VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Nghiên cứu dập tắt dao động của vị trí xe con, móc treo và cụm dầm thép tiền chế khi di chuyển xe con cần trục tháp với tốc độ nhanh đến trung điểm của hai cột thép sử dụng bộ điều khiển tự động dạng các bề mặt trượt phân cấp trong quá trình lắp ghép tự động

Lê Hồng Quân [1*], Nguyễn Huy Toàn[1]

[1] Khoa Cơ khí - Trường Đại Học Xây Dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Lắp dầm thép tự động
Bộ điều khiển tự động kiểu phân cấp
Các bề mặt trượt
Dập tắt dao động
Mô hình xe con cần trục tháp trong mặt phẳng chứa cần

TÓM TẮT

Trong quá trình lắp dựng tự động các dầm thép tiền chế bằng cần trục tháp xây dựng, thợ điều khiển cần trục phải thực hiện điều khiển di chuyển xe con cần trục tháp trong mặt phẳng chứa cần với tốc độ nhanh để đưa dầm thép tiền chế đến vị trí trung điểm giữa hai cột thép rồi sau đó điều khiển xoay dầm thép vào lắp ghép với hai cột thép để tăng năng suất. Khi xe con cần trục tháp phải di chuyển với tốc độ nhanh thì dưới tác dụng của lực gió giật và lực phát động chủ động f mà trong đó có cả lực quán tính lớn khi mở máy và phanh dừng tác dụng theo phương ngang làm cho vị trí của xe con, cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế bị dao động rung lắc với biên độ lớn và thời gian kéo dài quanh vị trí cân bằng thẳng đứng làm cho năng suất bị giảm mạnh và có khả năng xảy ra các tai nạn lao động làm phát sinh chi phí xây dựng cũng như kéo dài tiến độ xây dựng của dự án. Để khắc phục các vấn đề trên, bài báo tập trung trình bày việc nghiên cứu áp dụng phương pháp điều khiển tự động theo vòng kín có phản hồi để dập tắt 3 bậc tự do của mô hình toán học xe con cần trục dao động trong mặt phẳng chứa cần nêu trên. Hệ thống điều khiển tự động kiểu trượt các bề mặt trượt phân cấp các bề mặt trượt được thiết kế và chứng minh đạt được mục tiêu điều khiển cũng như ổn định theo lý thuyết hàm Lyapunov. Kết quả được kiểm chứng thông qua mô phỏng số bằng chương trình MATLAP với bộ số liệu đầu vào để mô phỏng được lấy thông qua nghiên cứu tính toán hệ thống lắp xoay lắp dầm thép tiền chế trong điều kiện phòng thí nghiệm. Các nhận xét về các kết quả mô phỏng và kết luận cũng được trình bày.

KEYWORDS

Automated erection of box-section steel beams
Hierarchical sliding – mode surface automatic controller
Vibration suppression
In-plane tower crane trolley model

ABSTRACT

During the automated assembly of prefabricated steel beams using a tower crane, operators must rapidly drive the crane trolley along the jib plane to position the beam at the midpoint between two steel columns, subsequent to which the beam is rotated for alignment and assembly to enhance productivity. However, high-speed trolley maneuvers—under the combined influence of wind gusts and active driving forces f, which incorporate significant inertial forces during acceleration and braking—induce large-amplitude and prolonged oscillations of the trolley, hook block, and prefabricated steel beam assembly about their vertical equilibrium state. This phenomenon drastically reduces operational efficiency and escalates the risk of occupational accidents, ultimately leading to cost overruns and project schedule delays. To address these challenges, this paper investigates the application of a closed-loop feedback automatic control system to suppress the three degrees of freedom (3-DOF) of the crane trolley-payload model oscillating within the jib plane. A hierarchical sliding mode control (HSMC) scheme is designed, with its control objectives and system stability rigorously proved using Lyapunov stability theory. The effectiveness of the proposed method is validated through numerical simulations in MATLAB. The simulation input parameters are derived from experimental calculations of a prefabricated steel beam assembly and rotation system under laboratory conditions. Finally, comprehensive discussions on the simulation results and concluding remarks are presented.

1. Đặt vấn đề

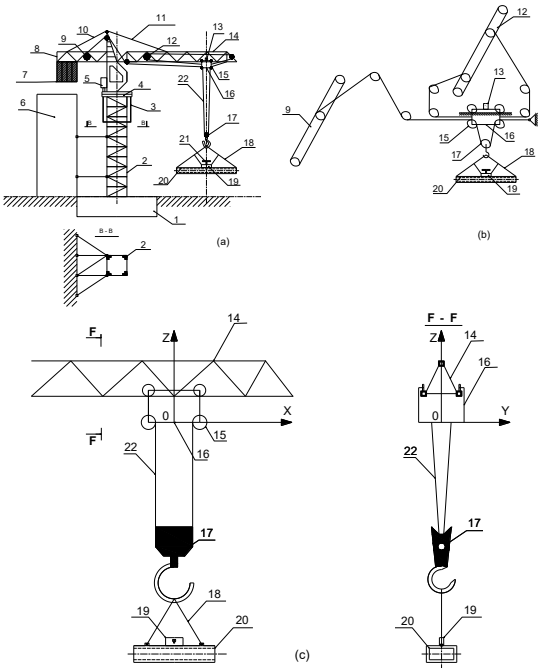
Hiện nay việc thi công nhanh và an toàn các dự án xây dựng nhà cao tầng bằng kết cấu bê tông cốt thép tiền chế hoặc bằng thép tiền chế để nâng cao độ an toàn và nâng cao năng suất là những công việc phức tạp nên việc nghiên cứu tìm kiếm các giải pháp tự động hóa là rất cần thiết. Một trong những giải pháp hiệu quả đó là kết cấu các toà nhà và các hệ thống kỹ thuật bên trong của chúng được thiết kế, tính toán,

*Liên hệ tác giả: quanlh@huce.edu.vn
Nhận ngày 09/09/2026, sửa xong ngày 08/10/2026, chấp nhận đăng ngày 09/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1490

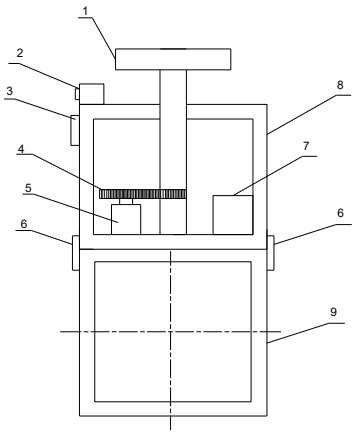
kiểm tra đảm bảo đủ bền đủ ổn định, dao động, đảm bảo tối ưu và vân vân đồng thời kết cấu được chia thành nhiều mô đun nhỏ tối ưu khác nhau như các dầm và cột thép tiền chế. Ở nước ngoài đã có một số công trình nghiên cứu theo hướng tự động hóa lắp ghép, tuy nhiên tại các điểm lắp ghép mà thợ điều khiển cần trục khó quan sát và một số dạng đặc thù kết cấu nên các công nhân lắp dựng kết cấu vẫn phải tham gia phối hợp cùng thợ điều khiển cần trục [28, 29, 30, 32]. Ở mức độ tự động hóa cao thì trước hết các mô đun kết cấu nhỏ tối ưu của các tòa nhà tiền chế phải được thiết kế và chế tạo trước trong các nhà máy và sau đó được các phương tiện vận chuyển tập kết đến các vị trí tại công trường xây dựng để các cần trục tháp xây dựng chủ lực được qui hoạch chuyển động theo các quĩ đạo tối ưu và an toàn để tự động nâng lên các vị trí cần lắp ghép trong tòa nhà. Trước khi các bộ phận kết cấu thép tiền chế được chế tạo và thi công thì các chuyên gia áp dụng công nghệ kỹ thuật xây dựng ảo để mô phỏng quá trình xây dựng của các thiết bị nâng chủ lực và các mô đun kết cấu trên máy tính trước trong không gian ba chiều nhằm phát hiện ra các va chạm không an toàn giữa các chuyển động của các thiết bị thi công chủ lực, giữa vật nâng và các bộ phận kết cấu đã được lắp ghép trong tòa nhà đồng thời tìm ra thứ tự các quĩ đạo lắp ghép tối ưu của các cần trục sao cho hỗ trợ tiến độ thi công là nhanh nhất và an toàn nhất có thể [31, 33]. Công nghệ thực tế ảo và giải pháp công nghệ máy móc phục vụ lắp ghép tự động kết cấu thép tiền chế nhà nhiều tầng tại Việt Nam đây là chủ đề còn rất mới và rất cần thiết phải được từng bước nghiên cứu để hoàn thiện công nghệ và tiến tới ứng dụng triển khai trên máy thực ngoài công trường xây dựng ở qui mô lớn vì đây là những vấn đề kỹ thuật, công nghệ sẽ mang lại lợi ích rất to lớn về mặt kinh tế, giáo dục và sự an toàn cho ngành công nghiệp xây dựng của Việt Nam.

Công nghệ kết cấu thép tiền chế nhà nhiều tầng được cấu tạo từ các phần tử kết cấu như các cột thép và dầm thép tiền chế và thực tế cho thấy bước lắp dựng kết cấu cột thép tiền chế là dễ hơn nhiều so với với việc lắp ghép kết cấu các dầm thép tiền chế và do vậy các cột thép tiền chế là được lắp dựng trước. Trong các nghiên cứu trước đây, các cột thép tiền chế được chế tạo có các đoạn dầm công xôn (có tiết diện mặt cắt ngang giống với tiết diện mặt cắt ngang của dầm thép tiền chế) được hàn với các mặt bên của các cột thép và trên các đầu các đoạn dầm công xôn (phía lắp ghép với đầu của dầm thép tiền chế) cũng có hàn các mặt bích để bắt bu lông với dầm thép tiền chế và như vậy khi cẩu lắp về di chuyển dầm thép tiền chế vào giữa hai cột thép đã được lắp dựng trước tức là quá trình lắp dầm thép tiền chế với hai đầu dầm công xôn đã được hàn vào hai cột thép đứng hai bên. Hơn nữa, với kết cấu tiền chế như vậy thì các công nhân tham gia lắp dựng kết cấu thép có thể đứng tạm thời trên các dầm công xôn này nhằm phối hợp với các thợ điều khiển cần trục ngồi trên cabin hoặc dưới mặt đất để thao tác lắp ghép các dầm thép tiền chế vào hai đầu dầm công xôn. Khi bắt đầu một chu kỳ lắp ghép dầm thép tiền chế, thợ điều khiển cần trục tháp xây dựng thực hiện việc hạ móc treo để công nhân đứng phía dưới đất chằng buộc cáp treo với hai đầu tai móc dầm thép tiền chế sau đó điều khiển tời nâng vật để nâng dầm thép tiền chế đến trên chiều cao của các cột thép tiền chế đã được lắp dựng trước sau đó điều khiển cơ cấu quay để quay tay cần của cần trục tháp một góc Ψ trong mặt phẳng ngang đồng thời điều khiển lựa cho di chuyển xe con mang dầm thép tiền chế đến vị trí giữa hai cột thép để các công nhân xây dựng đang đứng trên các đoạn dầm công xôn ở trên cao phối hợp với thợ điều khiển cần trục tháp đang ngồi trên cabin hoặc đang đứng dưới mặt đất để kéo dây treo buộc các dầm thép tiền chế đang dao động đung đưa rất mạnh và lâu ở trên cao gây ra các mối nguy hiểm do sự tác động của tải trọng động khi mở máy hoặc phanh dừng cơ cấu di chuyển xe con đang mang dầm thép tiền chế trong mặt phẳng chứa cần và do tải trọng gió giật tác dụng theo phương ngang cũng như tải trọng động khi hạ dầm thép tiền chế xuống để các công nhân tiến hành căn chỉnh bằng tay dầm thép tiền chế theo phương đứng và phương ngang vào vị trí lắp ghép với các dầm công xôn đang chờ sẵn và sau đó các công nhân kết cấu thép phải thực hiện thao tác lắp bu lông, xiết đai ốc một cách thủ công để cố định các mối ghép liên kết. Như vậy các qúa trình thao tác nêu trên của các công nhân kết cấu thép phải thực hiện ở trên cao và phải xử lý thủ công bằng tay nên gây ra thêm tải trọng động tác động lên các cơ cấu và kết cấu thép của máy gây tốn kém vật liệu chế tạo máy hoặc vật liệu chế tạo máy phải có cường độ cao hơn, công suất động cơ phải lớn và kéo theo nhiều điều kiện bất lợi khác đồng thời làm cho dầm thép tiền chế và móc treo bị dao động kéo dài nên rất khó điều chỉnh dầm thép một cách chính xác vào vị trí lắp ghép và dễ gặp các nguy cơ mất an toàn rất nguy hiểm về nhân mạng, sức khỏe đối với các công nhân do có thể bị té ngã xuống đất gây chết người hoặc bị tai nạn do va chạm với dầm thép tiền chế khi xe con cần trục di chuyển và tạo ra dao động đung đưa trong mặt phẳng chứa cần hoặc do khi kéo dây treo dầm thép tiền chế gây ra. Những điều này đồng nghĩa với việc không nâng cao được độ an toàn, không nâng cao được năng suất thực tế của cần trục tháp do không rút ngắn thêm được thời gian của một chu kỳ lắp ghép và sự tích lũy các thời gian do không rút ngắn được của hàng trăm, hàng ngàn thậm chí hàng triệu chu các kỳ lắp ghép các dầm thép tiền chế như vậy không những mang lại thiệt hại rất to lớn về mặt kinh tế và an toàn cho ngành công nghiệp lắp dựng kết cấu thép xây dựng của Việt Nam mà còn làm phát sinh thêm các chi phí xây dựng do các công ty bảo hiểm phải chi trả tiền bồi thường thiệt hại đồng thời tiến độ thi công của dự án xây dựng cũng sẽ bị đình trệ kéo dài thêm do nảy sinh việc kiện tụng do các sự cố tai nạn gây ra. Để cải thiện các vấn đề nêu trên theo hướng tích cực hơn thì bài báo này chúng tôi trình bày khái quát hóa giải pháp lắp ghép dầm thép tiền chế tự động để trên cơ sở đó có thể tiến tới thiết kế chế tạo, thử nghiệm và ứng dụng được hệ thống tự động lắp ghép dầm thép tiền chế của nhà thép nhiều tầng bằng cần trục tháp xây dựng nhằm thay thế cho các công việc lắp ghép thủ công của các công nhân lắp dựng kết cấu thép ở trên cao để nâng cao độ an toàn của dự án, loại trừ bớt đi các chi phí xây dựng bị phát sinh do mất an toàn, chậm tiến độ đồng thời góp phần vào việc nâng cao năng suất của ngành công nghiệp xây dựng các công trình kết cấu thép tiền chế nhiều tầng tại Việt Nam nói chung và năng suất của cần trục tháp có cơ cấu tự động hóa lắp ghép nói riêng do có thể rút ngắn bớt được thời gian của một chu kỳ lắp ghép cũng như giảm thiểu được rung động của dầm thép trong quá trình lắp ghép ở các giai đoạn chuyển

động không ổn định như các giai đoạn mở máy hoặc phanh dừng cơ cấu quay và cơ cấu di chuyển xe con tương ứng trong các mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa cần và mặt phẳng chứa cần. Khái quát hóa giải pháp lắp ghép dầm thép tiền chế tự động có trang bị cụm cơ cấu xoay lắp dầm thép tự động và căn chỉnh dầm thép tiền chế theo phương đứng và phương ngang vào vị trí lắp ghép với hai dầm thép công xôn đã được hàn trên hai cột thép đứng hai bên được thể hiện tại các sơ đồ toán học ở Hình 1, Hình 2, Hình 3, Hình 4 và Hình 5 dưới đây.

