

Giải pháp giảm rung của vật nâng và móc treo trong mô hình xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do để nâng cao năng suất và an toàn khi sử dụng cần trục bằng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần

Lê Hồng Quân^{1*}, Trịnh Bích Ngọc¹, Phạm Văn Uy²

¹ Khoa Cơ khí - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

² Tổng Công ty Đầu tư và Kinh doanh vốn Nhà nước (SCIC)

TỪ KHOẢ

Mô hình xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do
Bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần
Móc treo và tải nâng
Cần trục xây dựng
Phân tích sự ổn định của hệ thống điều khiển theo lý thuyết của Lyapunov
Mặt phẳng chứa cần

TÓM TẮT

Khi vận hành xe con cần trục ở tốc độ nhanh sẽ gây ra sự lắc của tải trọng nâng và móc treo với biên độ lớn, điều này gây các bất lợi đối với sự an toàn, độ dừng chính xác của vật nâng, tính hiệu quả của các chuyển động cần trục cũng như năng suất của cần trục đặc biệt là khi sử dụng các cần trục thông minh cho các nhiệm vụ lắp ghép tự động. Bài báo này trình bày sự nghiên cứu về phương pháp điều khiển kiểu trượt áp dụng cho bài toán giảm rung lắc của móc treo và tải nâng trong mô hình xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do. Về mặt thực tế, các vận tốc góc của vật nâng và móc treo là luôn luôn bị dao động trong hầu hết các chuyển động cần trục. Một vấn đề có tính thực tiễn như vậy rất cần một bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần có ưu điểm rất mạnh đó là nó có khả năng tạo ra sự bền vững rất cao trong hệ thống và đa năng để giảm rung động của móc treo và vật nâng một cách nhanh chóng. Bài báo đầu tiên trình bày tính tổng quan và tính cấp thiết khi sử dụng các phương pháp điều khiển để dập tắt móc treo và vật nâng. Tiếp theo là trình bày một số vấn đề cơ bản về phương pháp điều khiển kiểu trượt. Thứ ba là một bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần được thiết kế và được áp dụng cho mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Thứ tư là sự phân tích sự ổn định của hệ thống điều khiển tăng dần được minh chứng theo lý thuyết ổn định của Lyapunov. Thứ năm là một số kết quả mô phỏng bằng số bằng chương trình Matlab để hỗ trợ thiết kế điều khiển kiểu trượt tăng dần. Cuối cùng là các nhận xét về các kết quả mô phỏng bằng số và kết luận.

KEYWORDS

Two degrees of freedom-pendulum crane trolley model
An incremental sliding controller
Hook and payload
Construction cranes
Control system stability analysis in the sense Lyapunov
Jib plane

ABSTRACT

Fast crane trolley motions when rigging object cause large amplitude vibrations of hook and payload. These are disadvantages related to safety, precision stop motions and in increasing cranes production capacity, especially when using intelligent construction cranes for automation erections. This paper presents the investigation of the sliding – mode motion control method for the anti-sway problem of two degrees of freedom pendulum-type crane trolley model. Practically, the angular velocities of hook and payload are always oscillated in most crane operations. Such a practical problem needs an incremental sliding -mode controller that has a high robustness to solve the problem. This paper firstly starts with the overview about the crane trolley control methods for reducing the vibrations of the payload and hook in the single degree of freedom and two degree of freedoms models, Secondly, are some basic concepts about the sliding-mode motion control method. Thirdly, an incremental sliding-mode motion controller was designed and applied for two degrees of freedom-pendulum type crane trolley model in the jib plane. Fourthly, the system stability analysis is also proven in the sense of Lyapunov. Fifthly, numerical simulation results in Matlab are presented to support for the designed incremental sliding-mode motion controller. Finally, comments about the numerical simulation outcomes and conclusion.

1. Đặt vấn đề

Cần trục xây dựng là các máy nâng được sử dụng rộng rãi trong các môi trường xây dựng công nghiệp ở Việt nam và trên thế giới do chúng có ưu điểm là có sức nâng, chiều cao nâng và tầm với là rất

lớn. Cần trục có nhiều dạng khác nhau, theo các tính chất động lực học thì cần trục xây dựng thường được phân sơ bộ ra làm 3 nhóm đó là: nhóm cần trục kiểu cầu; nhóm cần trục tự hành và nhóm cần trục tháp. Trong 3 loại nhóm cần trục này thì vị trí của điểm nối cáp nâng của chúng có thể được mô tả bằng một hệ tọa độ đề các. Trong không

*Liên hệ tác giả: quanlh@huce.edu.vn

Nhận ngày 06/01/2024, sửa xong ngày 14/03/2024, chấp nhận đăng ngày 18/03/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2024.656>

gian hệ tọa độ để các thì việc sử dụng các cần trục chịu sự lắc tự nhiên của tải trọng nâng vốn đã được mô tả giống như chuyển động của con lắc. Thông thường, khi tải trọng nâng của các cần trục càng lớn và được nâng với vận tốc lớn thì sẽ dẫn đến sự lắc rất lớn và việc kéo dài sự lắc của tải trọng nâng và móc treo, điều này sẽ kéo theo độ an toàn, độ dừng chính xác, thời gian vận chuyển hàng hóa và năng suất phục vụ của cần trục nói chung là thấp. Để tìm được giải pháp nâng cao được năng suất của cần trục cũng như nâng cao được độ an toàn khi sử dụng cần trục xây dựng, giảm tải trọng động tác động lên hệ kết cấu thép của cần trục thì vấn đề nghiên cứu giải pháp điều khiển giảm rung động của móc treo và vật nâng là hết sức cần thiết vì rằng móc treo và vật nâng trong mô hình toán học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do luôn có những chuyển động không ổn định, gây ra rung lắc lớn trong hầu hết các trường hợp đặc biệt là khi sức nâng và tốc độ của các cơ cấu công tác là lớn, điều này dẫn đến kéo dài thời gian thời gian của một chu kỳ lắp ghép và sự tích lũy thời gian dao động của móc treo và vật nâng trong hàng ngàn chu kỳ lắp ghép sẽ dẫn đến thiệt hại hàng tỷ USD khi chúng ta chế tạo và sử dụng các cần trục mà không được nghiên cứu tìm giải pháp điều khiển giảm rung động cho móc treo và tải trọng nâng. Để các vấn đề nêu trên được cải thiện theo hướng tích cực hơn thì bài toán điều khiển chống lắc cho xe con cần trục khi mang tải trọng nâng đã trở thành một trong những chủ đề nghiên cứu trọng tâm trong khoảng 2 thập kỷ gần đây do rất nhiều các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước quan tâm. Trước đây, các công trình nghiên cứu điều khiển dập tắt dao động của vật nâng được treo dưới cáp treo của xe con cần trục được mô hình hóa ở dạng con lắc một bậc tự do, tuy nhiên ở dạng mô hình này là khá đơn giản và không phản ánh chính xác được với kết cấu xe con cần trục thực tế, do đó các bộ phận điều khiển đã được thiết kế để chống lại sự dao động của tải trọng nâng trong mô hình con lắc một bậc tự do đã không đáp ứng được như đã kỳ vọng. Ở một số điều kiện vận hành, móc treo và tải trọng nâng nên được mô hình hóa bằng hai điểm khối lượng phân tán thay vì một điểm khối lượng tập trung như mô hình con lắc một bậc tự do. Giả thiết điểm khối lượng phân tán này dẫn đến mô hình động lực học con lắc hai bậc tự do (là tổ hợp 2 loại chuyển động con lắc với các tần số dao động riêng) và với giả thiết như vậy thì hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do là hệ bị hực cơ cấu chấp hành (còn gọi là hệ bất định) và việc điều khiển mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do có thể sử dụng nhiều phương pháp điều khiển hơn với kỳ vọng có thể có chất lượng điều khiển chống rung lắc tốt hơn so với mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do. Hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do là một hệ phi tuyến bất định (hệ hực cơ cấu chấp hành), do đó một trong những phương pháp khả thi để giải quyết bài toán điều khiển hệ bất định như vậy là áp dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần. Một hệ thống điều khiển biến đổi kiểu trượt tăng dần có một định luật điều khiển biến đổi một cách chắc chắn trong quá trình điều khiển dựa trên một số nguyên tắc cài đặt trước. Ưu điểm của phương pháp điều khiển trượt tăng dần đó là giải pháp điều khiển đơn giản nhưng lại cho một chất lượng bền vững

