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 vật nâng và móc treo trong mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do bằng phương pháp điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào

**Lê Hồng Quân[1*], Trịnh Bích Ngọc[1], Phạm Văn Uy[2], Thiều Thị Hồng[3]**

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

[2] Tổng Công ty Đầu tư và Kinh doanh vốn Nhà nước SCIC.

[3] Giáo viên Trường TH &THCS Vĩnh Tiến, Vĩnh Lộc, Thanh Hóa.

TỪ KHOÁ

Động lực học xe con cần trục một bậc tự do
Xe con cần trục hai bậc tự do
Điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào
Móc treo và tải nâng
Điều khiển vòng hở
Điều khiển vòng kín
Các dao động gây ra do chuyển động
Các tần số làm việc
Các sai số mô hình hóa

TÓM TẮT

Khi vận hành cần trục ở tốc độ nhanh có thể gây ra sự lắc của tải trọng nâng và móc treo với biên độ lớn, vấn đề này gây ra các quan ngại đến an độ an toàn, dừng chính xác và hiệu quả của việc khai thác cần trục. Hầu như các nghiên cứu về điều khiển xe con cần trục cho đến nay chủ yếu tập trung vào mô hình động lực học xe con một bậc tự do. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng các dao động ở dạng con lắc một bậc tự do có thể được giảm đi đáng kể bằng cách tạo ra hình dạng các tín hiệu đầu vào một cách hợp lý cho các động cơ của các cơ cấu trên cần trục. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phương pháp tạo hình đạng tín hiệu đầu vào cho bài toán điều khiển chống rung lắc của xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào là một tiếp cận điều khiển vòng hở. Phương pháp này có thể thực hiện hoạt động điều khiển bằng cách tạo ra hình dạng tín hiệu các lệnh tham chiếu một cách thông minh. Phương pháp này vốn là một kỹ thuật nạp trước. Trong các ứng dụng thực tế, thông thường rất khó để chống lại sai số bất kỳ nào đó chẳng hạn như sai số về mô hình hóa hoặc sai số về tần số mà không có thiết kế điều khiển đặc biệt và phương pháp tạo hình dạng tín hiệu đầu vào là một thiết kế đặc biệt như vậy để có thể triệt tiêu các dao động gây ra do chuyển động một cách có hiệu quả. Nghiên cứu này, đầu tiên thực hiện khảo sát động lực học mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do để xác định 2 tần số dao động riêng và chỉ ra mức độ ảnh hưởng của các biên độ của hai tần số dao động. Đây là thông tin đầu vào rất quan trọng giúp chúng tôi thiết kế các bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và kiểu đồng bộ. Các bộ điều khiển tín hiệu đầu vào được thiết kế để có tính bền vững với các thay đổi theo hai tần số dao động riêng và theo các sai số mô hình hóa. Trong các điều kiện nào đó, bài toán điều khiển xe con cần trục nên được tích hợp khi tải nâng tạo ra hiệu ứng dao động trong mô hình con lắc hai bậc tự do. Do đó việc điều khiển động cơ trong mô hình động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do bằng cách thiết kế các bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào tích hợp với các bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và hệ mờ dựa vào các mô đun lệnh một đầu vào được kỳ vọng để vượt qua các dao động con lắc hai bậc tự do một cách hiệu quả. Chúng tôi đã thực hiện mô phỏng các phương pháp điều khiển tích hợp nêu trên bằng cách sử dụng phần mềm Matlab với các thông số vật lý bằng số của một xe con cần trục bất kỳ. Từ các kết quả mô phỏng cho thấy rằng sự tích hợp của bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập với bộ điều khiển dựa trên kỹ thuật thụ động có hiệu quả điều khiển tốt nhất trong số các bộ điều khiển đã được tích hợp trong bài toàn điều khiển vận chuyển của xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Điều này chứng tỏ rằng sự tích hợp của bộ điều khiển dựa trên kỹ thuật thụ động và bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập góp phần vào việc nâng cao chất lượng điều khiển chống rung lắc cho xe con cần trục.