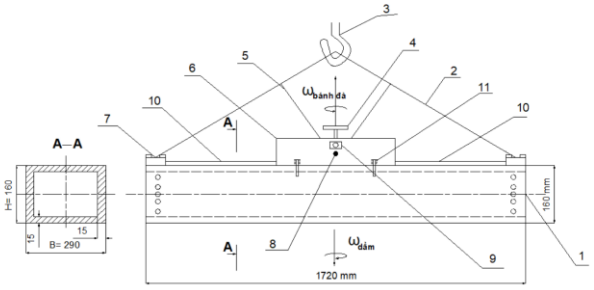


Hình 1(a). Sơ đồ cấu tạo chung cần trục tháp loại đầu quay khi được trang bị cơ cấu xoay lắp dầm thép tiền chế tự động số 19 gắn với thép tiền chế trong mặt phẳng chứa cần; hình 1(b). Sơ đồ mắc cáp; hình 1(c). Sơ đồ xe con cần trục đang treo dầm thép tiền chế ở dạng con lắc ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần (ZOX) và mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa cần (ZOY); 1 - móng cần trục tháp; 2 - thân tháp cố định; 3 - lồng lắp dựng; 4 - Bàn quay; 5 - cơ cấu quay cần trục tháp; 6- công trình; 7- các quả đối trọng ; 8 - cần mang đối trọng; 9- tời nâng hạ vật; 10 - thanh neo cần đối trọng; 11 - thanh neo cần; 12 - tời kéo xe con để thay đổi tầm với $R_{tầm\ với}$; 13 - cảm biến vị trí lắp trên xe con để xác định xe con mang dầm thép tiền chế di chuyển đến vị trí giữa hai cột thép đã được lắp dựng trước ; 14- tay cần nằm ngang; 15 - cụm puly cố định lắp trên xe con được mô hình hóa bằng một khớp xoay không ma sát trong mặt phẳng chứa cần; 16 - xe con; 17 - cụm puly lắp trên móc treo (được mô hình hóa bằng một khớp xoay không ma sát trong mặt phẳng chứa cần ; 18 - dây cáp treo dầm thép tiền chế được mô hình hóa bằng thanh cứng không trọng lượng có chiều dài ở vị trí cân bằng thẳng đứng là L_2; 19 - cơ cấu xoay lắp dầm thép tiền chế tự động; 20 - dầm thép tiền chế có mặt cắt ngang là hình chữ nhật rỗng; 21- bánh đà phản lực; 22- cáp nâng được mô hình hóa bằng thanh cứng không trọng lượng có chiều dài ở vị trí cân bằng thẳng đứng là L_1.



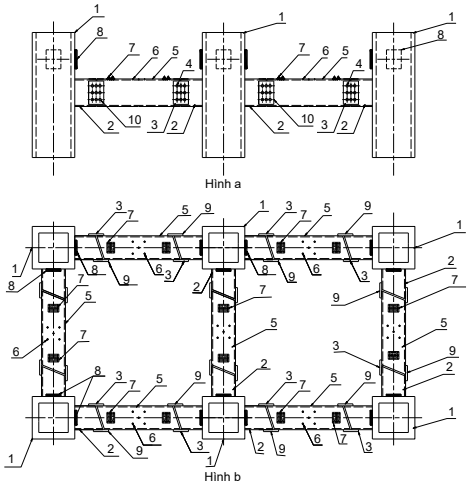
Hình 2. Hình chiếu cạnh của hộp chứa cơ cấu xoay dầm thép tiền chế. 1 – bánh đà phản lực để xoay dầm thép trong mặt phẳng ngang (bánh đà hoạt động theo nguyên lý định luật bảo toàn mô-men động lượng, nó được thiết kế dựa trên nguyên lý trao đổi động lượng. Khi bánh đà thay đổi tốc độ quay, nó sinh ra phản lực tác dụng lên dầm thép tiền chế để xoay dầm vào vị trí cần lắp ghép tự động); 2 – camera độ phân giải cao; 3 – đèn tín hiệu ánh sáng; 4 – bánh răng trong hộp giảm tốc liền động cơ điện một chiều; 5 – động cơ điện một chiều liền hộp giảm tốc; 6 – bộ kết nối giữa dầm thép tiền chế và hộp xoay dầm bao gồm 4 chi tiết thép góc với cấu tạo mỗi bên 2 chi tiết được hàn cứng với vỏ hộp cơ cấu xoay dầm) vỏ hộp cơ cấu xoay dầm thép tiền chế và dầm thép tiền chế để không cho hộp xoay dầm thép tiền chế không tuột ra khỏi dầm thép tiền chế theo phương ngang và truyền mô men động lượng cho dầm thép tiền chế khi bánh đà phản lực được kích hoạt chuyển động quay từ động cơ điện một chiều liền hộp giảm tốc dẫn động; 7 – hệ thống tự động điều khiển thiết bị di động theo phương thức từ xa gồm: pin (cung cấp điện cho toàn bộ hệ thống của cơ cấu) + bộ định tuyến không dây (thiết bị phát và định tuyến tín hiệu mạng wi-fi để truyền nhận dữ liệu điều khiển từ xa) + bộ điều khiển tốc độ, điều khiển chiều quay và mô men xoắn của trục động cơ số 5; 8- vỏ hộp xoay dầm thép tiền chế; 9 – dầm thép tiền chế cần được lắp ghép với hai đầu dầm công xôn đã được hàn trên hai cột đứng hai bên

.



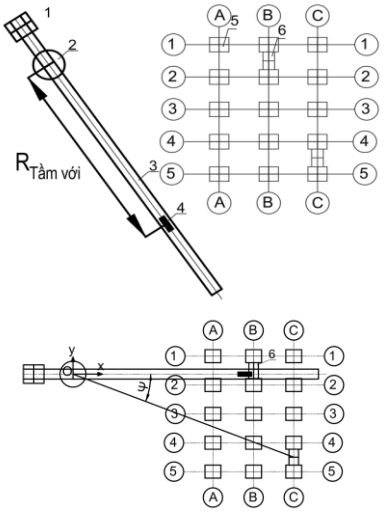
Hình 3. Mô hình toán học mô tả cụm cơ cấu treo và xoay dầm thép tiền chế để lắp ghép tự động. 1 – dầm thép tiền chế có mặt cắt ngang là hình chữ nhật rỗng và có chiều dài $l_{dầm}$ 2 – dây cáp treo dầm thép tiền chế có chiều dài l_1; 3 - móc treo; 4 – bánh đà phản lực để xoay dầm thép tiền chế vào vị trí lắp ghép với hai dầm công xôn đã được hàn với hai cột thép đã được lắp dựng trước; 5 – thanh nối hộp xoay

dầm thép tiền chế với cáp treo dầm thép tiền chế; 6 - hộp chứa cơ cấu tự động xoay dầm thép tiền chế; 7- các tai liên kết để đút chốt cố định cáp treo dầm thép tiền chế hoặc rút chốt nhằm tháo cáp treo dầm thép tiền chế; 8 – đèn tín hiệu nhấp nháy; 9 – camera độ phân giải cao để bắt tọa độ khi được chiếu vào các tấm đánh dấu được gắn trên các cột thép tiền chế; 10 – cáp kéo chốt rời khỏi tai số 7 (còn gọi là cáp dỡ tải được dẫn động bằng một động cơ điện một chiều dẫn động cho 2 puly quay ngược chiều nhau được bố trí bên trong hộp xoay dầm thép số 6); 11- chi tiết kết nối để cố định dầm thép tiền chế số 1 và hộp xoay dầm số 6 để đảm bảo cho 6 cố định chặt với dầm theo phương ngang dầm thép tiền chế số 1; $\omega_{bánh\ đà}$ là vận tốc góc của bánh đà có thứ nguyên là (rad/s); $\omega_{dầm}$ là vận tốc góc xoay dầm thép tiền chế số 1 có thứ nguyên là (rad/s).



Hình 4. Hình chiếu đứng và hình chiếu bằng mô tả giải pháp căn chỉnh để lắp dầm thép tiền chế vào vị trí lắp ghép với hai dầm công xôn đã được hàn trên hai cột thép. Hình a. hình chiếu đứng; Hình b. hình chiếu bằng. 1- Cột thép tiền chế có hàn các đoạn dầm công xôn số 2 đã được lắp dựng trước; 2- Các đoạn dầm công xôn (có đầu nối với dầm thép tiền chế cũng được cắt vát theo tiết diện hình nêm góc phẳng) đã được hàn vào cột thép đã được lắp dựng; 3- các mặt bích bắt bu lông được gắn với các dầm công xôn; 4 – Lỗ bắt bu lông; 5- Dầm thép tiền chế được vát hai đầu đối xứng nhau theo tiết diện hình nêm góc phẳng để chống hiện tượng kẹt khi xoay dầm thép tiền chế đã được căn chỉnh vào vị trí lắp ghép ; 6 – các lỗ ren (gồm 05 lỗ) trên dầm thép tiền chế để bắt vít với hộp xoay dầm thép tiền chế; 7 - các tai (có chân đề được bắt vít với dầm để sau này công nhân tháo dời để tái sử dụng) để đút chốt cố định cáp treo dầm thép tiền chế hoặc rút chốt nhằm để tháo dỡ cáp treo dầm thép tiền chế; 8- các tấm đánh dấu có sơn mầu có chiều rộng R và chiều cao là Δ được gắn trên các cột thép tiền chế để camera độ phân giải cao bắt các điểm tọa độ ; 9 – các mặt bích bắt bu lông được gắn với dầm thép tiền chế.

Qui trình giải pháp lắp ghép các dầm thép tiền chế tự động vào khoảng cách trung điểm của hai cột thép đã được lắp dựng trước bằng cần trục tháp xây dựng được thể hiện qua 7 bước và được minh họa tại Hình 5 dưới đây:



Hình 5. Sơ đồ toán học hình chiếu bằng diễn giải ý tưởng lắp ghép các dầm thép tiền chế vào khoảng cách giữa hai cột thép bằng cần trục tháp xây dựng được thể hiện trên các hình chiếu bằng. 1-1; 2-2; 3-3; 4-4; 5-5; A-A; B-B; C-C là các hệ lưới trục nhà thép tiền chế trong không gian hai chiều. 1- đối trọng; 2- thân tháp; 3- tay cần nằm ngang; 4 – xe con di chuyển dọc theo tay cần nằm ngang số 3; 5 – các cột thép tiền chế (có hàn các dầm công xôn và gắn các tấm đánh dấu) đã được lắp dựng trước; 6 – dầm thép tiền chế cần lắp vào giữa hai cột thép; $R_{Tầm\ với}$ - tầm với của cần trục tháp tính đến tâm xe con ở vị trí bất kỳ.

Để lắp ghép dầm thép tiền chế tự động thì cần hai công nhân để thao tác và vận hành cần trục tháp, một người đảm nhiệm công tác thao tác chằng buộc dầm dưới mặt đất và người còn lại là thợ lái cần trục tháp xây dựng. Quy trình chi tiết của việc lắp ghép dầm thép tiền chế như sau:

Bước 1: Hạ móc treo, công nhân chằng buộc dầm thép tiền chế vào cụm móc treo để thực hiện việc cẩu dầm thép tiền chế từ bãi tập kết. Dầm thép tiền chế và hệ thống xoay lắp dầm tự động phải được căn chỉnh để nằm ngang hoàn toàn.

Bước 2: Điều khiển cơ cấu nâng để cho tang cuốn cáp nhằm nâng dầm thép tiền chế lên cao hơn độ cao của các cột thép tiền chế đã được lắp dựng.

Bước 3: Điều kiển cơ cấu quay của cần trục tháp nhằm để đưa tay cần đến góc ψ (góc tạo bởi tay cần và trục quay của máy trong mặt phẳng ngang khi quay phần quay của cần trục tháp)

Bước 4: Điều khiển di chuyển xe con có lắp cảm biến vị trí nhằm để tầm với $R_{Tầm\ với}$ bằng khoảng cách giữa tâm quay của cần trục tháp với trung điểm của 2 cột thép tiền chế đã được lắp dựng trước.

Bước 5: Điều khiển tự động triệt tiêu dao động cho cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế (gồm dầm thép tiền chế và cơ cấu xoay lắp dầm thép tự động) trong mặt phẳng chứa cần bằng bộ điều khiển tự động vòng kín có phản hồi dựa trên nguyên lý các bề mặt trượt phân cấp.

Bước 6: Sau khi dầm thép và móc treo đã kết thúc dao động quanh vị trí cần bằng thẳng đứng trong mặt phẳng chứa cần thì điều

khiển cơ cấu nâng để hạ dầm thép tiền chế xuống vị trí cần lắp ghép đã được hệ thống quan sát (gồm camera AI và đèn tín hiệu ánh sáng mầu kết nối với hệ thống điều khiển) và tấm đánh dấu có sơn mầu được gắn trên các cột thép tiền chế đã được lắp dựng trước xử lý.

Bước 7: Điều khiển xoay dầm thép tiền chế đang được cẩu lắp vào đúng góc để lắp ghép tự động, thực hiện tự động căn chỉnh dầm thép tiền chế theo phương đứng và phương ngang và tự động cài bu lông vào các mặt bích đã được gắn sẵn ở hai đầu dầm thép tiền chế và hai mặt bích được gắn trên hai đầu dầm công xôn đã được hàn vào hai cột thép đã được lắp dựng ở hai bên để hoàn thành mối ghép kết nối tạm thời.

Bước 8: Dỡ tải tự động bằng cách kích hoạt động cơ điện một chiều liền hộp giảm tốc dẫn động cho trục mang 2 puly giống nhau nhưng được cố định hai đầu cáp trên hai puly ngược chiều nhau để cuốn cáp nối với chốt móc dầm thép được bố trí ở hai bên đầu dầm nhằm để giải phóng cáp treo dầm thép tiền chế.

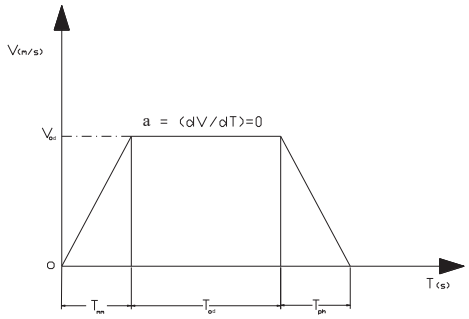
Bước 9: Thợ điều khiển cần trục tháp điều khiển cho hệ thống xoay lắp dầm tự động quay về vị trí ban đầu và bắt đầu định vị chằng buộc để láp ghép dầm thép tiền chế kế tiếp ở chu kỳ làm việc tiếp theo.

Trong chín bước nêu trên, ngoài việc thực hiện lắp ghép dầm thép tiền chế tự động bằng cụm cơ cấu cơ điện tử xoay dầm vào góc lắp ghép nhằm rút ngắn tiến độ thi công, nâng cao độ an toàn, giảm thiểu chi phí phát sinh vẫn còn có những chuyển động như quay vòng cần trục tháp trong mặt phẳng ngang và điều khiển xe con cần trục (có gắn cảm biến vị trí) di chuyển để đưa cụm dầm thép tiền chế đến được các vị trí cần lắp ghép với các cột thép đã được lắp dựng sẵn trong mặt phẳng chứa cần. Các chuyển động này cũng có các giai đoạn chuyển động không ổn định như mở máy và phanh dừng cơ cấu quay cần trục, mở máy và phanh dừng cơ cấu di chuyển xe con đang mang dầm thép tiền chế làm xuất hiện các lực động chẳng hạn như các lực quán tính tác động lên móc treo và cụm dầm thép tiền chế gây nên sự dao động của móc treo và cụm dầm thép tiền chế trong mặt phẳng chứa cần và trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa cần và một khi đã xảy ra các dao động như vậy do xuất hiện của các lực động thì đương nhiên cũng làm xuất hiện các nguy cơ mất an toàn lao động, tăng chi phí xây dựng, không rút ngắn thêm được thời gian của một chu kỳ lắp ghép cũng như của cả dự án hoặc cả đời phục vụ của cần trục và sự xuất hiện của tải trọng động tác lên kết cấu thép và các cơ cấu công tác của cần trục làm tăng thêm chi phí khi thiết kế chế tạo, khai thác cần trục vì phải chọn vật liệu có kích thước to lớn hoặc vật liệu có cường độ cao hơn, công suất của động cơ điện phải lớn hơn so với trạng thái không có tải trọng động hoặc trạng thái giảm thiểu tải trọng động và vân vân để tính toán thiết kế, chế tạo. Chính vì các lý do nêu trên nên chúng ta cũng rất cần thiết phải nghiên cứu giải pháp điều khiển tự động để dập tắt một cách triệt để tất cả các dao động của móc treo và cụm dầm thép tiền chế trong mặt phẳng chứa cần và trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa cần để làm cơ sở khoa học phục vụ cho việc nghiên cứu thiết kế chế tạo các cần trục tháp xây dựng trí tuệ nhân tạo thông minh ở qui mô phòng thí nghiệm để kiểm chứng và ở qui mô thực tế có khả năng dập tắt tất cả các dao động không mong muốn và có thể tham gia lắp ghép tự động kết cấu nhà thép nhiều tầng tiền chế trong điều kiện Việt Nam theo 7 bước nêu trên một cách nhanh nhất và an toàn nhất. Do khuôn khổ trình bày của bài báo khoa học là có giới hạn vậy nên trong phạm vi bài báo này chúng tôi chỉ tập trung trình bày các nội dung chính liên quan đến nghiên cứu giải pháp điều khiển tự động để dập tắt các dao động của cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế trong mặt phẳng chứa cần bằng phương pháp điều khiển tự động dựa trên các bề mặt trượt phân cấp vì đây là một trong những phương pháp điều khiển tự động kỳ vọng có độ ổn định tốt, hội tụ nhanh vì những ưu điểm của nó nhằm để nâng cao độ an toàn, rút ngắn tiền độ thi công, tiết kiệm chi phí của dự án, nâng cao năng suất của ngành công nghiệp xây dựng kết cấu thép ở Việt Nam. Nghiên cứu về dập tắt dao động của cụm móc treo và cụm dầm thép trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa cần đã được tác giả thực hiện nghiên cứu trong khuôn khổ đề tài cấp trường trọng điểm [40] do vậy nên ở tại bài báo này chúng tôi xin phép không trình bày lại nữa mà chúng tôi chỉ tập trung vào việc trình bày giải pháp dập tắt một cách triệt để dao động của cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế trong mặt phẳng chứa cần của cần trục tháp góp phần vào việc nghiên cứu dập tắt hoàn toàn các dao động có thể xuất hiện trong quá trình tự động hóa lắp ghép dầm thép tiền chế. Cần trục nói chung và cần trục tháp xây dựng nói riêng 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 nhiều ưu điểm như 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 cầu 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 cả ba nhóm cần trục này được mô tả bằng một hệ tọa độ đề các. Trong không gian hệ tọa độ đề 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 hạ và di chuyển thay đổi tầm với với vận tốc cao sẽ dẫn đến sự lắc nhúc nhích quanh tâm của xe con theo phương ngang cũng như sự dao động rất lớn của vật nâng và móc treo quanh vị trí cân bằng thẳng đứng và việc kéo dài sự lắc của tải trọng nâng và móc treo sẽ dẫn tới mất độ an toàn trên công trường xây dựng, ảnh hưởng đến độ dừng chính xác, thời gian vận chuyển hàng hóa, khối lượng vật liệu chế tạo bị tăng, xuất hiện tải trọng động lớn và năng suất phục vụ của cần trục nói chung là thấp. Những điều này có thể được hiểu một cách khách quan thông qua công thức tính toán năng suất sử dụng (năng suất thực tế) N_{tt} của cần trục xây dựng như sau [44]:

$$N_{tt} = Q.\, k_q.\, k_{tg}.n \text{ [tấn / h]} \quad (1)$$

Trong đó: Q - tải trọng nâng (tải trọng của cụm dầm thép tiền chế), [tấn]; k_q - hệ số sử dụng tải trọng, thông thường $k_q = 0{,}8 \ldots 0{,}9 = Q_{tb}/Q$; k_{tg} - Hệ số sử dụng thời gian làm việc của cần trục; $n = \frac{3600}{T_{ck}}$ – là số chu kỳ làm việc của cần trục trong một giờ; T_{ck} – thời gian của 1 chu kỳ làm việc của cần trục (giây) ; Trong trường hợp tổng quát T_{ck} được xác định là: $T_{ck} = t_n + t_h + 2t_{dc} + 2t_{tv} + 2t_q + t_1 + t_2 + t_3$ [s]. Với

