiển nhận được tín hiệu ảo được gây ra bởi đề kích động, điều đó làm cho xe con đi quá vị trí yêu cầu. Tuy nhiên, việc đó đã được cải thiện ngay sau đó khi xe con được dẫn động đến đúng vị trí yêu cầu.

Việc cần trục gắn chặt trên đề kích động và dao động với tần số kích thích của đề kích động làm cho việc điều khiển góc lắc cáp nâng trở nên khó khăn hơn rất nhiều. Tuy nhiên, dưới tác động của hệ thống điều khiển, góc lắc cáp nâng vẫn được khống chế. Ở giai đoạn quá độ, góc lắc cáp nâng có dao động nhưng với biên độ dao động không lớn $\theta_{\max}=2,6^\circ$ đối với hệ thống điều khiển tích hợp thuật toán điều khiển NN-SOSMC và OB-SOSMC, và $\theta_{\max}=2,5^\circ$ với hệ thống điều khiển tích hợp thuật toán điều khiển SOSMC (Hình 4.18). Ở giai đoạn xác lập, các dao động này vẫn tồn tại nhưng dao động với biên độ rất nhỏ và không ảnh hưởng đến việc dịch chuyển hàng đến vị trí yêu cầu.

4.4. Thực nghiệm tính bền vững của hệ thống điều khiển

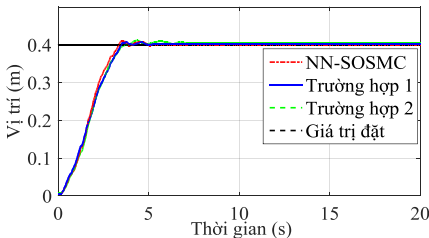
Kết quả mô phỏng đã chỉ ra hệ thống điều khiển bền vững với sự thay đổi của nhiễu ngoài tác động và thay đổi thông số hệ thống. Trong thực nghiệm, để xem xét tính bền vững của hệ thống điều khiển, đề tài thực nghiệm với hai trường hợp sau:

Trường hợp 1: Khối lượng tải trọng là 7,8 kg, kích thước tải trọng (0,1 m x 0.1 m x 0.1 m), tốc độ gió 4,8 m/s.

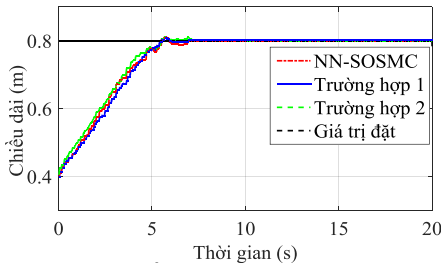
Trường hợp 2: Khối lượng tải trọng là 15,6 kg, kích thước tải trọng (0,2 m x 0.1 m x 0.1 m), tốc độ gió 8,2 m/s.

Dao động của đề kích động trong hai trường hợp trên đều được thay đổi để phù hợp với quy luật thay đổi trong mô phỏng được thể hiện rõ trong toàn văn luận án.

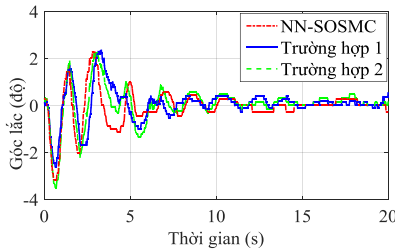
Các đáp ứng của hệ thống điều khiển được thể hiện từ Hình 4.21 đến Hình 4.23. Có thể thấy, hệ thống điều khiển đáp ứng rất tốt các yêu cầu điều khiển. Góc lắc cáp nâng có dao động khác nhau giữa hai trường hợp nhưng góc lắc lớn nhất ở giai đoạn chuyển tiếp đều xoay quanh giá trị $\theta_{\max}=2,6^\circ$ (Hình 4.23). Như vậy, có thể khẳng định hệ thống điều khiển đảm bảo được tính bền vững với các thay đổi của nhiễu và thông số hệ thống.