rất cao. Tuy nhiên, do tín hiệu tạo ra từ bộ điều khiển trượt tăng dần lại là hàm không liên tục nên sẽ tạo ra rung động trong hệ thống, đây là một hiệu ứng không tốt và cũng là nguyên nhân làm giảm tuổi thọ nhiều thiết bị trong hệ thống. Chính vì lý do này nên việc nghiên cứu chống rung cho móc treo và vật nâng theo mô hình toán học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần bằng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần mang tính cấp thiết quan trọng để tiến tới ứng dụng trong thực tiễn điều kiện Việt Nam vì đây là giải pháp chống rung phổ quát với kỳ vọng mang lại hiệu quả giảm rung tốt hơn so với các phương pháp điều khiển chống rung cổ điển khác vì vấn đề này rõ ràng mang lại lợi ích rất lớn về mặt kinh tế và kỹ thuật. Trong khoảng hơn hai thập niên trở lại đây, đặc biệt là chủ đề nghiên cứu và ứng dụng điều khiển xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do, có thể kể đến như hệ thống điều khiển vòng kín điển hình như phương pháp điều khiển tuyến tính trong công trình nghiên cứu của Abdel-Rahman và các tác giả vào năm 2003 [1], phương pháp điều khiển theo sự thay đổi của chiều dài cáp nâng của Tuan và các tác giả [2, 3], phương pháp điều khiển hiện đại dựa trên sự tuyến tính hóa phản hồi từng phần của Wu và các tác giả [4], phương pháp điều khiển dựa vào năng lượng theo lý thuyết ổn định của Lyapunov điển hình như các công trình nghiên cứu của Maschke và các tác giả [5] của Karkoub và Zribi [6], phương pháp điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động của Guo và các tác giả [7], của Collado và các tác giả [8]. Phương pháp điều khiển bước giật lùi thích nghi của Cao và các tác giả [9], phương pháp điều khiển thích nghi của Yang and Yang [10], phương pháp điều khiển bền vững của Yang and O'Connor [11] và của Uchiyama [12], phương pháp điều khiển theo mô hình tiên lượng của Deng and Becerra [13], phương pháp điều khiển thông minh [14] và các công trình nghiên cứu điều khiển dao động vật nâng khác mà có thể được kể đến như: các phương pháp điều khiển qui hoạch đường chuyển động tối ưu của vật nâng chẳng hạn như điều khiển bài toán qui hoạch chuyển động tối ưu của Ross and Fahroo [15], phương pháp qui hoạch động và qui hoạch tuyến tính quỹ đạo chuyển động của vật nâng như của Zameroski và các tác giả [16] và Da Cruz và các tác giả [17]. Ngoài ra còn có các phương pháp tạo hình dạng lệnh dựa trên hệ thống chuyên gia của French và các tác giả [18] của Singhose và các tác giả, phương pháp tạo hình dạng tín hiệu lệnh đầu vào [19, 20].

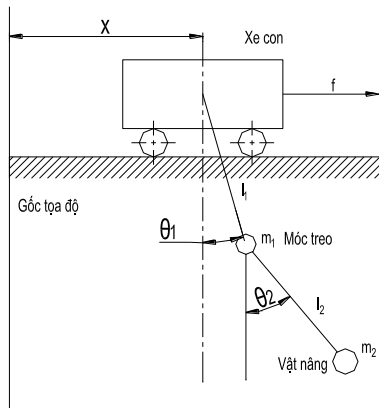
Ở trong nước, về mặt lý thuyết cũng đã có một số tác giả thực hiện các nghiên cứu điều khiển giảm dao động vật nâng trong mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do bằng một số phương pháp điều khiển phổ biến, tuy nhiên chất lượng điều khiển vẫn chưa cao và việc ứng dụng, triển khai vào thực tế sản xuất là chưa có do bí quyết công nghệ, đa phần vẫn sử dụng các phương pháp điều khiển theo khởi động từ, công tắc tơ, máy biến tần để cài đặt và điều khiển tần số dòng điện cấp cho động cơ dẫn động cơ cấu sử dụng trong giảng dạy và sản xuất. Việc triển khai ứng dụng các giải pháp điều khiển giảm rung cho móc treo và xe con bằng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần ngoài thực tế hầu như là chưa có và có chăng chỉ là dùng làm tài liệu phục vụ cho mục đích đào tạo. Một số

công trình nghiên cứu tiêu biểu trong nước có thể kể đến như: Điều khiển chống rung cho cầu tháp bằng phương pháp điều khiển tiên định của Phạm Lê Công và các tác giả [32], điều khiển cầu trục kết hợp chống rung lắc và tránh vật cản của Lê Mạnh Quý và các tác giả [33], trong luận văn thạc sỹ kỹ thuật, tác giả Nguyễn Văn Hùng cũng đề cập đến việc nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm, khảo sát động lực học và khả năng điều khiển ổn định của vật nâng theo phương ngang khi di chuyển xe con cầu trục được mô hình hóa ở dạng con lắc một bậc tự do [34], điều khiển chống rung cho cầu trục ba chiều bằng phương pháp Hybrid Shape của Tường Xuân Thường và các tác giả [35], Điều khiển mô hình con lắc ngược sử dụng bộ điều khiển RQL với hai vòng phản hồi của các tác giả Cao Xuân Cường và Trần Đình Khôi Quốc [36]. Chủ đề điều khiển chống rung lắc cho mô hình động lực học xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do ở ngoài nước đã và đang là chủ đề có tính thời sự và được các nhà nghiên cứu quan tâm ngày càng nhiều hơn vì những ưu điểm là có thể mang lại độ chính xác cao hơn, sát với kết cấu thực tế hơn và có thể sử dụng nhiều phương pháp điều khiển hơn chẳng hạn như phương pháp điều khiển thụ động, phương pháp điều khiển theo hệ mờ, phương pháp điều khiển dựa trên cơ sở phản hồi đầu ra. Một số nhà nghiên cứu đã gợi ý sử dụng điều khiển theo hệ thống điều khiển vòng kín để triệt tiêu các dao động của vật nâng và móc treo trong mô hình hai bậc tự do [21, 22]. Tuy nhiên đối với hệ thống điều khiển theo vòng kín thì gặp rất nhiều khó khăn trong việc đo lường dao động của tải trọng nâng và móc treo và cho đến nay thì đã có một số nghiên cứu điều khiển mô hình xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do theo hệ thống điều khiển vòng kín rất phức tạp và rất đắt đỏ (theo như báo giá của các hãng chế tạo cầu trục của các nước Tây Phương chào hàng khoảng 200.000 usd/bộ) chẳng hạn như phương pháp điều khiển theo kỹ thuật thụ động của Ortega và các tác giả [23, 30], phương pháp điều khiển theo hệ mờ dựa trên các mô đun lệnh một đầu vào của Qian và các tác giả [24]. Theo đó bộ điều khiển trong [24] gồm có 6 mô đun lệnh một đầu vào là các trọng số động lực học. Ở trong nước, việc nghiên cứu điều khiển triệt tiêu dao động của vật nâng và móc treo trong hệ xe con cầu trục ở dạng mô hình con lắc hai bậc tự do là đang còn khá hạn chế và việc triển khai ứng dụng ngoài thực tiễn lại càng hạn chế hơn vì tính quá phức tạp, tính vi của công nghệ cũng như thiếu chi phí đầu tư thử nghiệm ứng dụng với giá thành cao. Theo cập nhật tốt nhất của chúng tôi thì tại Việt nam việc nghiên cứu giảm góc lắc của vật nâng và móc treo để nâng cao tốc độ làm việc của các cơ cấu công tác của xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do có thể kể đến như đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường trọng điểm năm 2017 của tác giả Lê Hồng Quân [38] đã thực hiện nghiên cứu mối quan hệ giữa các gia tốc và góc lắc tương ứng của cáp nâng trong mô hình xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do để xây dựng nên đường quỹ đạo gia tốc theo thời gian thực để làm cơ sở cài đặt cho máy biến tần điều khiển động cơ của cơ cấu quay cầu trục theo hệ thống vòng hở nhằm giảm góc lắc của cáp nâng theo phương tiếp tuyến với trục quay của máy (tức là trong mặt phẳng ngang) nhằm nâng cao tốc độ làm việc và độ an toàn trong điều