$t_n = \frac{l_n}{v_n}$ - thời gian nâng dầm thép tiền chế [s]; $t_h = \frac{l_h}{v_h}$ - thời gian hạ dầm thép tiền chế [s]; t_{dc} - thời gian di chuyển cần trục (nếu cần trục di chuyển trên ray) [s]; $t_{tv} = \frac{l_{tv}}{v_{tv}}$ - thời gian thay đổi tầm với của cần trục [s]; t_q - thời gian quay cần trục [s]; t_1- thời gian hạ dầm thép tiền chế xuống vị trí cần lắp ghép [s]; t_2- thời gian nâng móc treo lên vị trí lắp ráp sau khi đã tháo cụm móc treo ra khỏi cụm dầm thép tiền chế [s]; t_3- thời gian làm việc phụ bằng tay khác chẳng hạn như chằng buộc dầm thép tiền chế, cố định, tháo móc treo và dây chằng ra khỏi dầm thép tiền chế [s]. Như vậy rõ ràng năng suất thực tế của cần trục là tỷ lệ nghịch với thời gian của 1 chu kỳ làm việc T_{ck} điều này có nghĩa rằng muốn nâng cao độ an toàn, giảm chi phí kiện tụng khi sử dụng cần trục, tăng năng suất của cần trục và giảm tải trọng động $F_{qt} = m.\vec{a}$ (với m là khối lượng và a là gia tốc và nếu các cơ cấu chuyển động ổn định ở tốc độ cao thì gia tốc a = 0) tác động lên máy thì ta phải tìm giải pháp giảm thời gian của 1 chu kỳ làm việc hay nói cách khác là phải tìm cách để nâng cao các tốc độ làm việc của các cơ cấu chẳng hạn như các tốc độ của cơ cấu nâng, hạ dầm thép tiền chế, tăng tốc độ cơ cấu di chuyển xe con để thay đổi tầm với nhanh hơn trong khi các dao động của xe con, của móc treo và của cụm dầm thép tiền chế phải được điều khiển dập tắt một cách nhanh nhất có thể, đây là vấn đề rất cấp thiết vì rằng móc treo và cụm dầm thép tiền chế thường có những chuyển động không ổn định, gây ra rung lắc lớn khi sức nâng và tốc độ làm việc của các cơ cấu công tác lớn.



Hình 6. Biểu đồ gia tốc ở các giai đoạn mở máy, chuyển động ổn định và phanh dừng của cơ cấu di chuyển xe con cần trục tháp. T_{mm} - Thời gian mở máy (giây); T_{od} - Thời gian chuyển động ổn định (giây); T_{ph} - Thời gian phanh dừng cơ cấu di chuyển xe con cần trục tháp (giây); V_{od} – vận tốc chuyển động ổn định của cơ cấu di chuyển xe con cần trục tháp (m/s).

Nếu không giải quyết được những vấn đề nêu trên thì thời gian của một chu kỳ lắp ghép bị kéo dài và sự tích lũy thời gian dao động của móc treo và cụm dầm thép tiền chế trong hàng ngàn chu kỳ lắp ghép sẽ dẫn đến không tiết kiệm được hàng tỷ USD khi chúng ta chế tạo và khai thác các cần trục mà không được nghiên cứu tìm giải pháp điều khiển tự động hợp lý để giảm và triệt tiêu rung động cho móc treo và cụm dầm thép tiền chế trong mặt phẳng chứa cần. Để các vấn đề nêu trên được cải thiện theo hướng tích cực hơn thì bài toán điều khiển giảm thiểu rung lắc cho xe con cần trục khi mang tải trọng nâng đã trở thành một trong những chủ đề nghiên cứu trọng tâm được nhiều tác giả quan tâm trong khoảng 2 thập kỷ gần đây. Trước đây, các 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 dao động thụ động một bậc tự do, tuy nhiên mô hình toán học ở dạng này là khá đơn giản và không phản ánh chính xác được kết cấu của 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 các mục tiêu điều khiển như đã kỳ vọng. Ở một số điều kiện vận hành, xe con, móc treo và cụm dầm thép tiền chế nên được mô hình hóa bằng cơ hệ ba điểm khối lượng phân tán thay vì một điểm khối lượng tập trung như ở tại mô hình con lắc một bậc tự do. Giả thiết điểm khối lượng phân tán này dẫn đến mô hình động lực học xe con cần trục tháp ở dạng ba bậc tự do và với giả thiết như vậy thì hệ xe con cần trục tháp ở dạng ba bậc tự do là cơ hệ bị hụt cơ cấu chấp hành (tức là hệ thống có số bậc tự do lớn hơn số đầu vào điều khiển độc lập (số động cơ)). Thực tế mô hình toán học của xe con cần trục trong mặt phẳng chứa cần là có 3 bậc tự do (ba mục tiêu cần điều khiển là x, θ_1, θ_2) nhưng chỉ có một tín hiệu điều khiển đầu vào duy nhất do động cơ điện dẫn truyền động cho bánh xe chủ động của xe con sinh ra $f(t) = u(t)$ nên nó là cơ hệ bị hụt cơ cấu chấp hành. Hệ này vẫn có động cơ hoạt động bình thường và biến x chính xác là tọa độ suy rộng tịnh tiến chủ động của khối tâm xe con dọc theo tay cần nằm ngang hướng trục OX tính từ tọa độ gốc ban đầu được điều khiển trực tiếp do lực f của động cơ dẫn truyền động cho bánh xe chủ động của xe con cần trục còn θ_1, θ_2 lần lượt là các góc lắc dao động thụ động gián tiếp của móc treo và cụm dầm thép tiền chế quanh vị trí cân bằng thẳng đứng với các tần số dao động riêng dưới tác dụng của lực quán tính. Việc điều khiển mô hình xe con cần trục tháp ở dạng ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần có thể sử dụng nhiều phương pháp điều khiển hơn với kỳ vọng có thể có chất lượng, hiệu quả điều khiển giảm thiểu và dập tắt các dao động rung lắc tốt hơn so với mô hình xe con cần trục ở dạng một bậc tự do. Hệ xe con cần trục ở dạng ba bậc tự do là một hệ phi tuyến bất định với tính chất bất định được thể hiện thông qua các tham số ví dụ như tải nâng thay đổi, hệ số mà sát giữa bánh xe con và mặt đường ray di chuyển thay đổi, độ cứng và sự co giãn của dây cáp thay đổi, do đó một trong những phương pháp khả thi để giải quyết bài toán điều khiển cơ hệ bất định như vậy là áp dụng phương pháp điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp. Điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp bắt buộc phải là hệ thống điều khiển theo vòng kín có phản hồi.

Ở ngoài nước, trong khoảng hơn hai thập niên trở lại đây việc nghiên cứu và ứng dụng điều khiển xe con cần trục ở dạng một bậc tự do là vấn đề đã được nhiều tác giả quan tâm, 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 quĩ 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]. 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 ba 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, tải trọng gió giật tác dụng theo phương ngang và móc treo kèm theo các can thiệp về mặt cơ học là rất phức tạp và cho đến nay thì đã có một số nghiên cứu điều khiển mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc ba 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 cần trục của các nước Tây Phương chào hàng lên tới khoảng 200.000 USD/hệ thống).

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 một bậc tự do bằng một số phương pháp điều khiển phổ biến, tuy nhiên chất lượng, hiệu quả 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 tự động triệt tiêu dao động cho móc treo và xe con bằng phương pháp điều khiển thụ động 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 cẩu tháp bằng phương pháp điều khiển tiền định của Phạm Lê Công và các tác giả [35], điều khiển cầu trục kết hợp chống rung lắc và tránh vật cản của Lê Mạnh Qúi và các tác giả [36], năm 2025 tác giả Lê Hồng Quân cũng tiếp tục thực hiện nghiên cứu giải pháp triệt tiêu rung động cho vật nâng và cụm móc treo của xe con cần trục nói chung trong mặt phẳng chứa cần bằng phương pháp điều khiển tự động thụ động [37], kết quả nghiên cứu và thử nghiệm mô phỏng bằng số cho thấy đây cũng là một trong những phương pháp điều khiển tự động cho chất lượng điều khiển tốt vào loại hàng đầu so với các phương pháp khác, điều khiển chống rung cho cầu trục ba chiều bằng phương pháp Hybrid Shape của Tưởng Xuân Thưởng và các tác giả [38], 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 [39]. Chủ đề điều khiển chống rung lắc cho mô hình động lực học xe con cần trục ở dạng ba 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 và vân vân. Tóm lại ở trong nước, việc nghiên cứu điều khiển triệt tiêu dao động của cụm dầm thép tiền chế và cụm móc treo trong hệ xe con cần trục ở dạng mô hình ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần 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, bí quyết tinh vi của công nghệ cũng như thiếu chi phí đầu tư thử nghiệm, ứng dụng với giá thành rất cao. Theo cập nhật tốt nhất của các tác giả thì tại Việt Nam việc nghiên cứu tìm giải pháp giảm thiểu các góc lắc của vật nâng và móc treo để nâng cao tốc độ làm việc của các cơ cấu công tác của xe con cần trục ở dạng dao động ba 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 [40] 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 cần trục dao động ở dạng con lắc ba bậc tự do để xây dựng nên đường quĩ đạo gia tốc theo thời gian thực làm cơ sở cài đặt cho máy biến tần điều khiển động cơ của cơ cấu quay cần 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 vuông góc với mặt phẳng chứa cần) nhằm nâng cao tốc độ làm việc, giảm tải trọng động và nâng cao độ an toàn và nâng cao năng suất cần trục 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 ứng dụng vào thiết kế chế tạo ngoài thực tiễn vì lý do thời gian và tài lực cho nghiên cứu còn rất eo hẹp, tuy nhiên các kết quả nghiên cứu đã mở ra cho các chuyên gia hoạt động trong lĩnh vực xây dựng và nghiên cứu thiết kế chế tạo cần trục thấy được tiềm năng to lớn khi có thể áp dụng khá nhiều phương pháp điều khiển tự động tiên tiếp áp dụng vào mô hình xe con cần trục dao động ở dạng ba bậc tự do. 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 [41, 42] đó là nghiên cứu giải pháp điều khiển chống rung cho xe con cần trục ở dạng ba 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 các bộ 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 cần trục ở dạng dao động 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 cần trục dao động ở dạng ba bậc tự do là rất cần thiết và các kết quả mô phỏng trên máy tính bằng phần mềm Matlab để hỗ trợ xem xét

tính hiệu quả của các bộ điều khiển sẽ cho chúng ta thấy được hiệu quả, chất lượng điều khiển của các phương pháp điều khiển tốt nhất từ đó các hãng sản xuất cần trục trong nước có thể tiến hành thử nghiệm ngoài thực tế và có các lựa chọn để ứng dụng trong từng điều kiện cụ thể. Liên quan đến việc điều khiển xe con cần trục dao động ở dạng ba bậc tự do 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 [34]. Ứng dụng bộ điều khiển thụ động kết hợp quan sát cho hệ thống cầu trục con lắc đôi cũng được Bùi Thị Khánh Hòa và các tác giả nghiên cứu [43], trong công trình nghiên cứu này phương pháp điều khiển thụ động kết hợp với bộ quan sát trạng thái để cải thiện chất lượng điều khiển của hệ thống, nâng cao hiệu quả làm việc, nghiên cứu cũng được mô phỏng bằng số dựa trên phần mềm Matlab/Simulink, tuy nhiên tính hiệu quả điều khiển và tính ổn định của bộ điều khiển theo lý thuyết ổn định của Lyapunov chưa được so sánh đối chiếu với các phương pháp điều khiển khác. Như vậy rõ ràng việc nghiên cứu các phương pháp điều khiển để giảm rung động cho vị trí xe con dọc tay cần nằm ngang, móc treo và vật nâng trong mô hình xe con cần trục dao động ở dạng ba bậc tự do so với mô hình một bậc tự do ở trong nước là còn khá khiêm tốn và hiệu quả điều khiển mô hình xe con ở dạng hai bâc tự do rõ ràng là tốt hơn nhiều so với mô hình xe con cần trục ở dạng một bậc tự do. Vì vậy việc thực hiện nghiên cứu ứng dụng giải pháp điều khiển tự động xe con cần trục bằng phương pháp kiểu trượt dựa trên cơ sở tăng dần các bề mặt trượt phân cấp áp dụng cho mô hình toán học của xe con cần trục tháp ở dạng ba bậc tự do để triệt tiêu các dao động nhanh nhất cho vị trí xe con, cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế phục vụ quá trình lắp ghép tự động dầm thép tiền chế phục vụ lắp ghép kết cấu thép tiền chế nhà thép nhiều tầng là hết sức cấp thiết vì rằng các vận tốc góc của cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế là luôn dao động trong hầu hết các trường hợp cần trục làm việc. Đây có thể xem là một trong những giải pháp góp phần làm tăng năng suất của cần trục, giảm thiểu nguy cơ tai nạn trên công trường, giảm thời gian trì hoãn tiến độ xây dựng khi mất an toàn xảy ra, giảm tải trọng động tác dụng lên kết cấu thép và các cơ cấu công tác của máy, giảm phát sinh chi phí tai nạn xây dựng do kiện tụng gây ra đồng thời chủ động được công nghệ và có thể nâng cấp được các đặc tính kỹ thuật của các cần trục do các tập đoàn thiết kế chế tạo cần trục xây dựng của Việt Nam đảm nhiệm đồng thời có thể sử dụng kết quả nghiên cứu làm chuyên đề phục vụ cho các mục đích giảng dạy, tham khảo cho sinh viên, học viên các tại các bậc đại học và sau đại học thuộc chuyên ngành Cơ khí động lực và điều khiển, Tự động hóa, Máy xây dựng, Cơ điện tử với sự trợ giúp của các chương trình máy tính cũng như cùng với các chuyên gia hướng tới triển khai áp dụng thiết kế chế tạo ngoài thực tế sản xuất. Từ các căn cứ nêu trên nên bài báo này tập trung trình bày bao gồm các nội dung chính như sau:

- Giới thiệu về mô hình toán học xe con cần trục tháp dao động ở dạng ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần và mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa cần và phương trình vi phân chuyển động của hệ thống xe con cần trục hai bậc tự do khi đang mang cụm dầm thép tiền chế di chuyển đến vị trí cần lắp ghép trong mặt phẳng chứa cần.