Hình 4.21. Vị trí xe con (thực nghiệm thử tính bền vững của hệ thống điều khiển)



Hình 4.22. Chiều dài cáp nâng (thực nghiệm thử tính bền vững của hệ thống điều khiển)



Hình 4.23. Góc lắc cấp nâng (thực nghiệm thử tính bền vững của hệ thống điều khiển)

4.5. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Để đánh giá chất lượng hệ thống điều khiển, thông qua các đáp ứng với ba thuật toán điều khiển đã được mô phỏng và thực nghiệm. Các chỉ tiêu chất lượng hệ thống điều khiển gồm: thời gian tăng, độ quá điều chỉnh, sai lệch tĩnh. Các đáp ứng được so sánh gồm: vị trí xe con, chiều dài cấp nâng, và góc lắc cấp nâng. Số chu kỳ dao động của các đáp ứng cũng được liệt kê để đánh giá khả năng đáp ứng của hệ thống điều khiển, đặc biệt với góc lắc cấp nâng. Nhìn một cách tổng thể, giữa mô phỏng và thực nghiệm có quy luật tương đồng nhau cả về đáp ứng và chỉ tiêu chất lượng hệ thống điều khiển.

Thứ nhất, về thời gian tăng: Đối với các thuật toán điều khiển thì thời gian tăng đối với từng đáp ứng là tương đương nhau với các thuật toán điều khiển cả trong mô phỏng và thực nghiệm. Tuy nhiên, góc lắc cấp nâng với thuật toán điều khiển OB-SOSMC, trong mô phỏng có thời gian tăng nhỏ hơn so với thời gian tăng của của thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC. Tuy nhiên, trong thực nghiệm, thời gian tăng với đáp ứng góc lắc cấp nâng đối với thuật toán điều khiển OB-SOSMC lại lớn hơn so với hai thuật toán điều khiển còn lại.

Thứ hai, về độ quá điều chỉnh: Nhìn chung đáp ứng trong trường hợp mô phỏng của các thuật toán điều khiển là tương đương nhau. Tuy nhiên, trong thực nghiệm khi sử dụng bộ quan sát thì thuật toán điều khiển cho đáp ứng có độ quá điều chỉnh cực đại với chiều dài cấp nâng là 0,015 m. Tuy tồn tại độ quá điều chỉnh, nhưng giá trị này rất nhỏ, về cơ bản không ảnh hưởng nhiều đến chất lượng làm hàng cũng như chất lượng hệ thống điều khiển khi sử dụng thuật toán OB-SOSMC.

Thứ ba, về sai lệch tĩnh: Không tồn tại sai lệch tĩnh trong mô phỏng với hai thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC, với thuật toán điều khiển OB-SOSMC thì tồn tại sai lệch tĩnh khi dịch chuyển xe con và dao động cấp nâng. Trong thực nghiệm, sai lệch tĩnh của hai thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC là tương đương nhau (chỉ tồn tại dao động của cấp nâng). Thuật toán OB-SOSMC tồn tại sai lệch với cả ba đáp ứng được xét đến là vị trí xe con, chiều dài cấp nâng và góc lắc cấp nâng. Tuy nhiên, cả trong mô phỏng và thực nghiệm, các sai lệch này đều không đáng kể, do đó, về cơ bản nó không ảnh hưởng đến chất lượng quá trình làm hàng cũng như chất lượng hệ thống điều khiển.

Thứ tư, về số chu kỳ dao động: Để xét đến khả năng khống chế dao động khi điều khiển các cơ cấu trong hệ thống dịch chuyển, số chu kỳ dao động được kể đến. Số chu kỳ dao động trong mô phỏng đối với các đáp ứng của các thuật toán điều khiển là hoàn toàn giống nhau. Tuy nhiên, trong thực nghiệm số chu kỳ dao động này có sự sai khác, trong khi số chu kỳ dao động đối với hai thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC là giống nhau (hai chu kỳ với đáp ứng góc lắc cấp nâng), thì số chu kỳ dao động đối với thuật toán điều khiển OB-SOSMC là 2,5 chu kỳ.