kiện Việt Nam. Tuy nhiên nỗ lực nghiên cứu này cũng chỉ dừng lại ở lý thuyết và đặc biệt là chưa thể tiến tới thử nghiệm, ứng dụng và triển khai ngoài thực tế sản xuất. Tương tự, vào các năm 2021 và 2022, tác giả Lê Hồng Quân tiếp tục thực hiện các đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường [39, 40] đó là nghiên cứu giải pháp điều khiển chống rung cho vật nâng và móc treo ở dạng hai bậc tự do bằng phương pháp điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào và dựa trên cơ sở phản hồi đầu ra trong mặt phẳng chứa cần, kết quả mô phỏng hỗ trợ cho thiết kế điều khiển tại các nghiên cứu này cho thấy các phương pháp rất phức tạp tuy nhiên chất lượng điều khiển tốt hơn nhiều so với việc điều khiển mô xe con cầu trục ở dạng con lắc một bậc tự do. Để có sự nhận định tổng quát xem phương pháp điều khiển nào là có hiệu quả, chất lượng điều khiển cao nhất trong các phương pháp thì việc nghiên cứu thêm các phương pháp điều khiển áp dụng cho mô hình xe con cầu trục hai bậc tự do là rất cần thiết và các kết quả mô phỏng trên máy tính bằng phần mềm Matlab để hỗ trợ các bộ điều khiển sẽ cho chúng ta thấy được hiệu quả, chất lượng điều khiển của phương pháp điều khiển tốt nhất để các hãng sản xuất cầu trục trong nước có thể tiến hành thử nghiệm ngoài thực tế và lựa chọn ứng dụng. Chính vì vậy năm 2023 tác giả Lê Hồng Quân tiếp tục đăng ký và thực hiện đề tài nghiên cứu giải pháp điều khiển chống rung cho vật nâng và móc treo bằng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần và kết quả mô phỏng bằng số trên phần mềm Matlab để hỗ trợ cho thấy chất lượng điều khiển của phương pháp điều khiển này là cao nhất trong các phương pháp điều khiển mà tác giả đã thực hiện ở trên. Ngoài ra còn có công trình nghiên cứu tổng quan chiến lược áp dụng các kỹ thuật điều khiển vòng hở dựa trên tín hiệu đầu vào để điều khiển hệ thống xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do của Nguyễn Văn Trung và các tác giả [31]. Như vậy rõ ràng việc nghiên cứu các phương pháp điều khiển để giảm rung động cho móc treo và vật nâng trong mô hình xe con cầu trục ở mô hình hai bậc tự do so với mô hình một bậc tự do ở trong nước là còn rất khiêm tốn và hiệu quả điều khiển mô hình xe con ở dạng con lắc hai bậc tự do rõ ràng là tốt hơn nhiều so với mô hình xe con một bậc tự do. Vì vậy thực hiện nghiên cứu ứng dụng phương pháp điều khiển dựa trên cơ sở phản hồi đầu ra áp dụng cho mô hình xe con cầu trục ở dạng hai bậc tự do để giảm rung động cho móc treo và vật nâng là hết sức cấp thiết vì rằng các vận tốc góc của móc treo và vật nâng là luôn dao động trong hầu hết các trường hợp cầu trục làm việc góp phần làm tăng năng suất của cầu trục, giảm thiểu nguy cơ tai nạn trên công trường gây trì hoãn tiến độ xây dựng, giảm tải trọng động tác dụng lên kết cấu thép của máy, giảm phát sinh chi phí xây dựng do kiện tụng đồng thời nâng cấp các đặc tính kỹ thuật của các cầu trục do các tập toàn thiết kế chế tạo cầu trục xây dựng của Việt Nam đồng thời sử dụng kết quả nghiên cứu làm chuyên đề phục vụ cho các mục đích giảng dạy, tham khảo cho sinh viên các bậc Đại học và Sau Đại học thuộc chuyên ngành cơ khí động lực và điều khiển, Máy Xây dựng và Cơ giới hóa Xây dựng cũng như cùng với các chuyên gia hướng tới triển khai áp dụng ngoài thực tế sản xuất. Như vậy từ các lập luận nêu trên thì mục tiêu của bài báo này bao gồm các nội dung:

- + Giới thiệu về mô hình toán học xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần và phương trình vi phân chuyển động
- + Giới thiệu chung về phương pháp điều khiển kiểu trượt
- + Thiết kế bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần áp dụng cho mô hình xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do
- + Phân tích ổn định của hệ thống điều khiển kiểu trượt tăng dần theo lý thuyết của Lyapunov
- + Hỗ trợ bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần về mặt lý thuyết bằng sử dụng phần mềm Matlab mô phỏng bằng số.
- + Các nhận xét về kết quả mô phỏng bằng số để cho thấy tính khả thi và hiệu quả của phương pháp
- + Kết luận

2. Mô hình toán học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do và phương trình vi phân mô tả chuyển động



Hình 1. Mô hình toán học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do.

Mô hình toán học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do sát với thực tế hơn so với mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do và được mô tả tại Hình 1, dưới tâm xe con hoặc tâm pully đỉnh cần (đối với cần trục tự hành) là thanh cứng không trọng lượng có chiều dài l_1 treo khối lượng móc treo m_1 và phía dưới móc treo là dây treo hàng có chiều dài l_2 để treo vật nặng có khối lượng m_2 . Giả thiết rằng các chiều dài l_1 và l_2 là không thay đổi. Xe con cần trục có khối lượng m_0 được di chuyển dưới tác động của lực phát động f . Gọi θ_1 và θ_2 lần lượt là các góc lắc của các khối lượng tập trung m_1 và m_2 quanh vị trí cân bằng thẳng đứng, g là gia tốc trọng trường và x là bậc tự do mô tả vị trí của xe con so với gốc tọa độ. Các phương trình mô tả động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do đã được khảo sát và tuyến tính hóa tại [39]. Tại mục này chúng tôi chỉ trình bày lại phương trình vi phân của hệ dao động tự do của xe con cần trục được mô tả ở dạng con lắc hai bậc tự do sau khi được tuyến tính hóa:

$$\bar{M}\ddot{q} + Kq = 0 \tag{1}$$

Trong đó: \bar{M} và K là các ma trận khối lượng và ma trận độ cứng được xác định như sau:

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} m_0 + m_1 + m_2 & (m_1 + m_2)l_1 & m_2l_1l_2 \\ (m_1 + m_2)l_1 & (m_1 + m_2)l_1^2 & m_2l_1l_2 \\ m_2l_1l_2 & m_2l_1l_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m_1 + m_2)gl_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2gl_2 \end{bmatrix}$$

Theo khái niệm của không gian trạng thái, phương trình (1) cũng có thể được viết bằng một tập các phương trình vi phân thông thường bậc một như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_1(x) + b_1(x)u \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= f_2(x) + b_2(x)u \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= f_3(x) + b_3(x)u \end{aligned} \tag{2}$$

Ở đây x được xác định bởi $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$; $x_1 = x$; $x_3 = \theta_1$; $x_5 = \theta_2$; x_2 là vận tốc xe con; x_4 là vận tốc góc của móc treo; x_6 là vận tốc góc của tải trọng nâng; $u = f$ ký hiệu cho tín hiệu đầu vào điều khiển (chính là lực phát động của động cơ dẫn động xe con); $f_i(x)$ và $b_i(x)$ ($i = 1, 2, 3$) là các hàm phi tuyến của vector x , được xác lập bởi $f_i(x) = \Gamma_i/\Delta$ và $b_i(x) = T_i/\Delta$. Ở đây Γ_i , T_i , và Δ được xác định trong [39].