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

- Giới thiệu đôi hàng về bộ điều khiển tự động kiểu trượt theo các bề mặt trượt phân cấp và áp dụng cho mô hình xe con cần trục tháp ở dạng ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần khi đang di chuyển cụm dầm thép tiền chế dọc theo tay cần nằm ngang.

- Phân tích sự ổn định của bộ điều khiển kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp.

- Xây dựng sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển tự động kiểu phân cấp bề mặt trượt theo vòng kín có phản hồi áp dụng cho mô hình toán học xe con cần trục 3 bậc tự do dao động trong mặt phẳng chứa cần.

- Mô phỏng kiểm chứng sự ổn định tiệm cận của bộ điều khiển kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp bằng cách sử dụng chương trình Matlab để mô phỏng bằng số.

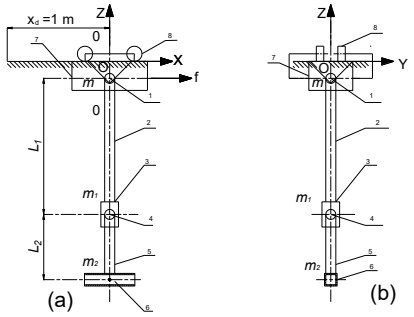
- Các kết quả mô phỏng bằng số

- Một số nhận xét về kết quả mô phỏng bằng số để hỗ trợ bộ điều khiển kiểu trượt theo các bề mặt trượt phân cấp áp dụng cho mô hình toán học của xe con cần trục tháp dao động ở dạng ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần

- Kết luận

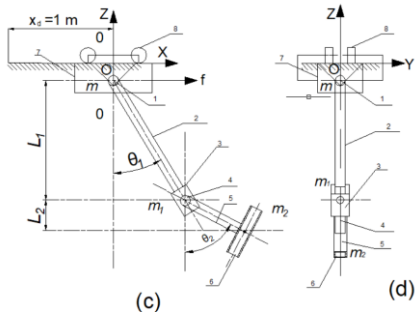
2. Mô hình toán học xe con cần trục ở dạng ba bậc tự do và phương trình vi phân mô tả chuyển động

Để có thể phân tích hệ thống cơ điện tử tự động của xe con cần trục tháp đang mang cụm dầm thép và di chuyển dọc theo tay cần nằm ngang (trong mặt phẳng chứa tay cần) và khi phanh giữ xe con đang mang cụm dầm thép tiền chế và quay cần trục (trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa tay cần) dao động ở dạng ba bậc tự do thì bước đầu tiên ta phải thực hiện mô tả toán học mô hình xe con cần trục tháp trong các mặt phẳng tương ứng nêu trên (xin mời xem mô tả chi tiết tại các Hình 7 và Hình 8 dưới đây):



Hình 7. Mô hình toán học của xe con của cần trục tháp đang mang dầm thép tiền chế ở trạng thái cân bằng thẳng đứng (chưa dao động hoặc đã được dập tắt hẳn dao động) trong mặt phẳng chứa cần (mặt phẳng ZOX – hình (a)) và trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng chứa cần (mặt phẳng ZOX hình – (b)) dao động ở dạng ba bậc tự do; 0 – 0 là vị trí cân bằng thẳng đứng đi qua tâm xe con cần trục; $X_d = 1$ m là khoảng cách di chuyển xe con trong tình huống giả định để mô phỏng chương trình

Matlap tính từ vị trí gốc tọa độ ban đầu đến vị trí tâm xe con nằm ở giữa hai cột thép đã được lắp dựng; f(t)– là lực tác động tại tâm xe con theo phương ngang khi xe con di chuyển đến vị trí mong muốn làm cho tâm xe con di chuyển nhúc nhích theo trục 0X, lực f(t) thay đổi theo thời gian và được mã hóa bằng tín hiệu điều khiển đầu vào duy nhất là f(t) = u (t). 1 - cụm puly gắn trên tâm xe con được mô hình hóa bằng một khớp không ma sát; 2 cáp nâng được mô hình hóa bằng một thanh cứng không trọng lượng có chiều dài ở vị trí cân bằng thẳng đứng $l_1 = L_1$; cụm móc treo được mô hình hóa bằng một khối lượng tập trung m_1; 4- cụm puly tại móc treo được mô hình hóa bằng một khớp xoay không ma sát; 5- cáp treo dầm thép tiền chế được mô hình hóa bằng 1 thanh cứng không trọng lượng có chiều dài ở vị trí cân bằng thẳng đứng là $l_2 = L_2$; 6 - dầm thép tiền chế và cụm cơ cấu xoay lắp ghép dầm tự động vào vị trí góc lắp ghép được mô hình hóa bằng khối lượng tập trung m_2; 7- xe con có các bánh xe chạy trên hai thanh biên phía dưới của tay cần của cần trục tháp có khối lượng là m; 8 - Bánh xe con di chuyển trên hai thanh biên phía dưới của tay cần nằm ngang.



Hình 8. Mô hình toán học biểu diễn mô hình hóa xe con của cần trục tháp đang mang cụm dầm thép tiền chế đang dao động lắc trong mặt phẳng chứa cần (mặt phẳng ZOX – hình (c)) và chưa dao động (hoặc đã tắt hẳn dao động) trong mặt bằng vuông góc với mặt phẳng chứa cần (mặt phẳng ZOY – hình (d)) dao động ở dạng ba bậc tự do (chính là $\boldsymbol{\theta}_1$, $\boldsymbol{\theta}_2$ và chuyển động của khối tâm xe con x theo phương 0X dọc tay cần nằm ngang đến vị trí giữa hai cột thép); 0 – 0 là vị trí cân bằng thẳng đứng đi qua tâm xe con cần trục; $X_d = 1$ m là khoảng cách di chuyển xe con trong tình huống giả định để sử dụng chương trình mô phỏng Matlap tính từ vị trí gốc tọa độ ban đầu đến vị trí tâm xe con theo phương ngang nằm ở trung điểm của hai cột thép đã được lắp dựng; f – là lực tác động tại tâm xe con theo phương ngang. 1 - cụm puly gắn trên tâm xe con được mô hình hóa bằng một khớp không ma sát; 2 - cáp nâng được mô hình hóa bằng một thanh cứng không trọng lượng có chiều dài ở vị trí góc lắc $\boldsymbol{\theta}_1$ là l_1 (có thứ nguyên là mét); 3- cụm móc treo được mô hình hóa bằng một khối lượng tập trung m_1; 4- cụm puly tại móc treo được mô hình hóa bằng một khớp xoay không ma sát; 5- cáp treo dầm thép tiền chế được mô hình hóa bằng một thanh cứng không trọng lượng có chiều dài ở vị trí góc lắc $\boldsymbol{\theta}_2$ là l_2 (có thứ nguyên là mét); 6 - dầm thép tiền chế và cụm cơ cấu xoay lắp ghép dầm tự động được mô hình hóa bằng khối lượng tập trung m_2; 7- xe con có các bánh xe chạy trên hai thanh biên phía dưới của tay cần nằm ngang của cần trục tháp có khối lượng là m; 8- bánh xe của xe con chạy trên 2 thành biên phía dưới của tay cần nằm ngang.

Giả thiết rằng các chiều dài l_1 và l_2 là không thay đổi. Xe con cần trục tháp có khối lượng m được di chuyển dưới tác động của lực f (t), bản chất của lực $f(t)$ là lực chủ động (lực phát động hoặc lực phanh) do động cơ điện truyền qua hộp giảm tốc dẫn truyền động cho bánh xe chủ động của xe con sinh ra để đẩy cho xe con di chuyển. Lực quán tính không phải là $f(t)$ mà lực quán tính là hệ quả động học sinh ra khi lực $f(t)$ (là lực tác động đầu vào) thay đổi đột ngột ở các giai đoạn mở máy (gia tốc) hoặc phanh dừng (giảm tốc), chính sự thay đổi đột ngột này tác động lên xe con, móc treo và vật nâng gây kích động lắc cho hai góc lắc thụ động θ_1, θ_2. Bộ điều khiển kiểu trượt phân cấp hoạt động theo nguyên lý mượn chính lực quán tính này để triệt tiêu dao động chéo của hệ thống. 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 phụ mô tả vị trí của xe con so với gốc tọa độ theo phương ngang OX. Phương trình mô tả động lực học xe con cần trục tháp ở dạng con lắc ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần đã được xác định bằng phương pháp cơ học Lagrange II:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1a)$$

Ở đây $q = [x, \theta_1, \theta_2]^T$ là véc tơ của các tọa độ suy rộng, $\tau = [f, 0, 0]^T = [u, 0, 0]$ là véc tơ của lực suy rộng, chỉ có một đầu vào, g là gia tốc trọng trường, M(q) là ma trận quán tính 3x3, $C(q,\dot{q})\dot{q}$ là véctơ Coriolis và Momen xoắn hướng tâm, G(q) là véc tơ của số hạng trọng trường. Thực hiện tuyến tính hóa bằng cách thực hiện phép khai triển chuỗi Taylor quanh vị trí cân bằng thẳng đứng (vị trí 0-0) chỉ giữ lại các thành phần vô cùng bé bậc nhất và bỏ qua các thành phần vô cùng bé bậc cao do hệ chỉ dao động bé. Tại bài báo này chúng tôi trình bày lại phương trình vi phân của hệ dao động tự do sau khi tuyến tính của xe con cần trục được mô tả ở dạng con lắc ba bậc tự do như sau:

$$\bar{M}\ddot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} = 0 \ (2)$$

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

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} m + m_1 + m_2 & (m_1 + m_2)l_1 & m_2 l_2 \\ (m_1 + m_2)l_1 & (m_1 + m_2)l_1^2 & m_2 l_1 l_2 \\ m_2 l_2 & m_2 l_1 l_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m_1 + m_2)gl_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 g l_2 \end{bmatrix}$$

Theo khái niệm của không gian trạng thái, phương trình (2) cũng có thể được viết bằng một tập các phương trình vi phân thông thường bậc một như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_1(x) + b_1(x)u \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= f_2(x) + b_2(x)u \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= f_3(x) + b_3(x)u \end{aligned} \quad (3)$$

Để chuyển hệ phương trình vi phân bậc hai ở trên sang hệ phương trình trạng thái bậc một không gian trạng thái nhằm tính toán f_i và b_i, ta phải thực hiện phép biến đổi sau đây :

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)\,[\tau - C(q, \dot{q})\,\dot{q} - G(q)]$$

Tại phương trình (3) ở trên thì **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 cụm dầm thép tiền chế; u (t) = f (t) ký hiệu cho tín hiệu điều khiển đầu vào (chính là lực 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 trạng thái x, thực tế là các biểu thức toán học giải tích phụ thuộc vào các thông số vật lý của xe con cần trục như m, m_1, m_2 l_1, l_2 và 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 như sau:

$$\begin{aligned}
\Delta = {} & (m_1 + m_2)m_2l_1^2l_2^2[(m + m_1 + m_2) - (m_1 + m_2)\cos^2(x_3)] \\
& - m_2^2l_1^2l_2^2[(m_1 + m_2)\cos^2(x_5) \\
& + (m + m_1 + m_2)\cos^2(x_3 - x_5) \\
& - 2(m_1 + m_2)\cos(x_3)\cos(x_5)\cos(x_3 - x_5)] \\
\Gamma_1 = {} & [(m_1 + m_2)m_2l_1^2l_2^2 - m_2^2l_1^2l_2^2\cos^2(x_3 - x_5)][(m_1 + m_2)l_1x_4^2\sin(x_3) \\
& + m_2l_2x_6^2\sin(x_5)] \\
& + [(m_1 + m_2)m_2l_1l_2^2\cos(x_3) - m_2^2l_1l_2^2\cos(x_5)\cos(x_3 \\
& - x_5)][m_2l_1l_2x_6^2\sin(x_3 - x_5) + (m_1 + m_2)gl_1\sin(x_3)] \\
& + \big[(m_1 + m_2)m_2l_1^2l_2\cos(x_5) - m_2{l_1}^2l_2\cos(x_3)\cos(x_3 \\
& - x_5)\big][-m_2l_1l_2x_4^2\sin(x_3 - x_5) + m_2gl_2\sin(x_5)] \\
T_1 = {} & (m_1 + m_2)m_2l_1^2l_2^2 - m_2^2l_1^2l_2^2\cos^2(x_3 - x_5) \\
\Gamma_2 = {} & \big[m_2l_1{l_2}^2\cos(x_5)\cos(x_3 - x_5) \\
& - (m_1 + m_2)m_2l_1l_2^2\cos(x_3)\big][(m_1 + m_2)l_1x_4^2\sin(x_3) \\
& + m_2l_2x_6^2\sin(x_5)] \\
& + [m_2^2l_2^2\cos^2(x_5) \\
& - (m + m_1 + m_2)m_2l_2^2][m_2l_1l_2x_6^2\sin(x_3 - x_5) \\
& + (m_1 + m_2)gl_1\sin(x_3)] \\
& + [(m + m_1 + m_2)m_2l_1l_2\cos(x_3 - x_5) \\
& - (m_1 \\
& + m_2)m_2l_1l_2\cos(x_3)\cos(x_5)][-m_2l_1l_2x_4^2\sin(x_3 - x_5) \\
& + m_2gl_2\sin(x_5)] \\
T_2 = {} & m_2^2l_1^2l_2^2\cos(x_5)\cos(x_3 - x_5) - (m_1 + m_2)m_2l_1l_2^2\cos(x_3) \\
\Gamma_3 = {} & \{(m_1 + m_2)m_2l_1^2l_2[\cos(x_3)\cos(x_3 - x_5) - \cos(x_5)]\}[(m_1 \\
& + m_2)l_1x_4^2\sin(x_3) + m_2l_2x_6^2\sin(x_5)] \\
& + [(m + m_1 + m_2)m_2l_1l_2\cos(x_3 - x_5) \\
& - (m_1 \\
& + m_2)m_2l_1l_2\cos(x_3)\cos(x_5)][m_2l_2x_6^2\sin(x_3 - x_5) \\
& + (m_1 + m_2)gl_1\sin(x_3)] \\
& + [(m_1 + m_2)^2l_1^2\cos^2(x_3) \\
& - (m + m_1 + m_2)(m_1 \\
& + m_2)l_1^2][-m_2l_1l_2x_4^2\sin(x_3 - x_5) + m_2gl_2\sin(x_5)] \\
T_3 = {} & (m_1 + m_2)m_2l_1^2l_2\cos(x_3)\cos(x_3 - x_5) - (m_1 + m_2)m_2{l_1}^2l_2\cos(x_5)
\end{aligned}$$

Bộ điều khiển (máy tính nhúng/MATLAB) chỉ cần nhận 6 biến trạng thái thực tế từ các cảm biến đưa về (vị trí xe con x, vận tốc $\dot{x}$, các góc lắc θ_1, θ_2 và vận tốc góc θ_1, θ_2), sau đó máy tính sẽ tự động thay các giá trị này vào công thức giải tích sẵn có để tự tính ra $fi(x)$ và bi (x) ngay bên trong bộ nhớ của nó.

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

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{2}(\alpha - \sqrt{\beta})} \quad (4)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g}{2}(\alpha + \sqrt{\beta})} \quad (5)$$

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 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 [23, 24]. 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. 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 [25] công bố chính thức. Theo tên của phương pháp điều khiển này thì một hệ thống điều khiển tự động 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 tự động kiểu trượt, đây cũng là một khoảng cách giữa hệ thống điều khiển 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 lấp đi khoảng trống 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 có khả năng đa nhiệm.

4. Bộ điều khiển kiểu trượt phân cấp các bề mặt trượt

4.1 Bộ điều khiển kiểu các bề mặt trượt phân cấp

Bộ điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp bắt buộc phải là hệ thống điều khiển theo vòng kín có phản hồi. Hệ thống không thể là vòng hở vì bản chất của bộ điều khiển trượt là liên tục đo lường trạng thái thực tế của xe con và các góc lắc để tính toán lực tác động, giúp hệ thống chống lại các thành phần bất định và nhiễu động. Nếu là vòng hở (không có cảm biến đo góc lắc và vị trí đưa về), bộ điều khiển sẽ hoàn toàn bị mù thông tin và không thể dập tắt được dao động của móc treo hay dầm thép tiền chế khi có gió hoặc khi xe con bị phanh đột ngột. Qui luật điều khiển của bộ điều khiển vòng kín có phản hồi là luôn liên tục đo lường và sử dụng trạng thái phản hồi của đối tượng để ép quỹ đạo hệ thống bám sát các bề mặt trượt. Bộ điều khiển cần thu thập thông tin về trạng thái của hệ thống như vị trí, vận tốc, hoặc sai số theo thời gian thực để tính toán giá trị mặt trượt phân cấp. Nhờ đặc tính phản hồi các biến trạng thái liên tục, cấu trúc này cho phép hệ thống chống lại nhiễu loạn (chẳng hạn như tải trọng gió thổi mạnh hoặc gió giật tác động trực tiếp lên dầm thép tiền chế và lên cần trục làm tăng góc lắc của dây cáp một cách bất định khiến xe con bị lệch khỏi vị trí mong muốn, lực cản không khí tác động ngược chiều chuyển động nâng hạ và thay đổi theo kích thước bề mặt của vật nâng và vân vân) và tính bất định của mô hình rất tốt. Trong hệ thống điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp, thay vì

dùng một mặt trượt đơn, giải pháp này kết hợp nhiều bề mặt trượt theo các tầng hoặc cấp khác nhau nhằm giải quyết bài toán điều khiển tự động cho các hệ thống bị hụt các cơ cấu chấp hành. Chính vì các đặc điểm khá tốt này của giải pháp điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp nên việc nghiên cứu ứng dụng dập tắt dao động cho cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế trong mô hình toán học xe con cần trục tháp dao động ở dạng ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần là rất cần thiết để giúp chúng ta làm chủ được công nghệ và tiến tới ứng dụng cho việc thiết kế chế tạo thử nghiệm các cần trục xây dựng trí tuệ nhân tạo được qui hoạch các chuyển động theo các quĩ đạo dường lắp ghép tối ưu và an toàn để tham gia các hoạt động lắp ghép tự động các nhà thép tiền chế trong điều kiện Việt Nam nhằm làm giảm chi phí cho dự án.