KEYWORDS

Single-pendulum crane trolley dynamics
Double-pendulum crane trolley dynamics
Input- shaping control method
Hook and payload

ABSTRACT

Fast crane operations may cause large amplitude hook and payload oscillations. These are disadvantageous to safe, precise and efficient crane operations. Recently, almost crane trolley control method research has concentrated on single pendulum type dynamics. Some researchers have shown that single pendulum mode oscillations may be significantly reduced by shaping the inputs to motors of crane mechanisms properly. This paper investigates the methodology of input shaping for the anti-sway control problem of double-pendulum-type crane trolley. Input shaping is an open-loop control approach. It may implement its control

*Liên hệ tác giả: quanlh@nuce.edu.vn
Nhận ngày 13/08/2021, sửa xong ngày 20/09/2021, chấp nhận đăng 10/10/2021

Open-loop control method
Close-loop control method
Motion-induced oscillations
Operating frequencies
Modeling errors

action by intelligently shaping the reference commands. This method is a pre-feed technique. In practical applications, it is very difficult to resist any error without special designs, such as model and frequencies errors and input shaping method is that to effectively cancel motion-induced oscillations. This research starts investigating the double-pendulum type crane trolley dynamics to calculate the two oscillation frequencies and pointing out the influence of the two amplitudes of these two oscillation frequencies, this is very important input information to help us to design the convolved and simultaneous input shapers. The input shaping controllers are design to have robustness to changes in the two operating frequencies and modeling errors. Under certain conditions, trolley control problem should be integrated when the payload creates a double pendulum effect. Therefore, the control of the trolley motor of double pendulum type crane trolley dynamics model by designing one convolved input shaper and one simultaneous input shaper to be integrated with the passivity-based controller and the single – input - rule – modules - based fuzzy controller is expected to overcome the double-pendulum oscillations effectively. We conducted above integrated control methods simulation by using Matlab software with numerical physical parameters of the double-pendulum-type crane trolley system. From the simulation results have shown that the integration of the convolved input shaper with the passivity - based controller has the best control performance among others in the transport control problem of double-pendulum-type crane trolley. This means that the integration of the passivity-based controller and the convolved input shaper contributes to the improvement of the control performance.

## 1. Giới thiệu

Cần trục xây dựng là các máy nâng chủ lực có sức nâng, chiều cao nâng và tầm với lớn được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp xây dựng nói chung để lắp ghép các phần tử kết cấu chính, vận chuyển vật tư và hỗ trợ nhiều nhiệm vụ khác trên công trường xây dựng, ngoài ra chúng còn được sử dụng ở nhiều nơi đặc biệt khác chẳng hạn như các xưởng sản xuất cơ khí, sản xuất cọc các nhà máy điện nguyên tử, các nhà kho, các nhà máy đóng tàu, các cảng biển v.v... Theo tính chất động lực học thì cần trục xây dựng được phân ra làm 3 nhóm chính đó là: nhóm cần trục kiểu cầu (như cầu trục, cổng trục, bán cổng trục, cần trục cảng), nhóm cần trục tự hành và nhóm cần trục tháp. Khi tải trọng nâng, tầm với và chiều cao nâng của cần trục càng lớn thì nếu tốc độ làm việc của các cơ cấu công tác tương ứng nếu càng lớn thì sẽ gây ra sự rung lắc của vật nâng và móc treo rất lớn khi đó sẽ dẫn tới tải trọng động tác dụng lên kết cấu kim loại của máy lớn đồng thời còn gây ra sự dao động bị kéo dài làm ảnh hưởng đến độ an toàn trên công trường, ảnh hưởng đến thời gian vận chuyển hàng hóa, tiến độ xây dựng và độ dừng chính xác của vật nâng vào vị trí lắp ghép. Do vậy thông thường các hãng chế tạo cần trục thường phải giới hạn tốc độ làm việc của các cơ cấu của cần trục vì rằng một chuyển động nhanh của xe con cần trục có thể gây ra sự lắc rất lớn của vật nâng và móc treo và như vậy các thợ vận hành cần trục ít kinh nghiệm thường phải làm chậm các chuyển động để làm giảm sự rung lắc của vật nâng và móc treo nhằm đảm bảo sự an toàn khi vận hành cần trục. Mặc dù điều này có vẻ như là hợp lý, tuy nhiên sự tích lũy của hàng trăm, thậm chí hàng ngàn chu kỳ lắp ghép chậm hơn có thể gây ra thiệt hại hàng tỷ USD khi sử dụng các cần trục hết tuổi thọ của chúng. Tất cả những điều này ảnh hưởng đến năng suất thực tế của cần trục. Để có thể cải thiện được các vấn đề nêu trên theo hướng tích cực và tăng được năng suất của cần trục thì phải nghiên cứu thiết kế giải pháp điều khiển dao động của vật nâng và móc treo trên xe con cần trục một cách hiệu quả nhằm dập tắt dao động của vật nâng và móc treo nhanh nhất có thể.