Giải các định thức của ma trận $\bar{M}K$ ta sẽ tìm ra được các tần số dao động riêng của các khối lượng tập trung m_1 và m_2 lần lượt là ω_1 và ω_2 theo các tham số vật lý của xe con cần trục như l_1, l_2, m_1, m_2

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{2}(\alpha - \sqrt{\beta})} \tag{3}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g}{2}(\alpha + \sqrt{\beta})} \tag{4}$$

Trong đó:

$$\alpha = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right)$$

$$\beta = \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1} \right)^2 \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right)^2 - 4 \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) \frac{1}{l_1l_2}$$

3. Giới thiệu chung về phương pháp điều khiển kiểu trượt

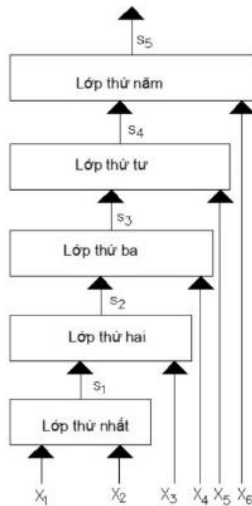
Điều khiển kiểu trượt còn được gọi là điều khiển biến đổi cấu trúc kiểu trượt hoặc điều khiển biến đổi cấu trúc có dạng trượt [25, 26]. Trong hai tên gọi phương pháp điều khiển nêu trên thì điều khiển kiểu trượt thường liên quan đến điều khiển biến đổi cấu trúc và nó có mối quan hệ mật thiết với điều khiển biến đổi cấu trúc. Để hiểu về điều khiển kiểu trượt thì dưới đây, chúng tôi giới thiệu một số thông tin cơ bản về phương pháp điều khiển biến đổi cấu trúc.

Điều khiển biến đổi cấu trúc đã có từ rất lâu. Phương pháp điều khiển này ban đầu được sử dụng rộng rãi cho đến khi nó được V.I. Utkin [27] công bố chính thức. Theo tên của phương pháp điều khiển này thì một hệ thống điều khiển biến đổi cấu trúc có một qui luật điều khiển được thay đổi và được tính toán kỹ càng trong quá trình điều khiển dựa trên một số nguyên tắc được xác định trước. Một hệ thống điều khiển kiểu trượt thông thường bị ảnh hưởng bởi hiện tượng ngắt quãng. Sự ngắt quãng là một nhược điểm cố hữu của hệ thống điều khiển kiểu trượt, đây cũng là một khoảng cách giữa hệ thống điều

kiểu kiểu trượt và các ứng dụng thực tế. Nhằm tạo ra thiết kế điều khiển trên cơ sở kiểu trượt có thể ứng dụng được thì thiết kế điều khiển kiểu trượt dựa trên điều khiển tương đương xuất hiện và lắp đi khoảng cách giữa hệ thống điều khiển kiểu trượt và các ứng dụng thực tế. Một ưu điểm rất mạnh của hệ thống điều khiển kiểu trượt đó là nó có khả năng tạo ra sự bền vững rất cao trong hệ thống và đa năng. Vì vậy việc áp dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần áp dụng cho mô hình xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do là rất cần thiết để giảm rung của móc treo và vật nâng một cách nhanh chóng.

4. Thiết kế bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần áp dụng cho mô hình xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do

Do bản chất của sự bền vững rất cao, phương pháp điều khiển kiểu trượt đa năng đã nhận được sự quan tâm đáng kể của các nhà khoa học. Xét sơ đồ hệ thống xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần tại hình 1. Dạng kết cấu vật lý này có thể được phân thành ba thành phần đó là xe con, móc treo và tải nâng. Sơ đồ điều khiển kiểu trượt tăng dần được trình bày tại hình 2 dưới đây.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển kiểu trượt tăng dần.

Tại phương trình vi phân toán học mô tả xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do (1). Có 6 biến trạng thái để mô tả hệ thống xe con cần trục. Kết quả là một dạng mới của cấu trúc bề mặt trượt có thể được thiết lập bằng cách gia tăng số biến để tạo ra cấu trúc phân cấp các bề mặt trượt. Ý tưởng cơ bản đằng sau dạng cấu trúc phân cấp tăng dần [28] được diễn giải như sau:

Xét phương trình vi phân toán học mô tả xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần (2). Đầu tiên là việc chọn hai biến trạng thái tùy ý để thiết lập bề mặt trượt lớp thứ nhất, tiếp theo tăng thêm một biến trạng thái để xây dựng bề mặt trượt lớp thứ hai có biến bề mặt trượt lớp thứ nhất. Quá trình này

tiếp diễn cho đến khi tất cả các biến trạng thái hệ thống được kể đến. Cấu trúc phân lớp tăng dần được phát triển bởi sự gia tăng tổng quát của các biến trạng thái của hệ thống. Khi mô hình xe con cần trục có 6 biến trạng thái, các bề mặt trượt tăng dần của hệ thống điều khiển xe con cần trục sẽ có tương ứng là 5 lớp được mô tả như tại hình 2.

4.1. Thiết kế bộ điều khiển

Bước đầu tiên của thiết kế kiểu trượt tăng dần là xây dựng cấu trúc tăng dần của các bề mặt trượt. Xét phương trình vi phân toán học mô tả xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần (2), ta thấy rằng, tại phương trình này có đến 6 biến trạng thái trong mô hình xe con cần trục. Như đã đề cập tại phần đầu, hai biến trạng thái tùy ý có thể được tận dụng để thiết lập công thức bề mặt trượt lớp thứ nhất, không mất tính tổng quát, các biến trạng thái x_1 và x_2 tại phương trình (2) được chấp thuận sao cho bề mặt trượt lớp thứ nhất có dạng như sau:

$$s_1 = \alpha_1(x_1 - x_d) + \alpha_2x_2 \tag{5}$$

Ở đây α_1 và α_2 là các hằng số.

Bề mặt trượt lớp thứ 2 được xây dựng bằng sự kết hợp tuyến tính của biến bề mặt trượt lớp thứ nhất s_1 và một biến trạng thái. Không mất tính tổng quát, x_3 được đưa lên sao cho bề mặt trượt lớp thứ hai có dạng như sau:

$$s_2 = \alpha_3x_3 + s_1 \tag{6}$$

Một cách tương tự, ba lớp bề mặt trượt khác có dạng như sau:

$$s_3 = \alpha_4x_4 + s_2 \tag{7}$$

$$s_4 = \alpha_5x_5 + s_3 \tag{8}$$

$$s_5 = \alpha_6x_6 + s_4 \tag{9}$$

Ở đây α_4, α_5 và α_6 là các hằng số

Từ thiết kế điều khiển đã nêu ở trên, sáu biến điều khiển α_i ($i = 1, \dots, 6$) cần được thiết kế theo cấu trúc phân cấp. Trong thực tế, sự điều chỉnh tham số của thiết kế như vậy là một nhiệm vụ rất mất thời gian.

Để đạt được mục tiêu của bài toán điều khiển vận chuyển, định luật điều khiển kiểu trượt phân cấp tăng dần được xác định như sau:

$$u = u_{eq} + u_{sw} \tag{10}$$

Tại phương trình (10) thì u_{eq} là qui luật điều khiển tương đương và u_{sw} là qui luật điều khiển chuyển đổi. Như đã trình bày thì điều khiển kiểu trượt có thể tạo ra hiện tượng ngắt quãng. Tuy nhiên qui luật điều khiển kiểu trượt dựa trên điều khiển tương đương (10) có thể tạo ra sự giảm về hiện tượng ngắt quãng.