Sự sai lệch kết quả nguyên nhân chủ yếu là do sai khác về kết cấu và kích động giữa mô phỏng và thực nghiệm. Sai lệch kết quả về thời gian tăng chủ yếu do sai khác về kết cấu. Thời gian tăng đối với các thuật toán điều khiển trong mô phỏng lớn hơn rất nhiều so với thời gian tăng trong thực nghiệm. Cùng thuật toán điều khiển SOSMC, trong mô phỏng xe con phải mất 15 giây để di chuyển đến vị trí yêu cầu trong khi chỉ mất 4 giây để di chuyển đến vị trí yêu cầu trong thực nghiệm. Tương tự, cơ cấu nâng mất 15 giây để đạt được giá trị yêu cầu trong mô phỏng nhưng chỉ mất 5,5 giây trong thực nghiệm. Điều này được giải thích là do sai lệch kích thước nên quãng đường di chuyển của xe con, chiều dài cáp nâng trong mô phỏng lớn hơn rất nhiều so với thực nghiệm. Quãng đường di chuyển của xe con trong mô phỏng là 8 m trong khi đó quãng đường di chuyển của xe con trong thực nghiệm là 0,4 m. Chiều dài cáp nâng thay đổi 8 m từ vị trí cáp nâng có chiều dài 15 m lên vị trí cáp nâng có chiều dài 7 m đối với mô phỏng và thay đổi 0,4 m từ vị trí cáp nâng có chiều dài 0,4 m xuống vị trí cáp nâng có chiều dài 0,8 m. Sai lệch kết quả về số chu kỳ dao động giữa mô phỏng và thực nghiệm chủ yếu do sai khác về kích động. Trong thực nghiệm, số chu kỳ dao động lớn hơn so với mô phỏng là do để kích động tác động liên tục lên cần trục với chu kỳ dao động nhỏ hơn nhiều so với chu kỳ dao động của sóng biển tác động lên thân tàu. Cụ thể, số chu kỳ dao động đối với thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC trong thực nghiệm là 2 chu kỳ và trong mô phỏng là 1 chu kỳ, với thuật toán điều khiển OB-SOSMC là 2,5 chu kỳ trong thực nghiệm và 1 chu kỳ trong mô phỏng.

Như vậy, về tổng thể, đáp ứng trong thực nghiệm không tốt bằng mô phỏng vì quá trình mô phỏng bỏ qua một số yếu tố khi xây dựng mô hình. Tuy nhiên, các đáp ứng này tương đồng nhau về quy luật. Chất lượng các đáp ứng của thuật toán điều khiển OB-SOSMC là không tốt bằng chất lượng các đáp ứng của hai thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC do tồn tại sai số ước lượng. Tuy nhiên, chất lượng các đáp ứng này vẫn đáp ứng được các yêu cầu khi làm hàng và dẫn động các cơ cấu đến vị trí yêu cầu một cách chính xác. Việc sử dụng bộ quan sát như đã nói sẽ giúp giảm được giá thành thiết kế và bảo trì hệ thống do giảm được số cảm biến cần lắp đặt trong hệ thống điều khiển.

4.6. Kết luận chương 4

Chương này đã thực hiện được các nội dung cơ bản sau:

- Xây dựng được mô hình thực nghiệm dựa trên cải tiến mô hình do hãng INTECO (Ba Lan) cung cấp. Mô hình thực nghiệm đáp ứng được các yêu cầu khi thử nghiệm các thuật toán điều khiển được xây dựng ở Chương 3.

- Tiến hành thử nghiệm các thuật toán điều khiển trong một vài trường hợp khác nhau để khẳng định tính bền vững của hệ thống cũng như khả năng đáp ứng của hệ thống với các tác động nhiễu từ bên ngoài. Kết quả thử nghiệm chỉ ra một số điều sau:

- Kết quả thực nghiệm cho đáp ứng không tốt bằng so với mô phỏng. Kết quả chỉ ra tính tương đồng về quy luật của hai phương pháp mô phỏng và thực nghiệm;

- Hệ thống điều khiển không cần biết thông tin nhiễu sóng biển nhưng vẫn đáp ứng tốt các yêu cầu trong quá trình làm việc. Đây là một cải tiến mới so với các công trình nghiên cứu trước đó về cần trục đặt trên phao nổi;