Xét đến phương trình toán học mô tả xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do (2), ta thấy có sáu biến trạng thái x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 được mô tả trong phương trình (2). Hệ thống được mô tả bởi 2 véc tơ bề mặt trượt trong đó véc tơ bề mặt trượt lớp thứ nhất s có 3 hệ thống phụ s_1 , s_2, s_3 và mỗi hệ thống phụ được mô tả bởi hai biến trạng thái (xem hình 9). Véc tơ bề mặt trượt lớp thứ nhất s được xác định nhằm để xây dựng cấu trúc các bề mặt trượt phân cấp, được thiết lập thành công thức toán học như sau:

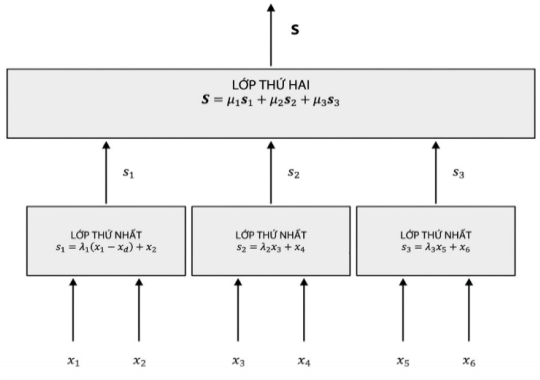
$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1(x_1 - x_d) + x_2 \\ \lambda_2 x_3 + x_4 \\ \lambda_3 x_5 + x_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ở đây λ_1 , λ_2 và λ_3 là các hệ số mặt trượt tại lớp trượt thứ nhất có cùng thứ nguyên là s^{-1} hay là (1/giây).

Từng thành phần tại phương trình (6) mô tả một bề mặt trượt hệ thống phụ lớp thứ nhất. Có ba bề mặt trượt các hệ thống phụ được tổng hợp cùng nhau để xây dựng nên mặt trượt lớp thứ nhất s của cấu trúc điều khiển theo bề mặt trượt phân cấp như trình bày tại hình 9. Dựa trên cấu trúc mô tả tại Hình 9 thì bề mặt trượt lớp thứ hai S được xác định như sau:

$$S = \mu^{\mathbf{T}}\mathbf{s} = \mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 + \mu_3 s_3 \quad (7)$$

Với $\mu^{\mathbf{T}} = [\mu_1, \mu_2, \mu_3]^T$ và $\mu_1\,(kg/s), \mu_2(kg.m/s), \mu_3(kg.m/s)$ là các hệ số trọng số hợp nhất tại lớp trượt thứ 2.



Hình 9. Sơ đồ toán học mô tả cấu trúc phân cấp của các bề mặt trượt.

Với $x_1 = x$ được gọi là vị trí tọa độ thực tế của xe con cần trục di chuyển, có thứ nguyên là mét; $x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x}$ được gọi là vận tốc di chuyển thực tế của xe con, có thứ nguyên là (m/s); $x_3 = \boldsymbol{\theta}_1$ là góc lắc lớp thứ nhất (góc lắc của móc treo), có thứ nguyên là (rad); $x_4 = \dot{x}_3 = \dot{\theta}_1$ là vận tốc góc lắc của móc treo, có thứ nguyên là (rad/s); $x_5 = \boldsymbol{\theta}_2$ là góc lắc lớp thứ hai (góc lắc của tải trọng nâng), có thứ nguyên là (rad); $x_6 = \dot{x}_5 = \dot{\theta}_2$ là vận tốc góc lắc của tải trọng nâng, có thứ nguyên là (rad/s).

Dễ nhận thấy cấu trúc phân cấp mặt trượt được xác định tại phương trình (7) giống như một sự kết hợp đơn giản của các biến trạng thái hệ thống. Thực tế, một sự kết hợp như vậy làm xuất hiện một số bài toán điều khiển mới đó là thiết kế qui luật điều khiển kiểu mặt trượt phân cấp và kèm theo là sự đảm bảo về phân tích ổn định của từng bề mặt trượt.

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

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (8)$$

Tại phương trình (8) u (t) = f (t) là tín hiệu điều khiển đầu vào duy nhất thay đổi theo thời gian thực, u_{eq}(t) là qui luật điều khiển tương đương và u_{sw} (t) là qui luật điều khiển biến đổi, trong đó qui luật điều khiển tương đương được xác định như sau:

$$u_{eq}(t) = u_{eq1}(t) + u_{eq2}(t) + u_{eq3}(t) \quad (9)$$

ở đây u_{eq1}, u_{eq2} và u_{eq3} đại diện cho qui luật điều khiển tương đương của ba hệ thống phụ lần lượt là s_1, s_2, s_3. Khi các quĩ đạo trạng thái của ba biến phụ đạt tới các bề mặt trượt hệ thống phụ của chúng tại lớp thứ nhất thì các qui luật điều khiển tương đương đã cho có thể được suy ra như sau:

$$\dot{s} = 0 \quad (10)$$

Các qui luật điều khiển tương đương này có thể được thiết lập bằng các phương trình toán học như sau:

$$\begin{aligned} u_{eq1}(t) &= -\frac{1}{b_1(x)}[\lambda_1 x_2 + f_1(x)] \\ u_{eq2}(t) &= -\frac{1}{b_2(x)}[\lambda_2 x_4 + f_2(x)] \\ u_{eq3}(t) &= -\frac{1}{b_3(x)}[\lambda_3 x_6 + f_3(x)] \end{aligned} \quad (11)$$

Ngoài ra, qui luật điều khiển chuyển đổi u_{sw} (t) cần có một tác động chuyển đổi bằng tần số đủ lớn để giữ tất cả các quĩ đạo trạng thái di chuyển trên bề mặt trượt lớp thứ hai S = 0. Tại phương trình (7) thì S ký hiệu cho đường chuyển đổi mà rất cả các trạng thái hệ thống được hút vào và giữ trên đó. Để có được khả năng có thể tiếp cận của kiểu trượt tại bề mặt trượt đã được tổng hợp S thì một hàm ứng viên Lyapunov ở dạng tổng quát được xác định như sau:

$$V = \frac{1}{2}S^2 \quad (12)$$

Về mặt toán học, đây là một hàm xác định dương ($V \geq 0$), và chỉ bằng 0 khi và chỉ khi mặt trượt $S = 0$. Về mặt vật lý, $V(t)$ đại diện cho một dạng năng lượng ảo của sai số hệ thống. Khoảng cách từ trạng thái hiện tại của hệ thống đến mặt trượt mục tiêu càng xa thì năng lượng V càng lớn. Hệ thống chỉ ổn định và đạt được mục tiêu điều khiển khi lượng năng lượng sai số này giảm dần theo thời gian để tiến về 0.

Lấy đạo hàm V theo thời gian t ta có:

$$\dot{V} = S\dot{S} \quad (13)$$

Để đảm bảo điều kiện trượt $\dot{\mathbf{S}} = 0$, luật điều khiển tương đương tổng hợp u_{eq} (t) phải được tính toán lại hoàn toàn từ việc giải đạo hàm phương trình (7) bằng không:

$$\dot{S} = \mu_1.\dot{s}_1 + \mu_2.\dot{s}_2 + \mu_3.\dot{s}_3 = 0 \quad (14)$$

Lấy đạo hàm của S theo thời gian t tại phương trình (7) và thay thế đạo hàm của S theo thời gian t vào phương trình (13) ta có:

$$\dot{V} = S(\mu_1\dot{s}_1 + \mu_2\dot{s}_2 + \mu_3\dot{s}_3) \quad (15)$$

Xét phương trình toán học mô tả dao động của xe con cần trục ở dạng ba bậc tự do (2) và thay các phương trình (9) và (11) vào trong phương trình (15) thì sau đó thì phương trình (15) trở thành:

$$\dot{V} = S\{\mu_1 b_1(x)[u_{eq2} + u_{eq3} + u_{sw}] + \mu_2 b_2(x)[u_{eq1} + u_{eq3} + u_{sw}] + \mu_3 b_3(x)[u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw}]\}$$
$$= S\{[\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)]u_{sw} + \mu_1 b_1(x)(u_{eq2} + u_{eq3}) + \mu_2 b_2(x)(u_{eq1} + u_{eq3}) + \mu_3 b_3(x)(u_{eq1} + u_{eq2})\} \quad (16)$$

Trong phương trình (12), V(t) ≥0. Theo lý thuyết của Lyapunov, đạo hàm của S sẽ là phải nhỏ hơn không tại phương trình (16) để làm cho hệ thống điều khiển xe con cần trục ba bậc tự do ổn định tiệm cận.

Theo tiêu chuẩn ổn định thứ hai của Lyapunov. Nếu $\dot{V} > 0$ có nghĩa là năng lượng sai số của hệ thống tăng lên theo thời gian. Điều này đồng nghĩa với việc quỹ đạo trạng thái ngày càng rời xa mặt trượt *S*, hệ thống sẽ bị mất kiểm soát và mất ổn định. Còn nếu $\dot{V} \leq 0$ (bán âm) có nghĩa rằng tốc độ thay đổi năng lượng luôn nhỏ hơn hoặc bằng không. Điều này đảm bảo rằng năng lượng của hệ thống chỉ có thể giảm xuống hoặc giữ nguyên chứ không bao giờ tăng lên. Vì vậy, điều kiện $\dot{V} \leq 0$ là điều kiện bắt buộc để chứng minh hệ thống là ổn định (các trạng thái được chặn, không bị bùng nổ dao động vô hạn). Vì mục đích này nên định luật điều khiển chuyển đổi $u_{sw}(t)$ có thể được xác định như sau:

$$u_{sw}(t) = -\frac{\mu_1 b_1(x)(u_{eq2} + u_{eq3}) + \mu_2 b_2(x)(u_{eq1} + u_{eq3}) + \mu_3 b_3(x)(u_{eq1} + u_{eq2})}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)} - \frac{kS + \eta sgn(S)}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)} \quad (17)$$

Ở đây k là hệ số tăng cường tuyến tính và η là hệ số trượt chặng cuối, các hệ số này phải xác định dương và đều có thứ nguyên là (kg.m/s^2).

Thay thế các phương trình (9), (11) và (17) vào trong phương trình (8). Qui luật điều khiển dựa trên cấu trúc các bề mặt trượt phân cấp tại hình 9 có dạng như sau:

$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t)$ hay :

$$u(t) = -\frac{\mu_1 b_1(x)u_{eq1} + \mu_2 b_2(x)u_{eq2} + \mu_3 b_3(x)u_{eq3}}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)} - \frac{(kS + \eta sgn(S))}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)} \quad (18)$$

với $u_{eq}(t) = -\frac{\mu_1 b_1(x)u_{eq1} + \mu_2 b_2(x)u_{eq2} + \mu_3 b_3(x)u_{eq3}}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)}$

và $u_{sw}(t) = -\frac{(kS + \eta sgn(S))}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)}$

Trong hệ thống điều khiển tự động kiểu trượt phân cấp các bề mặt trượt áp dụng cho mô hình xe con cần trục dao động tự do của vị trí xe con, móc treo và vật nâng (là cụm dầm thép tiền chế) có hiện tượng chattering (dao động răng cưa tần số cao quanh bề mặt trượt) thường xảy ra do bản chất đóng cắt gián đoạn của hàm dấu sgn (S). Hàm sgn(S) là hàm bước nhảy gián đoạn (bằng 1 khi $S > 0$ và bằng -1 khi $S < 0$). Khi quỹ đạo trạng thái tiến sát về mặt trượt lớp thứ hai ($S = 0$), lực đóng cắt sẽ liên tục thay đổi trạng thái đột ngột với tần số vô hạn để ép hệ thống duy trì trên mặt trượt. Trong thực tế, do có độ trễ thời gian của cơ cấu chấp hành (động cơ dẫn động bánh xe của xe con) và nhiễu máy tính, sự thay đổi đột ngột này tạo ra các dao động răng cưa tần số cao bao quanh mặt trượt. Để triệt tiêu hoàn toàn hiện tượng dao động răng cưa tần số cao bao quanh mặt trượt do hàm dấu gây ra, tại nghiên cứu này chúng tôi sử dụng phương pháp làm mịn qui luật đóng cắt, do đó phương trình luật điều khiển chuyển đổi đóng cắt $u_{sw}(t)$ được làm mịn thông qua hàm tang phản hồi liên tục (tanh) trong một lớp biên có độ dày $\boldsymbol{\phi}$ rất nhỏ được xác định như sau:

$$u_{sw}(t) = -\frac{-kS - \eta\tanh(S/\phi)}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)} \quad (19)$$

Thay thế phương trình (19) vào phương trình (18) ta thu được phương trình qui luật điều khiển toàn cục cho hệ thống xe con cần trục tháp 3 bậc tự do dựa trên cấu trúc các bề mặt trượt tại hình 9 có dạng như sau:

$$u(t) = -\frac{\mu_1 b_1(x)u_{eq1} + \mu_2 b_2(x)u_{eq2} + \mu_3 b_3(x)u_{eq3}}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)} - \frac{(kS + \eta\tanh(\frac{S}{\phi}))}{\mu_1 b_1(x) + \mu_2 b_2(x) + \mu_3 b_3(x)} \quad (20)$$

Trong đó, *k* là hệ số tăng cường tuyến tính có thứ nguyên là (kg.m/s^2), quyết định tốc độ hội tụ của hệ thống khi quỹ đạo trạng thái còn ở xa mặt trượt, η là hệ số trượt chặng cuối, xác định dương có thứ nguyên là (kg.m/s^2) . Các hệ số này được xác định bằng phương pháp thử sai hiệu chỉnh.

4.2. Phân tích sự ổn định của bộ điều khiển kiểu trượt dựa trên cấu trúc các bề mặt trượt phân cấp

Phát biểu định lý mô tả sự ổn định của bộ điều khiển: Xét phương trình toán học mô tả xe con cần trục tháp dao động ở dạng con lắc ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần (2), việc thiết kế các bề mặt trượt (6) và (7) tuân theo qui luật điều khiển kiểu trượt phân cấp (8), việc xác định các qui luật điều khiển tương đương của ba biến hệ thống phụ như đã trình bày tại phương trình (11) và xác định qui luật điều khiển chuyển đổi như tại phương trình (17), sau đó các mặt trượt hệ thống phụ tại các lớp thứ nhất s_1, s_2 và s_3 trong phương trình (6) là ổn định tiệm cận.

Chứng minh định lý mô tả sự ổn định của bộ điều khiển kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp theo lý thuyết ổn định Lyapunov: thay qui luật điều khiển chuyển đổi (17) vào trong biểu thức đạo hàm của V tại phương trình (16) thì sau đó ta có $\dot{V}(t) < 0$. Xét điều kiện $V(t) \geq 0$ tại phương trình (12), thực tế cho thấy rằng điều kiện có thể tiếp cận của kiểu trượt là được thỏa mãn trên bề mặt trượt lớp thứ 2 và rằng kiểu trượt của bề mặt trượt lớp thứ 2 có thể tiếp cận trong thời gian hữu hạn là t_f. Do vậy, miền thời gian có thể được chia thành hai phần bởi điểm thời gian t_f. Trong khoảng thời gian [0, t_f], quĩ đạo trạng thái hệ thống di chuyển về hướng bề mặt trượt tại lớp thứ hai S. Trong khoảng thời gian tiếp theo sau [t_f, ∞] thì quĩ đạo trạng thái hệ thống tiếp tục trượt trên bề mặt trượt lớp thứ hai và hội tụ tới gốc tọa độ. Để kiểm tra các tính ổn định của các mặt trượt s_1 và s_2 trong khoảng thời gian [0, t_f] thì việc xác định một hàm chặn như sau là cần thiết phải thực hiện.

$$f_{tf}(t) = \begin{cases} 1 & t \leq t_f \\ 0 & t > t_f \end{cases} \quad (21)$$

Do đó có

$$S_{i_{tf}} = S_i.f_{tf}(t) \quad (22)$$

Và

$$\dot{S}_{i_{tf}} = \dot{S}_i.f_{tf}(t) \quad (23)$$

ở đây $i = 1, 2,$ và 3.