Bài toán điều khiển chống rung lắc cho xe con cần trục khi mang tải trọng nâng đã trở thành một trong những chủ đề nghiên cứu trọng tâm trong khoảng 2 thập kỷ gần đây do rất nhiều các nhà khoa học trong và ngoài nước quan tâm nghiên cứu. Hầu hết trong các công trình nghiên cứu trước đây, các tác giả đa phần quan niệm sự lắc của tải trọng nâng treo trên cáp nâng của xe con cần trục được mô hình hóa như mô hình toán học con lắc một bậc tự do. Đối với mô hình con lắc một bậc tự do thì trên xe con của ba nhóm cần trục xây dựng nêu trên thì sơ đồ mắc cáp cơ cấu nâng có một đặc điểm chung đó là tại tâm xe con hoặc tâm puly đỉnh cần (đối với cần trục tự hành) sẽ được mô hình hóa bằng 1 chốt không ma sát và sợi cáp nâng được treo phía dưới xe con có một đầu được treo vào chốt không ma sát này còn đầu phía dưới của nó được liên kết với một khối lượng tập trung đó là móc treo và tải trọng nâng (bỏ qua các sợi dây cáp treo hàng giữa móc treo và vật nâng). Như vậy sợi cáp nâng này được xem như một thanh cứng không trọng lượng và sơ đồ mắc cáp của cơ cấu nâng các cần trục xây dựng nêu trên tạo thành mô hình con lắc 1 bậc tự do. Việc đơn giản hóa mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc đơn (một bậc tự do) thì đã có nhiều nghiên cứu về mặt lý thuyết và các ứng dụng phương pháp điều khiển đã được triển khai khá nhiều ở ngoài thực tế sản xuất. Tuy nhiên việc giả thiết rằng móc treo và tải trọng nâng được mô hình hóa bằng một điểm khối lượng tập trung đã không phản ánh được độ chính xác của cơ cấu nâng bố trí trên xe con cần trục. Ở một số điều kiện vận hành, móc treo và tải trọng nâng nên được mô hình hóa bằng hai điểm khối lượng phân tán thay vì một điểm khối lượng tập trung như trong mô hình con lắc một bậc tự do.

Giả thiết điểm khối lượng phân tán này dẫn đến mô hình động lực học con lắc hai bậc tự do (là tổ hợp 2 loại chuyển động con lắc với các tần số dao động riêng). Ở ngoài nước đã có rất nhiều các nhà khoa học nghiên cứu thiết kế và ứng dụng các phương pháp điều khiển để điều khiển sự dao động của vật nâng được treo trên xe con các cần trục nói chung mà được mô hình hóa ở dạng con lắc một bậc tự do như đã nêu ở trên. Nhìn chung các phương pháp điều khiển xe con cần trục ở dạng con lắc môt bậc tự do có thể được phân ra làm hai loại đó là phương pháp điều khiển theo hệ thống vòng kín và phương pháp điều khiển theo hệ thống vòng hở.