- Góc lắc hàng trong tất cả các trường hợp thực nghiệm không thể triệt tiêu nhưng đều dao động ở giá trị biên độ nhỏ. Sở dĩ không thể triệt tiêu hoàn toàn góc lắc là do kích động của để làm cho cần trục dịch chuyển và lắc liên tục. Bộ điều khiển đã góp phần giảm được góc lắc và ổn định dao động của góc lắc khi có thay đổi từ bên ngoài tác động lên cần trục;

- Cơ cấu thích nghi hoạt động tốt ngay cả khi không biết chính xác mô hình toán của hệ thống. Do sai số trong quá trình xấp xỉ các thông số của mô hình nên đáp ứng của bộ điều khiển khi sử dụng thuật toán điều khiển NN-SOSMC về cơ bản không thể tốt bằng bộ điều khiển khi sử dụng thuật toán điều khiển SOSMC;

- Bộ quan sát được tích hợp vào hệ thống cho đáp ứng không tốt bằng hai thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC. Tuy nhiên, các đáp ứng này vẫn đáp ứng được các yêu cầu trong quá trình làm hàng. Khi tích hợp bộ quan sát sẽ giảm chi phí xây dựng và bảo dưỡng hệ thống.

KẾT LUẬN

Luận án đã hoàn thành mục tiêu nghiên cứu được đặt ra là xây dựng hệ thống điều khiển phi tuyến bền vững cho cần trục container đặt trên phao nổi chịu kích động của sóng biển. Hệ thống điều khiển đáp ứng tốt với các yêu cầu làm hàng trong điều kiện chịu kích động của các yếu tố nhiễu ngoài như kích động sóng biển và tải trọng gió. luận án đã đạt được các kết quả cụ thể sau:

Luận án đã phân tích và chỉ ra tiềm năng của việc áp dụng cảng di động tại khu vực cảng có luồng nông và hẹp trong việc trung chuyển hàng hóa. Cảng di động là mô hình vận tải thể hệ mới có tính cơ động cao góp phần phát triển các cảng biển cũng như vận tải thủy nội địa.

Luận án đã mô hình hóa đối tượng điều khiển là cần trục container đặt trên tàu, đây là mô hình phi tuyến phức tạp nhưng gần với thực tế nhất để phân tích động lực học hệ thống cũng như xây dựng các thuật toán điều khiển dựa trên mô hình này. Trên cơ sở phân tích kết quả tính toán động lực học mô hình đối tượng chỉ ra cần thiết phải thiết kế các thuật toán điều khiển để chống lắc hàng và dẫn động các cơ cấu chính xác và an toàn nhất.

Hệ thống điều khiển bền vững với sự thay đổi của nhiễu và thông số hệ thống. Chất lượng các đáp ứng đối với cả ba thuật toán điều khiển SOSMC, NN-SOSMC và OB-SOSMC có tính tương đồng trong cả mô phỏng và thực nghiệm. Trong mô phỏng, cả 3 thuật toán điều khiển đều dẫn động chính xác các cơ cấu và tồn tại dao động cấp năng lớn nhất dưới 3° với một chu kỳ dao động và không tồn tại độ quá điều chỉnh. Nhiệm vụ chính của hệ thống điều khiển là dịch chuyển các cơ cấu đến vị trí yêu cầu một cách chính xác nhất đồng thời giảm góc lắc hàng trong quá trình khai thác. Tuy nhiên, hệ thống điều khiển lại góp phần làm ổn định thân tàu với chu kỳ dao động thân tàu tăng lên so với khi không tích hợp các thuật toán điều khiển.

Luận án đã thiết kế một bộ quan sát Luenberger tích hợp vào thuật toán điều khiển để thực hiện ước lượng giá trị vận tốc. Kết quả chỉ ra rằng bộ điều khiển tích hợp bộ quan sát làm việc tốt với độ hội tụ nhanh, chất lượng các đáp ứng có giá trị gần giống với hai thuật toán điều khiển SOSMC và NN-SOSMC. Đây là cơ sở để áp dụng bộ quan sát vào thực tế chế tạo hệ thống điều khiển cho cần trục container góp phần giảm giá thành chế tạo hệ thống.