Các phương trình (22) và (23) đại diện cho các biến bề mặt trượt lớp thứ nhất s_1, s_2 và s_3 được chặn trên khoảng thời gian khép kín [0, t_f] và tất cả chúng có thể hội tụ với bề mặt trượt lớp thứ 2 khi kiểu trượt đạt được tại t_f. Trong khoảng thời gian mở tiếp theo (t_f, ∞) quĩ đạo hệ thống duy trì bề mặt trượt lớp thứ hai S trong hệ thống điều khiển xe con cần trục theo vòng kín có phản hồi trở nên tự động.

Nhằm để phân tích các tính ổn định của ba bề mặt trượt lớp thứ nhất, một tập nén và bất biến xác định dương phải được xác định như sau:

$$S_c = \{S \epsilon R^2 | \dot{V} \leq 0\} \quad (24)$$

Hơn nữa, việc xác định S

$$S = \{S \in S | \dot{V} = 0\} \quad (25)$$

Theo nguyên lý của LaSalle thì quĩ đạo hệ thống có xu hướng tiến đến tập bất biến lớn nhất bên trong S khi $t \to \infty$. Để tính toán tập bất biến lớn nhất $S \cap S_c$ có thể được viết lại ở dạng giao tập hợp như sau:

$$S_c \cap S = S_c \cap \{S = 0 \quad \dot{S} = 0\} \quad (26)$$

Và sau đó phương trình (24) có thể được rút ra từ phương trình (26) như sau:

$$S_c \cap S = S_c \cap \{ \mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 + \mu_3 s_3 = 0 \quad \mu_1 \dot{s}_1 + \mu_2 \dot{s}_2 + \mu_3 \dot{s}_3 = 0\} \quad (27)$$

Dấu giao tập hợp (∩) nghĩa là hệ thống bắt buộc phải thỏa mãn đồng thời cả hai điều kiện: vừa nằm trên mặt trượt, vừa có đạo hàm Lyapunov bằng không để không sinh thêm năng lượng.

Do biến bề mặt trượt lớp thứ hai S là ổn định tiệm cận, nên có sự thật cho thấy rằng quĩ đạo của bề mặt trượt lớp thứ hai S sẽ đi vào khu vực lân cận của gốc tọa độ ba chiều được xây dựng bởi các trục s_1, s_2 và s_3 khi $t \to \infty$. Sau đó từng trạng thái hệ thống phụ sẽ di chuyển về bề mặt trượt lớp thứ nhất và hướng về gốc tọa độ hệ thống phụ của nó được xây dựng bởi các biến trạng thái hệ thống phụ sao cho phương trình (28) được suy ra như sau:

$$\begin{cases} s_1 = \dot{s}_1 = 0 \\ s_2 = \dot{s}_2 = 0 \\ s_3 = \dot{s}_3 = 0 \end{cases} \quad (28)$$

Kết quả là tập bất biến lớn nhất bên trong $S \cap S_c$ thì chỉ là gốc tọa độ ba chiều được xây dựng bởi các biến bề mặt trượt s_1, s_2 và s_3 thay vì các điểm khác thì theo nguyên lý của LaSalle, tất cả các bề mặt trượt lớp thứ nhất s_1, s_2 và s_3 là ổn định tiệm cận và chỉ phụ thuộc vào các biến trạng thái x_1.

Tại phần lý thuyết điều khiển theo các bề mặt trượt phân cấp ở trên thì chúng tôi sử dụng hàm Lyapunov $V = \frac{1}{2} S^2$ cho mặt trượt tổng hợp ở lớp thứ hai (S). Từ định luật điều khiển, chúng tôi đã chứng minh được $\dot{V} \leq 0$. Tuy nhiên $\dot{V} \leq 0$ chỉ mới chứng minh được một mình mặt trượt tổng hợp S hội tụ về 0 (S→ 0), chứ chưa đủ để khẳng định các bề mặt trượt thành phần s_1, s_2, s_3 cũng hội tụ về 0. Vì lý do đó, việc áp dụng nguyên lý bất biến LaSalle để chứng minh sự hội tụ của toàn hệ thống là rất cần thiết và là điều kiện bắt buộc. Để áp dụng nguyên lý bất biến LaSalle nhằm chứng minh sự hội tụ của toàn hệ thống thì theo nguyên lý bất biến LaSalle hệ thống phải thỏa mãn ba điều kiện sau:

Thứ nhất là điều kiện để áp dụng nguyên lý LaSalle: Yêu cầu hệ thống phải có một tập nén và bất biến $S_c = \{s \in \mathbb{R}^3 \mid V \leq c \ , \dot{V} \leq 0\}$ (29) (26).

Và hệ thống động lực học phải là hệ tự trị sau khi luật điều khiển được áp dụng, tức là các phương trình không còn phụ thuộc tường minh vào thời gian t.

Thứ hai là xác định tập bất biến lớn nhất: Theo LaSalle, khi $t \to \infty$, quỹ đạo trạng thái của hệ thống sẽ tiến về tập bất biến lớn nhất nằm trong tập $E = \{ s \in S_c \mid \dot{V} = 0\}$ (30)

Và tại vị trí $\dot{V} = 0$, ta suy ra $S = 0$ và $\dot{S} = 0$. Từ đó thiết lập hệ phương trình ràng buộc vi phân liên kết giữa các mặt trượt:

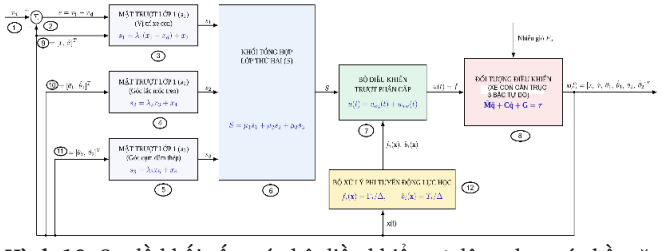
$$\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 + \mu_3 s_3 = 0 \quad (31)$$

$$\text{Và } \mu_1 \dot{s}_1 + \mu_2 \dot{s}_2 + \mu_3 \dot{s}_3 = 0 \quad (32)$$

Thứ ba là chứng minh sự hội tụ của đầy đủ các mặt trượt s_1, s_2, s_3 : nhờ mối liên kết động lực học phi tuyến của xe con cần trục tháp thể hiện tại phương trình (3), tập bất biến duy nhất thỏa mãn hệ ràng buộc trên chỉ có thể là gốc tọa độ $\{s_1 = 0, s_2 = 0, s_3 = 0$. Do đó, tất cả các mặt trượt thành phần đều hội tụ tiệm cận về 0. Như vậy có thể kết luận rằng sự hội tụ của tất cả các bề mặt trượt thành phần và trạng thái sai số về 0 đã được chứng minh một cách rõ ràng. Như vậy chúng ta có thể kết luận rằng nếu thiếu phần phân tích chi tiết này, về mặt toán học, hệ thống hoàn toàn có thể rơi vào trường hợp $S = 0$ nhưng các mặt trượt thành phần lại triệt tiêu lẫn nhau (ví dụ: $\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 = -\mu_3 s_3 \neq 0$), dẫn đến việc xe con dừng nhưng tải nâng vẫn lắc.

5. Sơ đồ nguyên lý làm việc của bộ điều khiển tự động vòng kín có phản hồi dựa trên các bề mặt trượt phân cấp áp dụng cho mô hình toán học xe con cần trục hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần

Bộ điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp thuộc về hệ thống điều khiển theo vòng kín có phản hồi. Để đồng nhất các kết quả thiết kế bộ điều khiển kiểu trượt áp dụng cho mô hình toán học xe con cần trục tháp ba bậc tự do dao động trong mặt phẳng chứa cần được trình bày ở dạng toán học nêu trên thì tại phần này chúng tôi phát triển sơ đồ khối hệ thống điều khiển tự động kiểu trượt phân cấp các bề mặt trượt áp dụng triệt tiêu các dao động của mô hình toán học xe con cần trục tháp 3 bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần theo dạng vòng kín có phản hồi được trình bày tại Hình 10 dưới đây:



Hình 10. Sơ đồ khối cấu trúc bộ điều khiển tự động theo các bề mặt trượt phân cấp áp dụng dập tắt dao động cho mô hình toán học xe con cần trục ở dạng 3 bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần theo vòng kín có phản hồi.

Khối thứ nhất được gọi là tín hiệu đặt x_d vị trí xe con, có chức năng khởi tạo giá trị vị trí đích mong muốn của xe con cần trục trong

không gian tọa độ tịnh tiến ngang. Tín hiệu này đóng vai trò làm điểm quy chiếu đầu vào cho toàn bộ hệ thống bám quỹ đạo; khối số 2 (bộ nút tổng /điểm so sánh ký hiệu là Σ) có chức năng so sánh đối chiếu giữa vị trí đặt x_d (cổng vào dương của bộ so sánh) và vị trí thực tế của xe con $x = x_1$ được cảm biến encoder đưa về (cổng vào âm của bộ so sánh). Kết quả đầu ra của khối này là giá trị sai số vị trí tức thời $e(t) = x_1(t) - x_d$; khối số 3 (gọi là mặt trượt lớp thứ nhất - vị trí xe con s_1) có chức năng tiếp nhận giá trị sai số vị trí e từ khối 2 và vận tốc xe con $\dot{x}$ từ khối phản hồi để tính toán bề mặt trượt thành phần s_1 theo phương thức giải tích, khối này có đầu ra là tín hiệu mặt trượt s_1 ; khối số 4 (gọi là mặt trượt lớp thứ nhất - góc lắc móc treo s_2) có nhiệm vụ tiếp nhận thông số góc lắc $\boldsymbol{\theta}_1$ và vận tốc góc của nó $\dot{\theta}_1$ của cụm móc treo dưới dạng dữ liệu số hóa liên tục, từ đó xác lập phương trình mặt trượt phụ lớp một thứ hai, khối này có đầu ra là tín hiệu mặt trượt s_2; Khối số 5 (gọi là mặt trượt lớp thứ nhất - góc lắc cụm dầm thép s_3) có nhiệm vụ tiếp nhận thông số phản hồi góc lắc dầm thép tiền chế là $\boldsymbol{\theta}_2$ và vận tốc góc của dầm thép tiền chế $\dot{\theta}_2$ để xây dựng mặt trượt phụ lớp một tầng đáy, khối này có đầu ra là tín hiệu mặt trượt s_3 ; Khối số 6 (gọi là bộ tổng hợp mặt trượt lớp thứ hai S) có nhiệm vụ thực hiện liên kết tuyến tính đồng thời cả ba bề mặt trượt độc lập từ lớp thứ nhất (s_1, s_2, s_3) bằng cách nhân chúng với các hệ số trọng số hợp nhất tương ứng μ_1, μ_2, μ_3 để kiến tạo nên bề mặt trượt tổng hợp toàn cục S cho hệ thống hụt cơ cấu chấp hành phục vụ cho luật điều khiên phân cấp, khối này có đầu vào là ba tín hiệu mặt trượt lớp một (s_1, s_2, s_3) và đầu ra là tín hiệu mặt trượt lớp thứ hai S; Khối số 7 (gọi là bộ điều khiển trượt phân cấp), đây là khối đầu não của hệ thống thuật toán để tính toán và phát ra tín hiệu lực/mô-men xoắn điều khiển tối ưu dựa trên mặt trượt tổng hợp nhằm đưa hệ thống về trạng thái ổn định. Khối này thu nhận đầu vào là bề mặt trượt tổng hợp S từ khối số 6 kết hợp với ma trận phi tuyến từ khối xử lý phi tuyến động lực học 12 để tính toán ra giá trị đại số đầu ra là tổng lực u(t) là tín hiệu điều khiển thay đổi theo thời gian. Quy luật điều khiển được cấu trúc từ hai thành phần: thành phần tương đương $u_{eq}(t)$ dùng để duy trì hệ thống trên mặt trượt và thành phần trượt đóng cắt $u_{sw}(t)$ dùng để ép các quỹ đạo trạng thái tiến về mặt trượt bất chấp có nhiễu phi tuyến: $(u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t)$

Khối số 8 (Đối tượng điều khiển - Cơ hệ xe con cần trục 3-DOF) khối này có nhiệm vụ thực hiện hành trình chuyển động vật lý dưới tác động của cơ cấu chấp hành và chịu ảnh hưởng từ môi trường, khối này đại diện cho thực thể vật lý hoặc mô hình giả lập của cơ hệ xe con cần trục trong mặt phẳng chứa cần bao gồm 3 điểm khối lượng phân tán xe con m, cụm móc treo m_1, cụm dầm thép tiền chế m_2. Cơ hệ này chuyển động dưới tác động trực tiếp của tổng lực chủ động đầu vào là lực $f(t) = u(t)$ hoặc mô-men xoắn điều khiển từ bộ điều khiển do động cơ sinh ra và chịu ảnh hưởng của nhiễu loạn bên ngoài như các lực gió, ma sát, rung động bất định.

Khối 9 (Encoder) cảm biến có nhiệm vụ đo đạc và xuất tín hiệu phản hồi trạng thái liên thời gian về tọa độ tịnh tiến và vận tốc di chuyển ngang của khối tâm xe con $x_1 = x$ và $x_2 = \dot{x}$

Khối 10 (IMU 1) cảm biến có nhiệm vụ đo đạc góc lắc dao động thụ động của cụm móc treo x_3 và vận tốc góc của cụm móc treo x_4 quanh vị trí cân bằng đứng.

Khối 11 (IMU 2) cảm biến có nhiệm vụ đo đạc góc lắc của cụm dầm thép tiền chế x_5 và vận tốc góc x_6 của cụm dầm thép tiền chế cùng hộp xoay dầm tự động.

Khối số 12 (gọi là bộ xử lý phi tuyến động lực học) có nhiệm vụ tiếp nhận toàn bộ vectơ trạng thái thực tế $x(t) = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [x, \dot{x}, \boldsymbol{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dot{\theta}_2]^T$ từ các cảm biến đưa về. Tại đây, bộ vi xử lý máy tính sẽ thực hiện giải thuật toán ma trận phi tuyến để trích xuất tức thời các hàm giải tích $f_i(x)$và $b_i(x)$ dựa trên định thức định danh Δ và Γ_i, T_i cung cấp trực tiếp dữ liệu động học theo thời gian thực cho khối số 7 tính toán các thành phần ma trận phi tuyến phức tạp dựa trên mô hình toán học của xe con cần trục để hỗ trợ bộ điều khiển triệt tiêu các thành phần bất định và thực thi luật điều khiển. Khối này có đầu vào là các trạng thái phản hồi của hệ thống từ đầu ra $x(t) = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = = [x, \dot{x}, \boldsymbol{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dot{\theta}_2]^T$ và đầu ra là các hàm phi tuyến $f_i(x)$ và $b_i(x)$.

Nguyên lý làm việc của hệ thống: Hệ thống hoạt động theo vòng lặp phản hồi kín liên tục để triệt tiêu các dao động của xe con dựa trên thuật toán điều khiển trượt phân cấp. Hệ thống làm việc qua ba giai đoạn như sau:

Khối khởi tạo và tính sai số (Khối 1 & 2): Vị trí mong muốn x_d được so sánh trực tiếp với tọa độ thực tế của xe con x_1 để liên tục cập nhật sai số điều khiển $e(t) = x_1(t) - x_d$

Khối phân cấp bề mặt trượt (Khối 3, 4, 5 & 6): Sai số hệ thống và các biến số phản hồi được tách nhánh độc lập nhằm xây dựng ba mặt trượt lớp một (s_1, s_2, s_3), đại diện cho sai lệch động học của xe con, móc treo và cụm dầm thép tiền chế. Khối 6 tiến hành hợp nhất tuyến tính tạo nên mặt trượt toàn cục lớp trượt thứ hai $S = \mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 + \mu_3 s_3$.

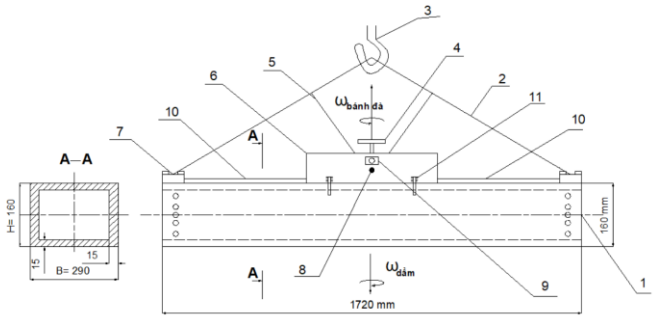
Tính toán và thực thi điều khiển: Khối tính toán phi tuyến và thực thi (Khối 12, 7 & 8): Khối 12 thu nhận vector trạng thái x(t) đầy đủ để cập nhật tức thời các thông số phi tuyến liên kết chéo $f_i(x)$ và $b_i(x)$. Bộ điều khiển trượt (Khối 7) phối hợp các dữ liệu này để xuất tổng lực chủ động $u(t) = f(t)$, tác động lên cơ cấu chấp hành (khối 8) giúp xe con dừng chính xác vị trí đặt mong muốn, dập tắt hoàn toàn các biên độ rung lắc bất chấp tải trọng nhiễu gió ngoại vi F_w nhờ đặc tính của toán học điều khiển trượt.