Đối với hệ thống có phương pháp điều khiển vòng kín thì các tín hiệu phản hồi được thu thập bởi các cảm biến tối tân và có khả năng điều chỉnh tín hiệu đầu vào một cách liên tục, ưu điểm chính của hệ thống điều khiển vòng kín là có khả năng đối phó được với các dao động bất ngờ một cách dễ dàng, chất lượng điều khiển tốt, thông minh, các công trình nghiên cứu điển hình về hệ thống điều khiển vòng kín có thể kể đến 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 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 vân vân. Nhược điểm chính của các hệ thống điều khiển vòng kín là yêu cầu phải có các cảm biến tối tân kèm theo các can thiệp về mặt cơ học rất phức tạp, khối lượng tính toán rất lớn, thuật toán điều khiển cũng rất phức tạp và yêu cầu sự điều chỉnh khởi tạo phải rất chính xác do vậy mà rất khó đạt được sự điều chỉnh chính xác đối với các cần trục cũ hoặc làm cần trục làm việc ngoài trời. Một nhược điểm rất quan trọng nữa đối với hệ thống điều khiển vòng kín đó là phải mất một khoảng thời gian nhất định để hệ thống nhận diện được được các tham số thông qua hệ thống phản hồi, chính điều này dẫn tới thời gian trong một chu kỳ làm việc của máy bị kéo dài thêm gây ảnh hưởng đến năng suất của cần trục. Chính vì các lý do nêu trên nên việc thực thi của hệ thống điều khiển dao động xe con cần trục bằng hệ thống điều khiển vòng kín là khá đắt. Ngoài ra phương pháp điều khiển vòng kín là rất phù hợp với các chuyển động có yêu cầu độ chính xác cao và có tỷ lệ nhỏ ví dụ như các rô bốt trong phòng thí nghiệm. Các dao động nhỏ có thể được điều khiển tốt khi sử dụng các phản hồi cảm biến.

Đối với các hệ thống điều khiển vòng hở là các điều khiển chuyển động đặt trước và dễ dàng thực thi đới với các cần trục làm việc ngoài trời, hệ thống điều khiển vòng hở nhìn chung là đối nghịch với hệ thống điều khiển vòng kín tức là nó không cần sự phản hồi của các tín hiệu đầu vào cho bộ phận điều khiển. Hệ thống điều khiển vòng hở cung cấp một kế hoạch tạo ra quĩ đạo sao cho cần trục không có các dao động dư khi kết thúc chuyển động. Các công trình nghiên cứu điều khiển dao động vật nâng ở nước ngoài 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]. Phương pháp điều khiển vòng hở có ưu điểm là đơn giản, việc thực thi và giá thành rẻ hơn nhiều so với hệ thống điều khiển vòng kín tuy nhiên hệ thống lại rất dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố gây nhiễu bên ngoài chẳng hạn như là tải trọng gió. Rất nhiều hệ thống điều khiển vòng hở có tốc độ làm việc bị giới hạn bởi vì gia tốc lớn và nhìn chung là gây ra góc lắc của cáp nâng là lớn. Ở trong nước, về mặt lý thuyết cũng đã có một số tác giả thực hiện các nghiên cứu điều khiển dập tắt dao động mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do bằng một số phương pháp điều khiển phổ biến, tuy nhiên chất lượng điều khiển vẫn chưa cao và việc ứng dụng, triển khai vào thực tế sản xuất là chưa có do bí quyết công nghệ, đa phần vẫn sử dụng các phương pháp điều khiển theo khởi động từ, công tắc tơ, máy biến tần trong giảng dạy và sản xuất. Một số công trình nghiên cứu tiêu biểu 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 [51], điều khiển cầu trục kết hợp chống rung lắc và tránh vật cản của Lê Mạnh Qúi và các tác giả [52], trong luận văn thạc sỹ kỹ thuật, tác giả Nguyễn Văn Hùng cũng đề cập đến việc nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm, khảo sát động lực học và khả năng điều khiển ổn định của vật nâng theo phương ngang khi di chuyển xe con cầu trục được mô hình hóa ở dạng con lắc một bậc tự do [53], điều khiển chống rung cho cầu trục ba chiều bằng phương pháp Hybrid Shape của Tưởng Xuân Thưởng và các tác giả [54], 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 [55]. Nhìn chung cả hai phương pháp điều khiển theo hệ thống vòng kín và hệ thống vòng hở để điều khiển mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do nêu trên là chưa dập tắt được dao động của vật nâng được treo dưới xe con một cách nhanh nhất như đã kỳ vọng và còn có rất nhiều nhược điểm do mô hình xe con một bậc tự do chưa mô tả sát với xe con cần trục ở ngoài thực tế.