Qui luật điều khiển (7) có thể được suy ra từ phương pháp trực tiếp Lyapunov. Nhằm để có được sự ổn định của bề mặt trượt lớp cuối cùng (9), hàm Lyapunov có thể được xác định như sau:

$$V(t) = \frac{1}{2}s_5^2 \tag{11}$$

Hàm số tại phương trình (11) cho thấy rằng qui luật điều khiển (10) được thiết kế để ổn định tiệm cận bề mặt trượt lớp cuối cùng. Lấy đạo hàm V tại phương trình (11) theo thời gian t ta có:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{ds_5} \frac{ds_5}{dt} = s_5 \dot{s}_5 = s_5 \frac{d(\alpha_6x_6 + s_4)}{dt} \tag{12}$$

Xét mô hình xe con cần trục trong mặt phẳng chứa cần và các bề mặt kiểu trượt phân cấp và thay các phương trình này vào trong

phương trình (12). Sau đó phương trình (12) được viết lại dưới dạng như sau:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= s_5[\alpha_6(f_3 + b_3u) + \alpha_5\dot{x}_5 + \dot{s}_4] \\ &= s_5[\alpha_6(f_3 + b_3u) + \alpha_5x_6 + \alpha_4\dot{x}_4 + \dot{s}_3] \\ &= s_5[\alpha_6(f_3 + b_3u) + \alpha_5x_6 + \alpha_4(f_2 + b_2u) + \dot{s}_2] \\ &= s_5[\alpha_6(f_3 + b_3u) + \alpha_5x_6 + \alpha_4(f_2 + b_2u) + \alpha_3x_4 + \dot{s}_1] \\ &= s_5[\alpha_6(f_3 + b_3u) + \alpha_5x_6 + \alpha_4(f_2 + b_2u) + \alpha_3x_4 + \alpha_2(f_1 + b_1u) \\ &\quad + \alpha_1x_2] \end{aligned} \quad (13)$$

Từ phương trình (11), $V(t) \geq 0$. Theo lý thuyết của Lyapunov, $V(t) < 0$ sẽ tồn tại tại phương trình (13) để có sự ổn định của bề mặt trượt lớp cuối cùng. Để nhận ra mục tiêu, qui luật điều khiển tương đương và qui luật điều khiển chuyển đổi tại phương trình (10) được xác định như sau:

$$u_{eq} = -\frac{\alpha_1x_2 + \alpha_2f_1 + \alpha_3x_4 + \alpha_4f_2 + \alpha_5x_5 + \alpha_6f_3}{\alpha_2b_1 + \alpha_4b_2 + \alpha_6b_3} \quad (14)$$

Và

$$u_{sw} = -\frac{\eta s_5 + \kappa \text{sgn}(s_5)}{\alpha_2b_1 + \alpha_4b_2 + \alpha_6b_3} \quad (15)$$

ở đây η và κ là các hằng số xác định dương.

Thay các phương trình (14) và (15) vào trong phương trình (13) ta có:

$$\dot{V} = -\eta s_5^2 - \kappa |s_5| \leq 0 \quad (16)$$

Do đạo hàm của V chỉ là phía bên trái của điều kiện tiếp cận của bề mặt trượt lớp cuối cùng, phương trình (16) cho thấy biến bề mặt trượt lớp cuối cùng s_5 không chỉ có sự ổn định tiệm cận mà chuyển động trượt của nó là có thể tiếp cận trong thời gian hữu hạn. Từ thiết kế điều khiển, vẫn còn các bề mặt trượt phân cấp khác. Tuy nhiên sự ổn định của chúng là được giữ liên tục. Để có các sự ổn định của tất cả các bề mặt trượt phân cấp thì sự phân tích ổn định sau đây được thực hiện.

4.2. Phân tích sự ổn định của bộ điều khiển

Phát biểu định lý: xét phương trình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do (2), việc thiết kế cấu trúc tăng dần của các bề mặt trượt phân cấp (5), (6), (7), (8) và (9), xác định qui luật điều khiển (10) và chấp nhận qui luật điều khiển tương đương (14) và qui luật điều khiển chuyển đổi (15). Như vậy tất cả các bề mặt trượt tăng dần là ổn định tiệm cận nếu các điều kiện sau đây (17), (18), và (19) là luôn đúng.

$$\alpha_5 = \begin{cases} \alpha_5 & \text{if } x_5s_3 \geq 0 \\ -\alpha_5 & \text{if } x_5s_3 \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\alpha_4 = \begin{cases} \alpha_4 & \text{if } x_4s_2 \geq 0 \\ -\alpha_4 & \text{if } x_4s_2 \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\alpha_3 = \begin{cases} \alpha_3 & \text{if } x_3s_1 \geq 0 \\ -\alpha_3 & \text{if } x_3s_1 \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{gn}(\alpha_2, \alpha_1) \geq 0 \quad (20)$$

Chứng minh định lý: Do cấu trúc phân cấp đã thiết kế có sự ổn định của các bề mặt trượt phân cấp ghép lại với nhau. Nhằm để

đạt được mục đích này, sự ổn định của chúng sẽ được xem xét từng lớp một.

1) Sự ổn định của s_5 : Theo thiết kế điều khiển, qui luật điều khiển (10) có thể được đảm bảo ổn định tiệm cận của s_5 . Hơn nữa biến bề mặt trượt lớp cuối cùng không chỉ có sự ổn định được đảm bảo mà kiểu trượt của nó cũng có thể tiếp cận tại thời gian hữu hạn t_r .

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s_5 = 0$$

2) Các sự ổn định của s_4 , s_3 , và s_2 : Xét bề mặt trượt lớp thứ 5 là s_5 đạt được dạng trượt của nó tại thời gian t_r . Do đó, không có điều khiển chuyển đổi không liên tục trong hệ thống điều khiển trong khoảng thời gian (t_r, ∞) và hệ thống điều khiển xe con cần trục dạng mạch kín có thể được xem như một hệ thống tự xử lý. Theo nguyên tắc của LaSalle thì s_5 tiến tới tập bất biến lớn nhất

$$S = \{s_5 \in S_c \mid \frac{dv}{dt} = 0\} \quad (21)$$

Trong phương trình (21) thì tập S_c là bất biến xác định dương được xác định như sau:

$$S_c = \{s_5 \in \mathbb{R}^2 \mid \frac{dv}{dt} < c, c > 0\} \quad (22)$$

Do đó, tồn tại

$$S = \{s_5 \mid s_5 = 0 \cap \dot{s}_5 = 0\} \quad (23)$$

$$= \{x_6, s_4 \mid \alpha_6x_6 + s_4 = 0 \cap \alpha_6\dot{x}_6 + \dot{s}_4 = 0\}$$

$$= \{x_6, s_4 \mid s_4 = -\alpha_6x_6 = \text{const.} \cap \dot{s}_4 = -\alpha_6\dot{x}_6 = \text{const}\}$$

Giả thiết hai hằng số trong phương trình (23) là khác không khi $t \rightarrow \infty$. Do đó s_5 sẽ hội tụ để xác định mặt phẳng pha bằng các trục x_6 và s_4 ngoại trừ gốc tọa độ. Điều này trái ngược với sự thật $\lim_{t \rightarrow \infty} s_5 = 0$. Kết quả là cả hai hằng số trong phương trình (23) phải bằng không từ sự chứng minh bằng cách phủ định, đó là s_4 là ổn định tiệm cận cục bộ vì s_4 ổn định tiệm cận cục bộ nên giới hạn của s_4 có thể được rút ra từ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s_5 = \lim_{t \rightarrow \infty} (\alpha_5x_6 + s_4) = 0 \quad (24)$$

Nếu như các trạng thái hệ thống là không phân kỳ thì giới hạn của s_4 có thể được suy ra từ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s_4 = -\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha_5x_6 = \text{const} \quad (25)$$

Theo điều kiện đã cho trước (26), thì phương trình (26) được viết như sau:

$$\text{sgn}(\alpha_6x_6s_4) \geq 0 \quad (26)$$

Sự tích hợp của các phương trình (25) và (26) cho thấy rằng hằng số trong phương trình (25) chỉ bằng không thay vì các hằng số khác, điều này có nghĩa rằng

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_6 = 0 \quad (27)$$

Và

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s_4 = 0 \quad (28)$$

Phương trình (28) thể hiện rằng biến bề mặt trượt lớp thứ 4 s_4 là ổn định tiệm cận cục bộ nếu điều kiện (17) luôn đúng.