Với những kết quả đã đạt được, luận án có thể làm cơ sở cho việc áp dụng các thuật toán điều khiển đã được đề xuất vào thực tế chế tạo hệ thống cần trục để nâng cao chất lượng, hiệu quả làm việc cũng như giảm giá thành chế tạo hệ thống điều khiển.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CÔNG BỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU CỦA ĐỀ TÀI LUẬN ÁN

A. Công bố quốc tế

[1] **Phạm Văn Triêu** and Le Anh Tuan, “Combined Controls of Floating Container Cranes” in *Proceedings of The Fourth International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Changshu, China, October 29-31, 2015.

[2] **Phạm Văn Triêu**, Hoang Manh Cuong, and Le Anh Tuan, “Advanced sliding mode control of floating container cranes” in *Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference*, Hanoi, Vietnam, November 24-26, 2015.

[3] **Phạm Văn Triêu**, Do Duc Luu, Hoang Manh Cuong, and Le Anh Tuan, “Neural network integrated sliding mode control of floating container cranes” in *Proceedings of The 11th Asian Control Conference*, Gold Coast, Australia, December 17-20, 2017.

[4] Le Anh Tuan, Hoang Manh Cuong, **Phạm Văn Triêu**, Luong Cong Nho, Vu Duc Thuan, and Le Viet Anh, “Adaptive neural network sliding mode control of shipboard container cranes considering actuator backlash”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018. 112: p. 233-250.

[5] Le Viet Anh, Le Xuan Hai, Vu Duc Thuan, **Phạm Văn Triêu**, Hoang Manh Cuong, and Le Anh Tuan, “Designing an Adaptive Controller for 3D Overhead Cranes using Hierarchical Sliding Mode and Neural Network” in *Proceedings of The International Conference on System Science and Engineering 2018 (ICSSE 2018)*, Taipei, Taiwan, Jun 28-30, 2018.

[6] Le Anh Tuan, Quang Ha, and **Phạm Văn Triêu**, “Observer-based nonlinear robust control of floating container cranes subject to output hysteresis”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2019.141:p.11102-1-11.

B. Công bố trong nước

[7] **Phạm Văn Triêu**, Hoàng Mạnh Cường, Lê Anh Tuấn (2015), "*Động lực học cần trục container đặt trên tàu có kể đến tính đàn hồi của cáp*", Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải - Số 42/2015.

[8] **Phạm Văn Triêu**, Hoàng Mạnh Cường, Lê Anh Tuấn (2017), "*Phân tích động lực học cần trục container khi coi container là vật rắn chuyển động song phẳng* ", Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải - Số 51/2017.

[9] **Phạm Văn Triêu**, Hoàng Mạnh Cường, Lê Anh Tuấn, "*Điều khiển thích nghi trượt tích hợp mạng nơ ron cho cần trục container gắn trên tàu* ", Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 4 về Điều khiển và Tự động hoá VCCA 2017.

[10] **Phạm Văn Triêu**, Hoàng Mạnh Cường, Lê Anh Tuấn, "*Nghiên cứu thực nghiệm hệ thống điều khiển công trục nổi*", Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 02/2019

[11] Lê Anh Tuấn, **Phạm Văn Triêu**, "*Điều khiển thích nghi bền vững cần trục tháp với tham số thay đổi*", Hội nghị toàn quốc lần thứ ba về Điều khiển và Tự động hóa VCCA 2015.

C. Đề tài nghiên cứu khoa học đã nghiệm thu

[12] Chủ nhiệm đề tài (2018), "*Nghiên cứu thiết kế, chế tạo mô hình cần cầu đặt trên phao nổi phục vụ xếp dỡ container tại các cảng biển của Việt Nam*", Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ (Bộ Giao thông vận tải), Mã số DT184028, đã được nghiệm cấp bộ 16/01/2018, đạt loại A.