Mô hình động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do gần sát với xe con cần trục ở ngoài thực tế so với việc sử dụng mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do. Tại mô hình 2 bậc tự do thì số bậc tự do cũng tăng lên và phương trình mô tả chuyển động cũng trở nên phức tạp hơn, có 3 bậc tự do cần được điều khiển (góc lắc của móc treo, góc lắc của vật nâng và chuyển động nhúc

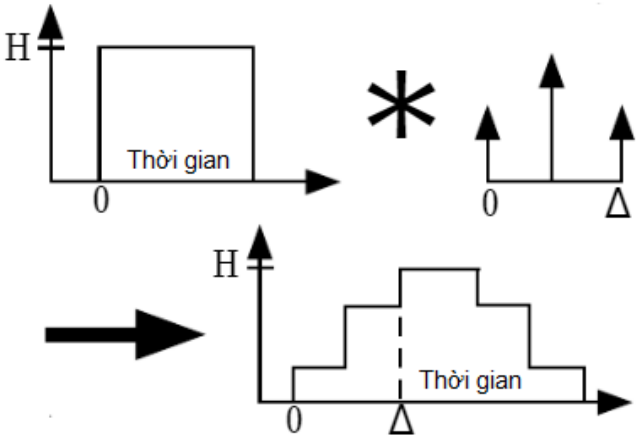
nhích theo phương ngang của xe con) chỉ bằng một đầu vào điều khiển (chính là lực phát động), đây đang là thách thức cho các nhiệm vụ thiết kế và phân tích bộ điều khiển. Điều khiển một hệ thống xe con cần trục như thế thậm chí đang trở nên khó khăn hơn đặc biệt khi không có các động tác tuyến tính hóa hoặc ước lượng hóa được thực hiện đối với động lực học các hệ phi tuyến.

Điều khiển chống rung lắc cho mô hình động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do ở ngoài nước đang là chủ đề có tính thời sự và được các nhà khoa học chú tâm ngày càng nhiều hơn vì những ưu điểm của nó 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.

Với mô hình động lực học con lắc hai bậc tự do thì phương pháp triệt tiêu dao động bằng tay cũng rất khó khăn kể cả đối với các thợ lái cần trục có kinh nghiệm. Do đó, 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 con lắc hai bậc tự do [21, 22]. Tuy nhiên đối với hệ thống điều khiển theo vòng kín thì gặp rất nhiều khó khăn trong việc đo lường dao động của tải trọng nâng và móc treo và cho đến nay thì đã có một vài nghiên cứu điều khiển mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do theo hệ thống điều khiển vòng kín rất phức tạp và rất đắt đỏ (theo như báo giá của các hãng chế tạo cần trục của các nước Tây Phương chào hàng khoảng 200.000 usd/bộ) được công bố phân tán trên một số tạp chí chẳng hạn như phương pháp điều khiển theo kỹ thuật thụ động của Ortega và các tác giả [23, 48], phương pháp điều khiển theo hệ mờ dựa trên các mô đun lệnh một đầu vào của Qian và các tác giả [24, 48]. Theo đó bộ điều khiển trong [24, 48] gồm có 6 mô đun lệnh một đầu vào là các trọng số động lực học. Thuật giải di truyền được chấp thuận để biến đổi một số tham số của bộ điều khiển. Nhìn chung chất lượng điều khiển của các phương pháp này đối với mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do là khá tốt so với chất lượng điều khiển mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tự do. Tuy nhiên cũng có một số tác giả nêu ra một số phương pháp tiếp cận điều khiển mới theo hệ thống điều khiển vòng hở và gợi ý rằng nên sử dụng các phương pháp điều khiển lai ghép giữa các hệ thống điều khiển độc lập với nhau thì chất lượng điều khiển dao động của xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do sẽ được nâng cao hơn nữa. Một trong những phương pháp đó chính là phương pháp điều khiển theo kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào.

Kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào là phương pháp điều khiển vòng hở để giảm dao động, kỹ thuật này đầu tiên được Smith O.J.M nghiên cứu vào những năm 1950 của thế kỷ trước [25], Smith đã xây dựng phương pháp điều khiển tách các lệnh thành hai lệnh có biên độ nhỏ hơn. Một trong số đó bị trì hoãn một nửa chu kỳ của tần số riêng. Phương trình ràng buộc cơ bản được sử dụng để tính toán các thành phần lệnh mà đảm bảo rằng sẽ có dao động dư cân bằng khi mô hình hệ thống là hoàn hảo. Do đó, điều khiển posicast phổ biến hiện nay có liên quan đến tạo dạng tín hiệu đầu vào dao động cân bằng.