Hoàn toàn tương tự, các sự ổn định của các bề mặt trượt phân cấp s_3 và s_2 có thể được rút ra theo các điều kiện cho trước (18) và (19) luôn đúng.

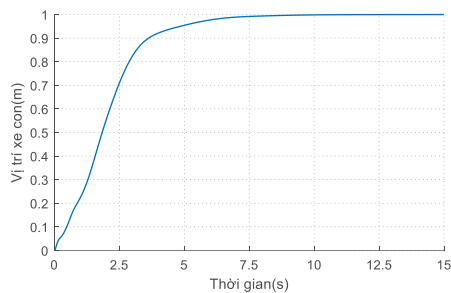
3) Sự ổn định của s_1 : trong phương trình (5) thì x_2 là bằng đạo hàm của x_1 . Từ quan điểm của sự ổn định $\text{sgn}(\alpha_1\alpha_2) > 0$ sẽ luôn đúng trong phương trình (20) sao cho qui đạo hệ thống có thể được tiếp xúc trong các góc phần tư thứ II và IV của mặt phẳng pha [41].

5. Các kết quả mô phỏng bằng số để hỗ trợ thiết kế bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần

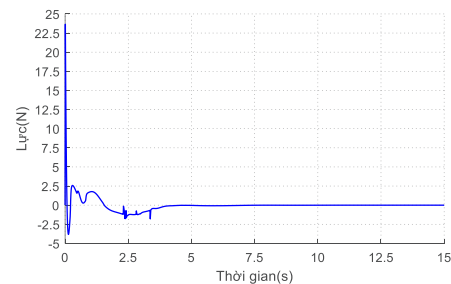
Nhằm để kiểm tra tính khả thi và tính hợp lệ của thiết kế bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần như trên cho bài toán điều khiển chống rung cho vật nâng và móc treo xe con cần trục trong mặt phẳng chứa cần, một số các mô phỏng bằng số trong chương trình Matlab được tiến hành với các thông số vật lý của một xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do được thu nhỏ ở mô hình tỷ lệ đồng dạng bất kỳ. Các thông số vật lý của một xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự

do theo mô hình tỷ lệ đồng dạng được xác định để mô phỏng bằng số cụ thể như sau: khối lượng xe con $m = 1$ kg, khối lượng móc treo $m_1 = 0,5$ kg; khối lượng vật nâng $m_2 = 1$ kg, $l_1 = 1$ m, $l_2 = 1$ m.

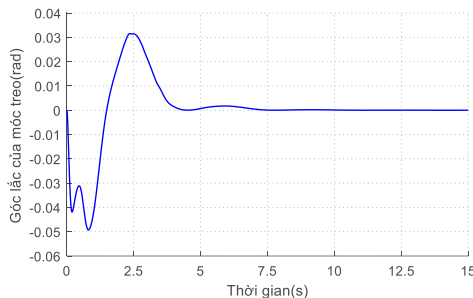
Mục tiêu điều khiển là vận chuyển vật nâng đến một vị trí mong muốn. Không mất tính tổng quát, vị trí mong muốn x_d được đặt $x_d = 1$ m tính từ gốc tọa độ như tại hình 1. Trong khi bộ điều khiển đã được thiết kế bằng phương pháp kiểu trượt tăng dần cần triệt tiêu các chuyển động của vật nâng và móc treo trong mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Các kết quả mô phỏng được trình bày tại các đồ thị từ Hình 3 đến 13.



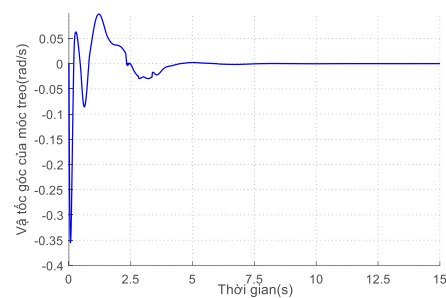
Hình 3. Đồ thị mô tả vị trí xe con x_d (m) theo thời gian t (s) khi sử dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần.



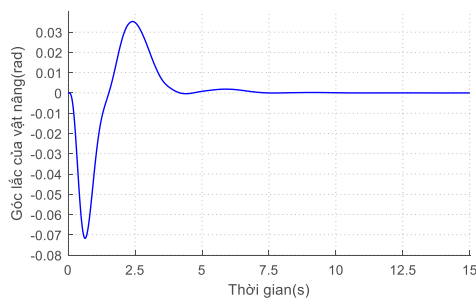
Hình 4. Đồ thị mô tả tín hiệu đầu vào (lực phát động) f (N) theo thời gian t (s) khi sử dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần.



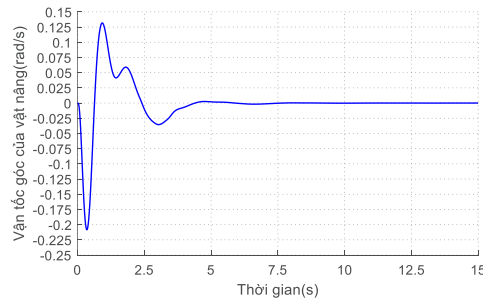
Hình 5. Đồ thị mô tả góc lắc của móc treo θ_1 (rad) theo thời gian t (s) khi sử dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần.



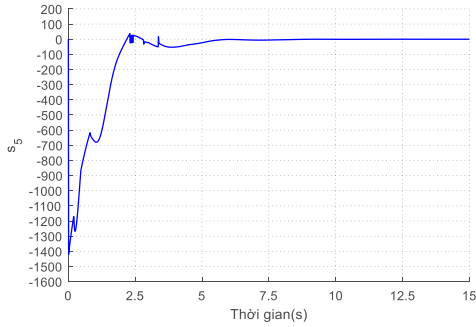
Hình 6. Đồ thị mô tả vận tốc góc của móc treo $d\theta_1/dt$ (rad/s) theo thời gian t (s) khi sử dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần.



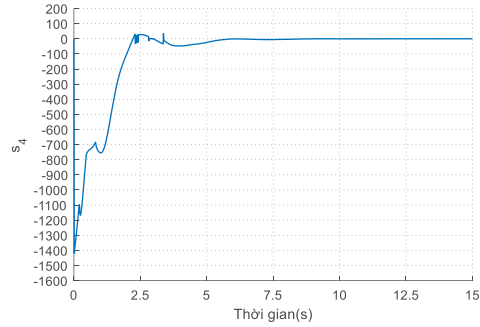
Hình 7. Đồ thị mô tả góc lắc của tải nâng θ_2 (rad) theo thời gian t (s) khi sử dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần.



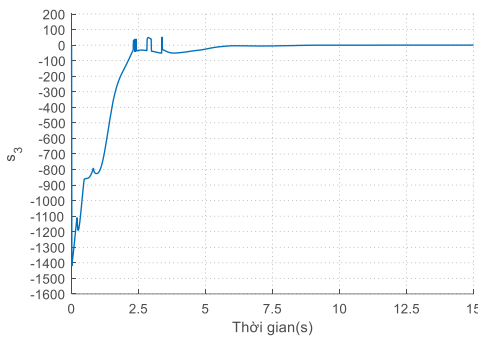
Hình 8. Đồ thị mô tả vận tốc góc của vật nâng $d\theta_2/dt$ (rad/s) theo thời gian t (s) khi sử dụng phương pháp điều khiển kiểu trượt tăng dần.