6. Phương pháp mô phỏng bằng số để hỗ trợ bộ điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên cấu trúc phân cấp các bề mặt trượt

Để kiểm tra tính khả thi và tính hợp lệ của bộ điều khiển kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp như trên cho bài toán điều khiển triệt tiêu rung động tự động đối với cụm dầm thép tiền chế và cụm móc treo xe con cần trục tháp trong mặt phẳng chứa cần, một số các mô phỏng bằng số trong chương trình Matlab được xác định với các thông số vật lý của một xe con cần trục tháp ở dạng ba bậc tự do được thu nhỏ ở mô hình trong phòng thí nghiệm để có thể thử nghiệm được trước nhằm không gây ra tốn kém so với việc thử nghiệm trên kích cỡ của cần trục

tháp thực ngoài thực tế công trường. Không mất tính tổng quát, vị trí di chuyển mong muốn của xe con cần trục tháp trong mặt phẳng chứa cần được đặt cách gốc tọa độ ban đầu là $x_d = 1$ m. Trong khi đó bộ điều khiển tự động bằng phương pháp điều khiển kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp cần phải triệt tiêu được các chuyển động của cụm dầm thép tiền chế và cụm móc treo trong mô hình xe con cần trục ở dạng chuyển động con lắc ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần khi chuyển xe con cần trục mang cụm dầm thép tiền chế. Việc chuẩn bị các số liệu để tiến hành mô phỏng bằng số thông qua chương trình Matlab được thể hiện ở Hình 11, mục 7 và được thống kê tại Bảng 1 dưới đây.

7. Chuẩn bị số liệu đầu vào để mô phỏng bằng số thông qua chương trình Matlab



Hình 11. Mô hình toán học để tính toán khối lượng cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế để lấy số liệu phục vụ cho mô phỏng số bằng chương trình MATLAB. 1 – dầm thép tiền chế đồng dạng thu nhỏ có mặt cắt ngang là hình chữ nhật rỗng có kích thước 290 x 160 x 15x15 mm và dài $l_{dầm} = 1720$ mm, hai đầu dầm được vát dạng hình nêm (góc phẳng) đối xứng nhau với chiều dài đoạn vát là $L_{vát} = 100$ mm $= 0,1$ m, chiều sâu vát vào góc $c_{vát} = 30$ mm $= 0,03$ m; 2 – dây cáp treo dầm thép tiền chế có chiều dài $l_1 = 1$ m; 3 – cụm móc treo; 4 – bánh đà phản lực để xoay dầm thép tiền chế vào vị trí lắp ghép; 5 – thanh nối giữa hộp xoay dầm thép tiền chế số 6 và cáp treo dầm thép tiền chế số 2; 6- hộp chứa cơ cấu tự động xoay dầm thép tiền chế; 7- các tai liên kết để đút chốt cố định cáp treo dầm thép tiền chế hoặc rút chốt nhằm tháo cáp treo dầm thép tiền chế; 8 – đèn tín hiệu đa mầu sắc; 9 – camera độ phân giải cao; 10 – cáp kéo chốt rời khỏi tai số 7 (còn gọi là cáp dỡ tải được dẫn động bằng một động cơ điện một chiều dẫn động cho 2 puly quay ngược chiều nhau được bố trí bên trong hộp xoay dầm thép số 6); 11- chi tiết kết nối để cố định dầm thép tiền chế số 1 và hộp xoay dầm số 6 để đảm bảo cho 6 cố định chặt với dầm theo phương ngang dầm thép tiền chế số 1.

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán điều khiển trượt phân cấp, hệ thống được khảo sát bằng mô phỏng số trên nền tảng phần mềm MATLAB. Mô hình tính toán cụ thể cho cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế thu nhỏ được minh họa trong Hình 11.

Cấu trúc hình học của dầm thép tiền chế (cấu phần số 1) là dạng hộp chữ nhật rỗng có kích thước tiết diện 290 x 160 x15 x15 mm, tổng chiều dài $l_{dầm} = 1720$ mm, hai đầu vát đối xứng với chiều dài vát $L_{vát} = 0,1$ m và chiều sâu vát $c_{vát} = 0,03$ m. Khối lượng thực tế của dầm thép tiền chế sau khi trừ phần vát $m_{dầm}$ được xác định bằng công thức động lực học hình học hình nêm:

$$m_{dầm} = m_0 - \Delta m_{vát} = (A \times l_{dầm} \times \rho_{thép} - [\,2 \times L_{vát} \times c_{vát}\,(t_{dầm} + t_f) \times \rho_{thép}] \approx 168,7 \text{ kg}$$

Khối lượng tổng thể của cụm dầm thép tiền chế $m_{cụm\ dầm}$ hay tải trọng nâng m_2 được tổng hợp từ cấu trúc phần cứng bao gồm: vỏ hộp hợp kim nhôm, bánh đà phản lực, hệ thống camera Basler, hệ thống đèn LED đa màu, động cơ liền hộp giảm tốc hành tinh ATO, các puly đổi hướng đi của cáp, cụm nguồn pin, động cơ DC JGB37 và các khớp nối cơ khí liên quan để dẫn động rút chốt dỡ tải. Tổng khối lượng tính toán cơ khí sơ bộ đạt 284,16 kg. Từ kết quả tính toán phần cứng thực tế, các thông số vật lý định danh của mô hình xe con cần trục tháp con lắc kép 3 bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần và các hệ số cấu hình của bộ điều khiển trượt được chuẩn hóa, tổng hợp chi tiết trong Bảng 1 sau đây.

Bảng 1. Thông số vật lý hệ thống xe con cần trục và hệ số bộ điều khiển kiểu phân cấp bề mặt trượt trong mô phỏng số.

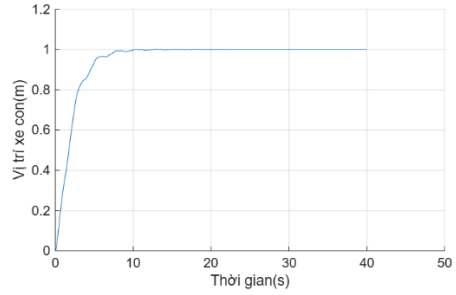
STT	Ký hiệu	Tên thông số/ ý nghĩa	Giá trị mô phỏng	Thứ nguyên	Căn cứ xác định
I	Thông số vật lý của xe con cần trục				
1	m	Khối lượng xe con cần trục tháp	284,16	kg	Lấy bằng tỉ lệ tải trọng cực đại (m ≈ m2)
2	m_1	Khối lượng cụm móc treo	142,08	kg	Mô hình con lắc kép tiêu chuẩn ($m_1 \approx 0,5\ m_2$)
3	m_2	Khối lượng cụm dầm thép tiền chế (tải trọng nâng)	284,16	kg	Tổng hợp từ thực tế phần cứng thiết bị
4	l_1	Chiều dài dây cáp nâng vật	1	m	Theo mô hình tỷ lệ thu nhỏ
5	l_2	Chiều dài cáp treo dầm thép tiền chế	1	m	Thiết lập kịch bản cộng hưởng ($l_1 = l_2$)
6	g	Gia tốc trọng trường	9,81	m/s^2	Hằng số vật lý quyết định tần số góc tự nhiên của hệ thống
7	x_d	Vị trí tọa độ đích yêu cầu của xe con	1	m	Theo giới hạn hành trình thực tế để tránh hiện tượng va đập hình học và giới hạn động lực học khi thử nghiệm

STT	Ký hiệu	Tên thông số/ ý nghĩa	Giá trị mô phỏng	Thứ nguyên	Căn cứ xác định
II	Hệ số mặt trượt lớp thứ nhất				
8	λ_1	Hệ số bám sai số vị trí xe con	10	s^{-1}	Giá trị dương lớn, ưu tiên tốc độ hội tụ vị trí
9	λ_2	Hệ số bám góc lắc cụm móc treo $\boldsymbol{\theta}_1$	0,2	s^{-1}	Giá trị dương nhỏ, giảm chấn dao động tần số thấp
10	λ_3	Hệ số bám góc lắc cụm dầm thép tiền chế $\boldsymbol{\theta}_2$	-15	s^{-1}	Giá trị âm lớn, bù pha động lực học ngược chiều
III	Hệ số trọng số hợp nhất lớp thứ hai				
11	μ_1	Trọng số mặt trượt vị trí xe con	4,5	kg/s	Trọng số ưu tiên cao nhất cho quỹ đạo dịch chuyển
12	μ_2	Trọng số mặt trượt góc lắc móc treo	0,05	kg.m/s	Trọng số liên kết trực tiếp tầng trung gian
13	μ_3	Trọng số mặt trượt góc lắc cụm dầm thép tiền chế	- 0,25	kg.m/s	Đồng bộ dấu toán học bảo đảm ổn định theo Lyapunov
IV	Thông số luật tiếp cận bộ điều khiển				
14	k	Hệ số tăng cường tuyến tính	0,5	$kg.m/s^2$	Dung hòa tốc độ đáp ứng và biên độ lắc quá độ
15	η	Hệ số trượt chặng cuối	0,02	$kg.m/s^2$	Đảm bảo dấu toán học đồng bộ phục vụ chứng minh $\dot{V} < 0$, triệt tiêu hiện tượng chattering

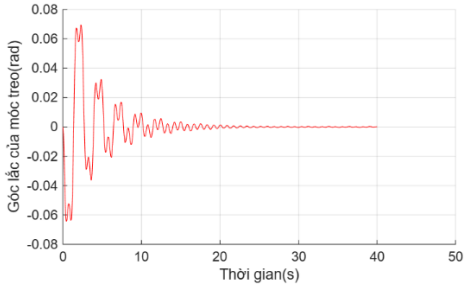
Việc chọn các thông số để mô phỏng l_1 (chiều dài của cáp nâng) $= l_2$ (chiều dài của cáp treo dầm thép tiền chế) để thử nghiệm bằng số hệ thống không phải là ngẫu nhiên mà đây là những lựa chọn dựa trên các căn cứ khoa học, lý thuyết động lực học của mô hình con lắc kép 3 bậc tự do và tiêu chuẩn kiểm tra thử nghiệm hệ thống khắc nghiệt nhất. Một cách cụ thể việc chọn $l_1 = l_2$ là vì đóng góp của dao động tần số thấp ω_1 tại phương trình (4) vào biên độ lắc gây hại là đặc biệt lớn khi tổng chiều dài hai sợi cáp $l_1 + l_2$ không đổi và chiều dài hai đoạn cáp này gần bằng nhau. Trong mô hình hệ thống dao động tự do của móc treo và vật nâng thì tần số dao động tự nhiên của hệ phụ thuộc chặt chẽ vào tỷ số chiều dài l_1 / l_2. Khi $l_1 = l_2$, hệ thống xuất hiện hai tần số dao động đó là tần số thấp của móc treo phương trình (4) và tần số dao động cao của vật nâng phương trình (5) có sự tương tác qua lại mạnh mẽ nhất. Biên độ dao động của vật nâng sẽ khuếch đại dao động của móc treo tạo ra hiện tượng cộng hưởng năng lượng giữa các tầng, điều này có thể hiểu là hệ thống được tạo ra kịch bản thử nghiệm khắc nghiệt nhất. Ngoài ra, vì hệ thống hụt cơ cấu chấp hành tức là chỉ có 1 lực điều khiển $f = u$ tác động vào xe con nhưng phải triệt tiêu dao động của cả vật nâng và móc treo nên việc đặt $l_1 = l_2$ tạo ra một hệ thống nhạy cảm nhất, dễ mất ổn định nhất. Nếu bộ điều khiển chẳng hạn như bộ điều khiển kiểu trượt chứng minh được hiệu quả chống rung trong trường hợp $l_1 = l_2$, nó chắc chắn sẽ hoạt động tốt và ổn định hơn ở các trường hợp chiều dài cáp lệch nhau khác $l_1 \# l_2$, điều này có thể hiểu là để thử thách tính bền vững của bộ điều khiển. Tương tự, việc chọn các tham số về khối lượng $m_1 \approx 0,5\ m \approx 0,5\ m_2$ tức là theo tỷ lệ $(m : m_1 : m_2 = 2 : 1 : 2)$ là để phản ánh cấu trúc toán học của một mô hình thiết bị thí nghiệm tiêu chuẩn nhằm kiểm tra thuật toán. Khi chọn $m_1 \approx 0,5\ m_2$ thì trong mô hình dao động của con lắc đơn người ta thường bỏ qua khối lượng của móc treo (tức là $m_1 \approx 0$). Tuy nhiên trong mô hình dao động của cả móc treo và vật nâng (hệ ba bậc tự do) thì nếu m_1 quá nhỏ, hệ thống sẽ tiệm cận về mô hình dao động của con lắc 1 bậc tự do vậy nên làm mất đi tính chất dao động của cả móc treo và vật nâng. Hơn nữa, khoa học động lực học chứng minh rằng, khi khối lượng trung gian m_1 có giá trị đáng kể so với vật nâng m_2 (ở đây là bằng 50 %), tác động phản hồi phi tuyến ngược từ vật nâng lên móc treo và từ móc treo lên xe con là vô cùng phức tạp. Điều này ép bộ điều khiển phi tuyến (như bộ điều khiển trượt phân cấp) phải xử lý các thành phần quán tính liên kết chéo cực đại. Việc chọn khối lượng xe con tương đương với khối lượng tải nâng $m = m_2$ là một kịch bản tỷ lệ tải trọng cực cao đối với hệ thống cơ học, trong thực tế xe con thường rất nặng so với tải nâng để tránh bị lật hoặc ảnh hưởng do tải trọng nâng rung lắc. Tuy nhiên trong nghiên cứu thuật toán, nếu khối lượng xe con m quá lớn, quán tính của xe con sẽ lấn át hoàn toàn lực quán tính phản hồi từ con lắc, khiến việc điều khiển xe con trở nên quá dễ dàng. Khi chọn $m = m_2$, lực quán tính do vật nâng dao động sinh ra sẽ tác động ngược trở lại và làm dịch chuyển hoặc rung lắc chính xe con một cách rõ rệt nhất. Đây là phép thử hoàn hảo để kiểm tra khả năng khử nhiễu phi tuyến và tính bền vững của bộ điều khiển kiểu trượt trước các thành phần động lực học phi tuyến liên kết chéo. Tóm lại việc lựa chọn các tham số vật lý mang tính chất đối xứng và có tỉ lệ nhạy cảm cao như trên để thiết lập một mô hình giả định có cấu trúc động lực học ngặt nghèo nhất, thiết kế thuật toán ở vùng nhạy cảm với dao động nhất. Khi bộ điều khiển vượt qua được thử nghiệm mô phỏng khắt khe này, tính đúng đắn và khả năng ứng dụng thực tế của thuật toán mới là khả thi. Ngoài ra, khác với các hệ thống con lắc đơn thông thường nơi các hệ số mặt trượt đều phải dương, cấu trúc phân cấp bề mặt trượt s tại lớp thứ 2 dành cho cần trục hai con lắc có ba bậc tự do đòi hỏi thiết kế dấu toán học nghiêm ngặt dựa trên đặc tính động lực học liên kết chéo. Hệ số λ_3 (lớp một) và trọng số μ_3 (lớp hai) của tải trọng tầng dưới bắt buộc phải mang dấu âm $\lambda_3 = -15$, $\mu_3 = - 0,25$. Cấu trúc dấu âm này một mặt giúp bù pha động lực học chuyển động ngược hướng giữa móc treo và tải trọng ở tần số dao động cao, mặt khác bảo đảm tích số $\mu_3\ \lambda_3 > 0$, thỏa mãn điều kiện ổn định toàn cục theo tiêu chuẩn Lyapunov.

8. Các kết quả mô phỏng thử nghiệm bằng số bằng chương trình Matlab

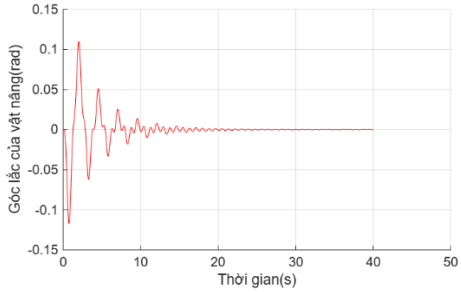
Để kiểm tra mục tiêu vận chuyển và tính ổn định tiệm cận của bộ điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp được xuất ra các đồ thị từ các Hình 12 đến Hình 21.