Một bộ điều khiển xe con cần trục được xem là khả thi đối với việc triệt tiêu dao động của vật nâng theo thời gian thực thì nó phải có khả năng lọc ra được các kích động gây ra dao động không mong muốn từ tín hiệu lệnh do con người tạo ra. Một sự biến đổi như vậy có thể được thực hiện bằng cách tích chập tín hiệu lệnh tạo ra bởi con người với một chuỗi xung, vấn đề này được nêu rõ trong các công trình nghiên cứu của Singer, N và và các tác giả [26]. Kết quả của việc tích chập nêu trên được sử dụng để điều khiển các động cơ của các cơ cấu của cần trục. Qúa trình tạo dạng tín hiệu đầu vào này được thể hiện bằng 1 lệnh xung và một bộ tạo dạng tín hiệu đầu vào có chứa 3 xung (xem Hình 1). Cần chú ý rằng các lệnh xung vận tốc là rất phổ biến trong việc điều khiển xe con cần trục bởi vì người điều khiển cần trục thường ấn các nút bật và tắt để điều khiển cần trục. Thời gian và tỷ lệ hợp lý của bộ tạo hình dạng các xung cho phép hệ thống đạt tới trạng thái mong muốn mà không có dao động.




**Hình 1.** Đầu vào của một xung tạo hình dạng tín hiệu đầu vào.

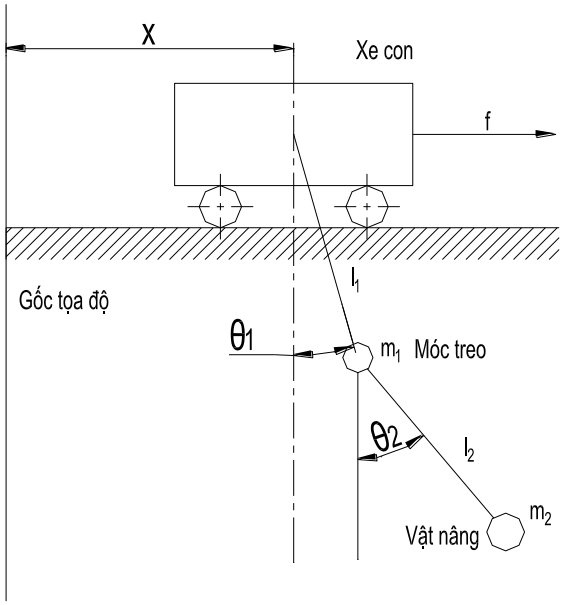
Từ các nhận định và phân tích nêu trên chúng ta có thể hiểu ý tưởng cơ bản của phương pháp điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đối với mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do là một bộ lọc đáp ứng xung hữu hạn, nó được xác định theo tri thức của hai tần số dao động được tuyến tính hóa từ mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Phương pháp này làm việc bằng cách tạo ra một tín hiệu lệnh nơi mà sự dao động gây bị gây ra bởi phần thứ nhất của tín hiệu lệnh bị khử bởi dao động bị gây ra bởi phần thứ hai của tín hiệu lệnh (kỹ thuật nạp trước). Kỹ thuật tạo dạng tín hiệu ngõ vào có thể được xem như một sơ đồ điều khiển tiên lượng, đó là nó sử dụng tri thức của hệ thống để tạo lại các hình dạng lệnh tham chiếu sao cho ứng xử không mong muốn của hệ thống là không xuất hiện, do đó việc tạo hình dạng tín hiệu đầu vào cho phép các chuyển động dao động nhỏ và chuyển động có dao động nhanh. Phương pháp tạo hình dáng tín hiệu đầu vào đã được chứng minh là hiệu quả để điều khiển các hệ thống các kết cấu đàn hồi. Kỹ thuật tạo tín hiệu đầu vào có rất nhiều ưu điểm và có thể mang lại cho chúng ta rất nhiều lợi ích. Phương pháp yêu cầu khác biệt nhiều hơn so với việc nhận biết các trạng thái của hệ