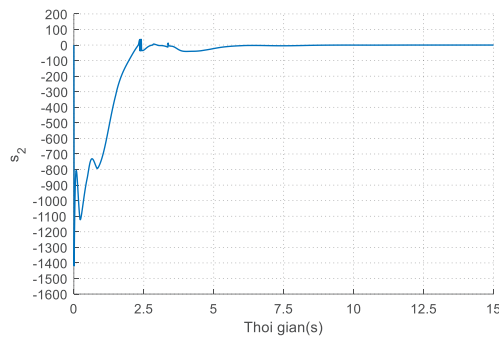
Hình 9. Bề mặt trượt lớp cuối cùng s_5 theo thời gian khi sử dụng sử dụng phương pháp điều khiển chống rung dựa vào kiểu trượt tăng dần.



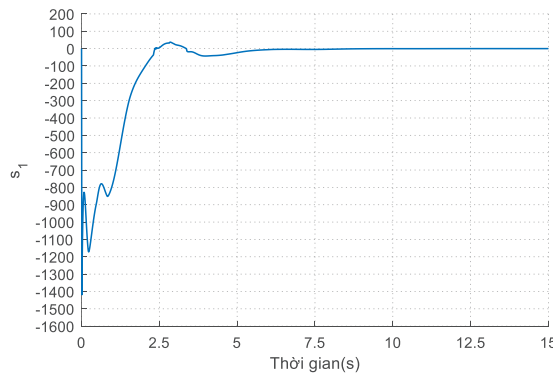
Hình 10. Bề mặt trượt lớp thứ tư s_4 theo thời gian khi sử dụng sử dụng phương pháp điều khiển chống rung dựa vào kiểu trượt tăng dần.



Hình 11. Bề mặt trượt lớp thứ ba s_3 theo thời gian khi sử dụng sử dụng phương pháp điều khiển chống rung dựa vào kiểu trượt tăng dần.



Hình 12. Bề mặt trượt lớp thứ hai s_2 theo thời gian khi sử dụng sử dụng phương pháp điều khiển chống rung dựa vào kiểu trượt tăng dần.



Hình 13. Bề mặt trượt lớp thứ nhất s_1 theo thời gian khi sử dụng sử dụng phương pháp điều khiển chống rung dựa vào kiểu trượt tăng dần.

6. Một số nhận xét về kết quả mô phỏng bằng số để hỗ trợ thiết kế bộ điều khiển kiểu trượt kiểu tăng dần

Như đã trình bày tại Hình 3, bộ điều khiển chống rung kiểu trượt tăng dần có khả năng đạt được mục tiêu điều khiển vận chuyển. Xe con được ổn định tại vị trí mong muốn đó là $x_d = 1m$. Các góc lắc của tải nâng và móc treo là được trình bày tại các Hình 7 và 5. Các

đường cong cho thấy rằng tải nâng và móc treo là được ổn định tại vị trí mong muốn. Lực điều khiển tác dụng vào xe con được thể hiện tại Hình 4.

Các vận tốc góc của tải nâng và móc treo được thể hiện tại các Hình 8 và 6. Như đã chứng minh, tất cả các mặt trượt trong cấu trúc phân cấp đã được thiết kế là ổn định tiệm cận. Các bề mặt trượt được trình bày tại các Hình 9 đến Hình 13 ở trên.

Tại Hình 3 cho thấy xe con đến vị trí mong muốn trong khoảng thời gian khoảng 8 giây. Trong khi đó, các góc lắc của tải nâng và móc treo có thể được ổn định tại các vị trí hạ tải của chúng.

Tại các Hình 5 và 7 cho thấy rằng hai độ lệch góc (biên độ dao động) của móc treo θ_1 và θ_2 ban đầu là khá lớn với thời gian dao động khoảng 7,5 giây thì về đến vị trí cân bằng thẳng đứng trước khi xe con đến vị trí mong muốn. Điều này có nghĩa rằng cả θ_1 và θ_2 được ổn định tại vị trí mong muốn $x_d = 1m$ với khoản thời gian ổn định là khoảng 7,5 giây.

Về tín hiệu điều khiển (lực phát động f tác động vào xe con) được thể hiện tại hình 4 thay đổi với biên độ không quá lớn lúc khởi động ban đầu với thời gian dao động chỉ kéo dài đến 4 giây là giảm hẳn về 0 (vị trí cân bằng thẳng đứng).

Tại các Hình 6 và 8 là các đồ thị của vận tốc góc của móc treo và vận tốc góc của vật nâng theo thời gian. Trong khoảng 2 giây ban đầu thì vận tốc góc của móc treo và của vật nâng là thay đổi một cách sắc nhọn với biên độ khá lớn. Sau 2 giây thì biên độ dao động quanh vị trí cân bằng thẳng đứng là còn rất bé và đến thời gian 5 giây thì biên độ dao động về 0 (tức là vị trí cân bằng thẳng đứng).

7. Kết luận

Như vậy khi so sánh về mặt hiệu quả điều khiển thì phương pháp điều khiển kiểu trượt tỏ ra hiệu quả hơn cả so với các phương pháp điều khiển khác mà các tác giả đã nghiên cứu trong điều kiện Việt Nam vì biên độ dao động nhỏ và thời gian dập tắt dao động nhanh hơn. Hơn nữa, bộ điều khiển kiểu trượt tăng dần hoàn toàn dựa vào mô hình xe con cần trục. Trong thực tế, thiết kế điều khiển kiểu như vậy là có liên quan theo mô hình xe con cần trục. Nếu mô hình xe con cần trục là không đủ chính xác thì hiệu quả điều khiển có thể là không được tốt như kỳ vọng. Từ các kết quả nghiên cứu, các tác giả cũng đồng thời kiến nghị nên tiếp tục có đầu tư nghiên cứu thực nghiệm và tiến tới là nghiên cứu ứng dụng ngoài thực tiễn sản xuất nhằm mục đích phục vụ cho việc tự động hóa xây dựng bằng các cần trục thông minh để nâng cao năng suất, nâng cao độ an toàn cũng như giảm thiểu tải trọng động tác động lên các cơ cấu công tác của cần trục cũng như tác động lên hệ kết cấu thép của cần trục.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin được bày tỏ sự biết ơn sâu sắc tới Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã hỗ trợ, giúp đỡ cho đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp trường năm 2023, mã số đề tài: 23-2023/KHXD được hoàn thành theo qui định. Các tác giả cũng xin được đặc biệt chân thành cảm ơn các bạn đồng nghiệp, các nhà khoa học, các học giả, Ban biên tập Tạp chí Vật liệu và Xây dựng của Viện Vật liệu Xây dựng- Bộ Xây dựng đã có những giúp đỡ quý báu.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Abdel- Rahman EM, Nayfeh AH, Masoud ZN. *Dynamics and control of cranes: a review*. J Vib Control, 2003. 9(7): p.863-908.
- [2]. Tuan L, Janchiv A, Kim GH, Lee SG. *Feedback linearization control of overhead cranes with varying cable length*. In: Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea, 2011. p. 906–911.
- [3]. Tuan L, Kim GH, Lee SG. *Partial feedback linearization control of the three-dimensional overhead crane*. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Seoul, Korea, 2012. p. 1198–1203.
- [4]. Wu XQ, He XX, Sun N, Fang YC. *A novel anti-swing control method for 3-D overhead cranes*. In: Proceedings of American Control Conference, Portland OR, USA, 2014. p. 2821–2826.
- [5]. Maschke B, Ortega R, Van der Schaft AJ. *Energy-based Lyapunov functions for forced Hamiltonian systems with dissipation*. IEEE Trans Autom Control, 2000. 45(8): p.1498–1502.
- [6]. Karkoub MA, Zribi M. *Modelling and energy based nonlinear control of crane lifters*. IEE Proc Control Theory Appl, 2002. 149(3): p. 209–216.
- [7]. Guo W, Liu D, Yi J, Zhao D. *Passivity-based-control for double-pendulum-type overhead cranes*. In: Proceedings of IEEE Region 10 Annual International Conference, Chiang Mai, Thailand, 2004. p. 546–549.
- [8]. Collado J, Lozano R, Fantoni I. *Control of convey-crane based on passivity*. In: Proceedings of American Control Conference, Chicago IL, USA, 2000. p. 1260–1264.
- [9]. Cao LZ, Wang HW, Niu C, Wei SB. *Adaptive backstepping control of crane hoisting system*. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, China, 2007, p. 245–248.
- [10]. Yang JH, Yang KS. *Adaptive control for 3-D overhead crane systems*. In: Proceedings of American Control Conference, Minneapolis MN, USA, 2006. p. 1832–1837.
- [11]. Yang TW, O'Connor WJ. *Wave based robust control of a crane system*. In: Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006. p. 2724–2729.
- [12]. Uchiyama N. *Robust control of rotary crane by partial-state feedback with integrator*. Mechatronics, 2009. 19(8): p.1294–1302.
- [13]. Deng JM, Becerra VM. *Application of constrained predictive control on a 3D crane system*. In: Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore City, Singapore, 2004. p. 583–587.
- [14]. Michels K, Klawonn F, Kruse R, Numberger A. *Fuzzy control: Fundamentals, stability and design of fuzzy controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [15]. Ross IM, Fahroo F. *Pseudospectral methods for optimal motion planning of differentially flat systems*. IEEE Trans Autom Control, 2004. 49(8): p. 1410–1413.
- [16]. Zameroski D, Starr G, Wood J, Lumia R. *Rapid swing-free transport of nonlinear payloads using dynamic programming*. J Dyn Syst Meas Control Trans ASME, 2008, 130(4), DOI:10.1115/1.2936384.
- [17]. Da Cruz JJ, Leonardi F. *Minimum-time anti-swing motion planning of cranes using linear programming*. Optimum Control Appl Meth, 2013. 34(2): p. 191–201.
- [18]. French L, Singhouse W, Seering W. *An expert system for the design of input shapers*. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications, Kohala Coast-Island, USA, 1999. p. 713–718.
- [19]. Singer N, Singhouse W, Kriikku E. *An input shaping controller enabling cranes to move without sway*. In: Proceedings of 7th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Augusta, GA, 1997. p. 225–231.