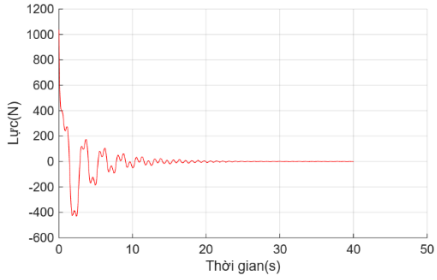
Hình 12. Vị trí xe con theo thời gian khi sử dụng bộ điều khiển chống rung tự động theo mô hình kiểu trượt phân cấp.



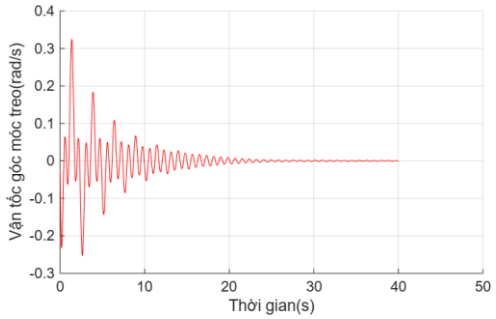
Hình 13. Góc lắc của móc treo theo thời gian $\boldsymbol{\theta}_1$ (rad) khi sử dụng bộ điều khiển tự động chống rung theo mô hình kiểu trượt phân cấp.



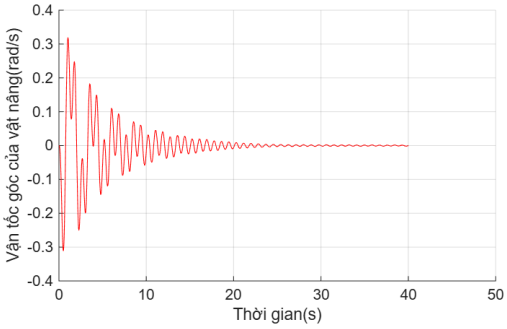
Hình 14. Góc lắc của tải nâng (dầm thép tiền chế) theo thời gian $\boldsymbol{\theta}2$ (rad) khi sử dụng bộ điều khiển tự động chống rung theo mô hình kiểu trượt phân cấp.



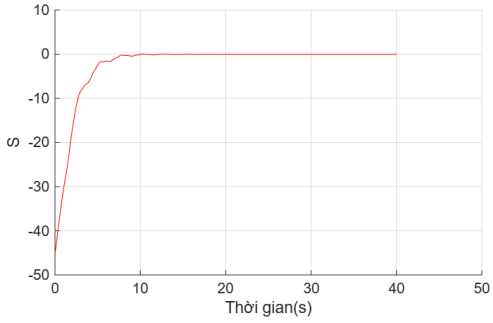
Hình 15. Tín hiệu điều khiển theo thời gian (lực chủ động f) khi sử dụng bộ điều khiển chống tự động theo mô hình kiểu trượt phân cấp.



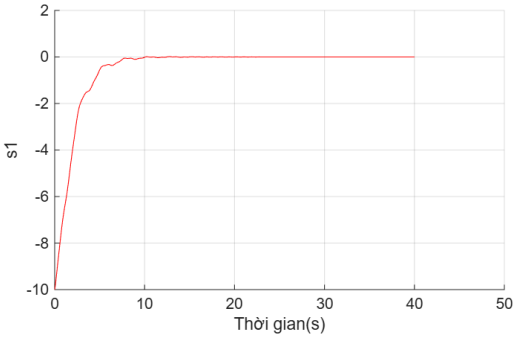
Hình 16. Vận tốc góc của móc treo theo thời gian d$\boldsymbol{\theta}$2/dt (rad/s) khi sử dụng bộ điều khiển tự động chống rung theo mô hình kiểu trượt phân cấp.



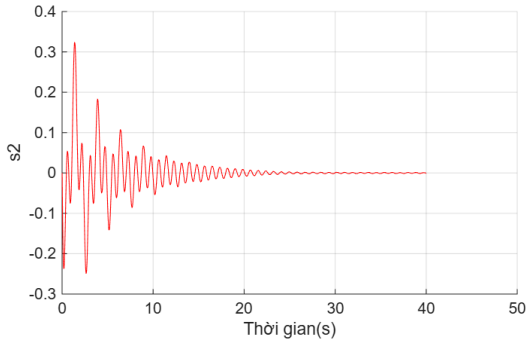
Hình 17. Vận tốc góc của tải nâng theo thời gian d$\boldsymbol{\theta}$1/dt (rad/s) khi sử dụng bộ điều khiển tự động chống rung theo mô hình kiểu trượt phân cấp.



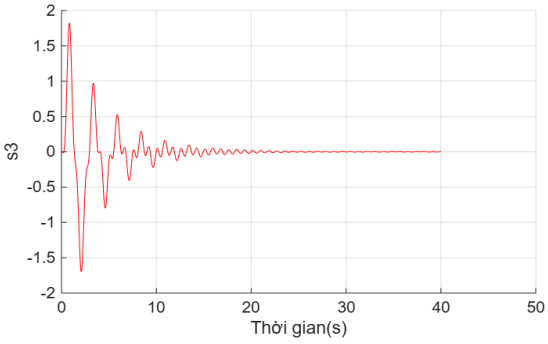
Hình 18. Bề mặt trượt S tại lớp thứ hai theo thời gian khi sử dụng bộ điều khiển chống rung tự động theo mô hình kiểu mặt trượt phân cấp.



Hình 19. Bề mặt trượt s_1 tại lớp thứ nhất theo thời gian khi sử dụng bộ điều khiển chống rung tự động theo mô hình kiểu mặt trượt phân cấp.



Hình 20. Bề mặt trượt s_2 tại lớp thứ nhất theo thời gian khi sử dụng bộ điều khiển chống rung tự động theo mô hình kiểu trượt phân cấp.



Hình 21. Bề mặt trượt s_3 tại lớp thứ nhất theo thời gian khi sử dụng bộ điều khiển chống rung tự động theo mô hình kiểu trượt phân cấp.

9. Nhận xét các kết quả mô phỏng bằng số

Kết quả mô phỏng bằng số trong chương trình Matlab được xuất ra các đồ thị, tại hình 12 cho thấy bộ điều khiển chống rung dựa trên cơ sở kiểu trượt phân cấp là đạt được mục tiêu điều khiển vận chuyển. Xe con cần trục tháp được ổn định tại vị trí mong muốn $x_d = 1$ m trong khoảng thời gian là 10 giây. Các đồ thị mô tả dao động của góc lắc của móc treo $\boldsymbol{\theta}_1$ (rad) và vật nâng $\boldsymbol{\theta}_2$ (rad) được thể hiện tại các đồ thị các Hình 13 và Hình 14. Các đường cong này cho thấy rằng hai độ lệch góc (biên độ dao động) của móc treo $\boldsymbol{\theta}_1$ và vật nâng $\boldsymbol{\theta}_2$ (gồm dầm thép tiền chế + cơ cấu lắp dầm thép tiền chế tự động) ban đầu là khá lớn quanh vị trị cân bằng thẳng đứng (vị trí 0 - 0) và mất khoảng thời gian dao động khoảng 15 giây thì ổn định tiệm cận về đến vị trí cân bằng thẳng đứng (vị trí 0) sau khi xe con đến vị trí mong muốn. Điều này có nghĩa rằng cả $\boldsymbol{\theta}_1$ và $\boldsymbol{\theta}_2$ được ổn định tại vị trí mong muốn $x_d = 1$ mét với khoản thời gian ổn định là khoảng 15 giây.

Lực chủ động điều khiển f (tín hiệu) = u tác động vào vị trí tâm xe con cần trục tháp theo phương dọc tay cần tại mô hình tỷ lệ đồng dạng trong mặt phẳng chứa cần được thể hiện tại hình 15. Ban đầu lực chủ động f cũng dao động với biên độ khá sắc nhọn về cả hai phía so với vị trí cân bằng thẳng đứng và khoảng 15 giây thì cũng ổn định tiệm cận về vị trí cân bằng thẳng đứng (vị trí 0 - 0).

Các đường cong mô tả vận tốc góc của móc treo $d\boldsymbol{\theta}_1/dt$ (rad/s) và tải nâng $d\boldsymbol{\theta}_2/dt$ (rad/s) được thể hiện tại các Hình 16 và 17. Các đường cong vận tốc góc cho thấy rằng cả cụm dầm thép tiền chế (bao gồm dầm thép tiền chế và cơ cấu xoay lắp dầm tự động) và cụm móc treo ban đầu có biên độ dao động khá sắc nhọn về cả hai phía so với vị trí cân bằng thẳng đứng (vị trí 0-0) khi xe con di chuyển đến vị trí mong muốn. Tuy nhiên các dao động là đang giảm dần và đạt được mục tiêu điều khiển và ổn định tiệm cận trong khoảng thời gian 22 giây.

Như đã chứng minh, tất cả các bề mặt trượt theo cấu trúc phân cấp đã được thiết kế là ổn định tiệm cận. Các kết quả mô phỏng các bề mặt trượt được thể hiện tại các Hình 18 đến 21 được chỉ ra bởi định lý trình bày tại mục 4.2, các kiểu trượt của các bề mặt trượt là phân cấp, tại đó sự ổn định của các bề mặt trượt dao động không kéo dài, ban đầu dao động với biên độ cũng khá lớn lớn quanh vị trí cân bằng thẳng đứng (vị trí 0-0). Bề mặt trượt lớp thứ nhất s_1 chỉ mất khoảng thời gian là 10 giây là ổn định về đến vị trí cân bằng thẳng đứng. Bề mặt trượt lớp thứ nhất s_2 mất khoảng thời gian khoảng 22 giây thì ổn định tiệm cận quanh vị trí cân bằng thẳng đứng (vị trí 0-0). Bề mặt trượt lớp thứ nhất s_3 ban đầu cũng dao động với biên độ sắc nhọn nhưng mất khoảng thời gian là 22 giây thì cũng được ổn định tiệm cận quanh vị trí cân bằng thẳng đứng (về vị trí 0-0) và cuối cùng bề mặt trượt lớp hai S chỉ mất khoảng thời gian là 10 giây là ổn định tiệm cận về vị trí cân bằng thẳng đứng (vị trí 0 - 0). Tất cả những kết quả mô phỏng bằng số này chứng tỏ rằng không có sự gây ra sự rung động rất lớn trong hệ thống điều khiển kiểu trượt theo cấu trúc các bề mặt trượt phân cấp. Như vậy kiểu trượt của từng hệ thống phụ hội tụ về gốc tọa độ dọc theo bề mặt trượt hệ thống phụ của riêng nó tại lớp thứ nhất và cả tại lớp thứ hai khi điều khiển di chuyển xe con của cần trục tháp loại đầu quay mang cụm dầm thép tiền chế để xoay lắp ghép tự động trong mặt phẳng chứa cần đến vị trí trung điểm giữa hai cột thép tiền chế đã được lắp dựng trước.

10. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu nêu trên cho thấy bộ điều khiển tự động kiểu trượt dựa trên các bề mặt trượt phân cấp là ổn định tiệm cận theo lý thuyết của Lyapunov có thể dập tắt được dao các dao động của cụm móc treo và cụm dầm thép tiền chế. Thông qua nghiên cứu và các kết quả mô phỏng bằng số cho thấy chúng ta có thêm một phương pháp điều khiển dập tắt dao động tự động hiệu quả đối với mô hình xe con cần trục chuyển động ở dạng ba bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần. Trong các nghiên cứu tiếp theo nên có đầu tư thêm về mặt tài lực để tiến hành nghiên cứu thiết kế chế tạo phần cứng và phần mềm hệ thống để thực nghiệm trong qui mô phòng thí nghiệm nhằm đánh giá, tổng kết các kết quả thử nghiệm một cách có hệ thống và thông qua việc tổng kết các kết quả nghiên cứu thì các nhà nghiên cứu, các chuyên gia hoạt động tại các doanh nghiệp ngoài thực tiễn sản xuất có thêm nguồn thông tin, chứng cứ hữu ích cho việc xem xét áp dụng kết quả nghiên cứu vào công tác thiết kế chế tạo các cơ cấu công tác của cần trục chuyển động với vận tốc nhanh cũng như áp dụng kết quả nghiên cứu vào thiết kế chế tạo kết cấu thép của các cần trục xây dựng thông minh nhằm để tham gia lắp ghép tự động các dự án kết cấu thép nhà tiền chế phức tạp đòi hỏi ứng dụng tích hợp các công nghệ thực tế ảo, công nghệ tối ưu hóa và công nghệ tự động hóa lắp nghép nhanh, chính xác,

an toàn để giảm thời gian của chu kỳ làm việc và giảm biên độ lắc của móc treo và cụm dầm thép tiền chế, điều này có nghĩa là làm tăng năng suất xây dựng, nâng cao độ an toàn trên công trường, giảm năng lượng tiêu thụ, tiết kiệm tối đa vật tư chế tạo kết cấu thép và các cơ cấu công tác của máy và vân vân.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin được chân thành bày tỏ sự biết ơn sâu sắc tới Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã cung cấp giúp đỡ để bài báo được hoàn thành theo quy định.

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 non-linear 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, Singhose 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 Tranlational 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]. 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, pp. 713–718.

[24]. Singhose W, Mills B, Seering W. Vibration reduction with specified-swing input shapers. In: Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, Kohala Coast-Island, USA, 1999, pp. 533–538.

[25]. Daqaq MF, Masoud ZN. Nonlinear input-shaping controller for quay-side container cranes. Nonlinear Dyn, 2006, 45(1–2): 149–170.

[26]. Masoud ZN, Daqaq MF. A graphical approach to input-shaping control design for container cranes with hoist. IEEE Trans Control Syst Technol, 2006, 14(6): 1070–1077.

[27]. Dianwei Qian, Anti- sway control for Cranes, Design and implementation using Matlab.

[28]. Z. Lei, H. Taghaddos, U. Hermann và M. Al-Hussein, A Methodology for Mobile Crane Lift Path Checking in Heavy Intrustry Projects, Automation in construction, Volume 31, pp. 41-53, 2013.

[29]. M.-W. Park và I. Brilakis, Construction Worker Detection in Video Frames for Initializing Vision Trackers, Automation in construction, Volume 28, pp, 15 – 25, 2012.

[30]. W. S. Yoo, H.-J. Lee, D.-I. Kim, K.-I. Kang và H. Cho, Genetic Algorithm – Based Steel Erection Planning Model for a Construction Automation System, Automation in Construction, Volume 24, pp. 30-39, 2012.

[31]. Lipman, R.R & Reed, K.A (2000), Using VRML in Construction industry Applications, in Proceedings of Web 3D: VRLM 2000 Symposium Monterrey, CA February 21 -24, 1-7.

[32]. C. Zhang và A. Hammad, Improving lifting Motion Planning and Re-Planning of Cranes with Consideration for Safety and Efficiency, Advanced Engineering Informatics, volume 26, pp. 396-410, 2012.

[33]. Zhang, P., Harris, F.C., Olomolaiye, P.O & holt, GD. (1999), Location optimization for a group of tower cranes. Journal of Construction Engineering and Management, 125 (2), 115 -22.

[34]. 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.

[35]. Phạm Lê Công, Điều khiển chống rung cho cẩu tháp bằng phương pháp điều khiển tiền định, Luận văn Thạc sỹ kỹ thuật, 2020, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.

[36]. 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.

[37]. Lê Hồng Quân, Nghiên cứu giải pháp giảm thiểu dao động cho vật nâng và móc treo trong mô hình toán học xe con cần trục hai bậc tự do trong mặt phẳng chứa cần bằng phương pháp điều khiển thụ động: Đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp trường 2025, mã số đề tài: 18-2025/KHXD, Hà Nội, tháng 12/2025. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

[38]. Tưởng Xuân Thưởng, 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.

[39]. 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.

[40]. Lê Hồng Quân, Nghiên cứu mối quan hệ giữa các gia tốc làm giảm góc lắc của cáp nâng cần trục tháp khi quay cần 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.

[41]. Lê Hồng Quân, Nghiên cứu giải pháp điều khiển chống lắc cho mô hình xe con cần 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.

[42]. Lê Hồng Quân, Nghiên cứu điều khiển chống rung lắc cho vật nâng và móc treo trong mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do dựa trên cơ sở phản 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.

[43]. Bùi Thị Khánh Hòa, Hà Văn Phương, Phạm Văn Huy, ứng dụng bộ điều khiển thụ động kết hợp quan sát cho hệ thống cầu trục mô hình con lắc đôi. 2023, Tạp chí Khoa học và Công nghệ. Tập 59, Số 5 tháng 10 năm 2023 P-ISSN 1859- 3585, E- ISSN 2615- 9619. Trang 26 – Trang 30. Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.

[44]. Nguyễn Văn Hùng, Phạm Quang Dũng, Nguyễn Thị Mai, Máy xây dựng, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật 2006.