- [20]. Sorensen K, Singhose W, Dickerson S. *A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes*. Control Eng Pract, 2007. 15(7): p. 825–837.
- [21]. Ahres, S., Aschemann, H., Sawodny, O., and Hofer, E. P., 2000, “Crane Automation by Decoupling Control of a Double Pendulum Using Two Translational Actuators,” in Proceedings of the 2000 American Control Conference, Vol. 2. p. 1052–1056.
- [22]. Tanaka, S., and Kouno, S., 1998, “Automatic Measurement and Control of the Attitude of Crane Lifters: Lifter-Attitude Measurement and Control,” Control Eng. Pract., 6(9), p. 1099–1107.
- [23]. Ortega R, Perez JA, Nicklasson PJ, Sira-Ramirez H. *Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: Mechanical, electrical and electromechanical applications*. Berlin: Springer, 2013.
- [24]. Qian D, Tong S, Yang B, Lee S. *Design of simultaneous input-shaping-based SIRMs fuzzy control for double-pendulum-type overhead cranes*. Bull Pol Acad Sci-Tech Sci, 2015. 63(4): p. 887–896.
- [25]. Edwards C, Spurgeon S. *Sliding mode control: Theory and applications*. Padstow: CRC Press, 1998.
- [26]. Utkin V, Guldner J, Shi J. *Sliding mode control in electro-mechanical systems*. Padstow: CRC Press, 2009.
- [27]. Utkin VI. *Sliding modes in control and optimization*. Berlin: Springer, 2013.
- [28]. Wang W, Liu XD, Yi JQ. *Structure design of two types of sliding-mode controllers for a class of under-actuated mechanical systems*. IET Control Theory Appl, 2007, 1(1): 163–172.
- [29]. Xue D, Chen Y, Atherton DP. *Linear feedback control: Analysis and design with MATLAB*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- [30]. Dianwei Qian, *Anti-sway control for Cranes*, Design and implementation using Matlab.
- [31]. Hồ Việt Long, Dương Minh Đức, *Điều khiển chống rung cho cầu tháp*, 2017, CASD 2017.
- [32]. Nguyễn Văn Trung, Chenglong Du, Nguyễn Trọng Quỳnh, Phạm Thị Thảo, *Tổng quan chiến lược áp dụng các kỹ thuật điều khiển vòng hở để điều khiển hệ thống cầu trục*, 2019, Tạp chí nghiên cứu khoa học. Trường Đại học Sao Đỏ. ISSN 1859-4190. Số 4(67). 2019.
- [33]. Phạm Lê Công, *Điều khiển chống rung cho cầu tháp bằng phương pháp điều khiển tiền định*, Luận văn Thạc sỹ kỹ thuật, 2020, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [34]. Lê Mạnh Quý, Nguyễn Đức Minh, Dương Minh Đức, Nguyễn Tùng Lâm, Ngô Văn An, *Điều khiển cầu trục kết hợp chống rung lắc và tránh vật cản*, 2015, Hội nghị toàn quốc lần thứ 3 về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA-2015.
- [35]. Nguyễn Văn Hùng, *Nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm, khảo sát động lực học và khả năng điều khiển ổn định của vật nâng theo phương ngang khi di chuyển xe con cầu trục*” 2013, Luận văn thạc sỹ kỹ thuật chuyên ngành Kỹ thuật cơ khí; Mã số: 60520103, ĐHXD 2013. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [36]. Trương Xuân Thương, Dương Minh Đức, Nguyễn Tùng Lâm, *Điều khiển chống rung cho cầu trục ba chiều bằng phương pháp Hybrid Shape*, 2015, Hội nghị toàn quốc lần thứ 3 về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA-2015.
- [37]. Cao Xuân Cường và Trần Đình Khôi Quốc, *Điều khiển mô hình con lắc ngược sử dụng bộ điều khiển RQL với hai vòng phản hồi*, 2018, Tạp chí điện tử và công nghệ, Đại học Đà Nẵng, 2018. 5(126) Quyển 1.
- [38]. Lê Hồng Quân, *Nghiên cứu mối quan hệ giữa các gia tốc làm giảm góc lắc của cáp nâng cầu trục tháp khi quay cầu trục làm cơ sở cho việc điều khiển động cơ để nâng cao tốc độ làm việc*: Đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp trường trọng điểm 2017; Mã số đề tài: 140-2017/KHXD-TĐ, Hà Nội, tháng 4/2018. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [39]. Lê Hồng Quân, *Nghiên cứu giải pháp điều khiển chống lắc cho mô hình xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do dựa trên kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào*: Đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp trường 2021; Mã số đề tài: 37-2021/KHXD, Hà Nội, tháng 01/2022. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [40]. Lê Hồng Quân, *Nghiên cứu điều khiển chống rung lắc cho vật nâng và móc treo trong mô hình xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do dựa trên cơ sở phân hồi đầu ra*: Đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp trường 2021; Mã số đề tài: 15-2022/KHXD, Hà Nội, tháng 12/2022. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [41]. Lê Hồng Quân, *Nghiên cứu chống rung cho vật nâng và móc treo trong mô hình toán học xe con cầu trục ở dạng con lắc hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cân bằng phương pháp điều khiển kiểu trượt*: Đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp trường 2023; Mã số đề tài: 23-2023/KHXD, Hà Nội, tháng 11/2023. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.