thống theo thời gian thực và như là một sự cần thiết với điều khiển có tín hiệu phản hồi. Để thiết kế một bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào, các ước lượng có thể phải được xác định và thiết kế có thể được hoàn thành gián tiếp. Do kỹ thuật tạo tín hiệu đầu vào là phương pháp điều khiển vòng hở nên không yêu cầu phải có các camera hoặc các cảm biến tối tân để xác định các trạng thái của hệ thống do vậy giá thành của nó rẻ hơn nhiều so với các hệ thống phản hồi vòng kín nên khả năng thực thi được là rất cao. Mặt khác khi sử dụng kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào, hệ thống có thể có một thời gian điều chỉnh hoặc xử lý nhanh hơn so với các bộ điều khiển có tín hiệu phản hồi đơn lẻ [27]. Một khi bộ tạo tín hiệu được thiết kế, các tri thức bổ sung của các trạng thái hệ thống là không cần thiết. Ở nước ngoài kỹ thuật điều khiển theo hình dạng đầu vào đã được một số tác giả nghiên cứu chứng minh là hiệu quả cho việc điều khiển dao động và đã được thực thi trên một số xe con cầu trục ở dạng con lắc một bậc tự do, một số nghiên cứu trong nhóm này có thể kể đến như nghiên cứu bộ điều khiển tạo hình dạng đầu vào cho phép xe con cần trục xây dựng di chuyển mà không có sự lắc của Singer, N và các tác giả [28], nghiên cứu các hiệu ứng về nâng tải lên hệ thống điều khiển theo tạo hình dạng tín hiệu đầu vào của các xe con cổng trục của Singhose và các tác giả [29] và nghiên cứu bộ điều khiển cho phép dừng vật nâng vào vị trí chính xác và và giảm rung lắc trên xe con của cầu trục và cổng trục của Sorensen, K và các tác giả [30].

Ở trong nước, việc nghiên cứu điều khiển triệt tiêu dao động của vật nâng và móc treo trong hệ xe con cần trục ở dạng mô hình con lắc một bậc tự do và hai bậc tự do bằng kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào hầu như là chưa có và việc áp dụng ngoài thực tiễn sản xuất cũng chưa có vì tính phức tạp về phương pháp, công nghệ, kỹ thuật cao và giá thành. Theo cập nhật tốt nhất của chúng tôi thì ở Việt nam việc nghiên cứu giảm góc lắc của cáp nâng và nâng cao tốc độ làm việc của các cơ cấu công tác của xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do là rất ít. Trong đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường trọng điểm năm 2017 của tác giả Lê Hồng Quân [56] 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 ở dạng con lắc hai bậc tự do để xây dựng nên đường quĩ đạo gia tốc theo thời gian thực để làm cơ sở cài đặt cho máy biến tần điều khiển động cơ của cơ cấu quay 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 ngang) nhằm nâng cao tốc độ làm việc và độ an toàn, tuy nhiên nỗ lực nghiên cứu này cũng chỉ dừng lại ở lý thuyết mà chưa thể tiến tới thử nghiệm, ứng dụng và triển khai ngoài thực tế sản xuất. Vấn đề nghiên cứu giảm rung cho các xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do hầu như chưa có mà chỉ có một số công trình đề cập đến nghiên cứu phương pháp tạo hình dạng tín hiệu đầu vào để điều khiển chống rung lắc tổng quan chiến lược áp dụng các kỹ thuật điều khiển vòng hở để điều khiển hệ thống cầu trục của Nguyễn văn Trung và các tác giả [50], điều khiển chống rung cho cẩu tháp một bậc tự do bằng kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào của các tác giả Hồ Việt Long và Dương Minh Đức [49]. Chính vì những ưu điểm và các lý do nêu trên của kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào nên rất cần nghiên cứu phương pháp điều khiển theo kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào để có thể tạo ra một hệ thống chạy ổn định nhằm điều khiển chống rung lắc của vật nâng và móc treo cho xe con cần trục ở dạng hai bậc tự do là hết sức cấp thiết nhằm triệt tiêu dao động của móc treo và vật nâng một cách nhanh nhất có thể khi mở máy, tăng tốc, giảm tốc bất ngờ hoặc phanh dừng xe con cần trục trong mặt phẳng thẳng đứng góp phần tăng năng suất phục vụ của cần trục, tránh các nguy cơ tai nạn xảy ra trên công trường làm trì hoãn tiến độ xây dựng do kiện tụng, giảm chi phí bồi thường thiệt hại đồng thời cũng góp phần nâng cấp đặc tính kỹ thuật của các cần trục nhằm tạo ra các lợi thế cạnh tranh cho các tập đoàn thiết kế chế tạo cần trục của Việt Nam.

Thông thường để thiết kế được bộ điều khiển dập tắt sự rung lắc của vật nâng và móc treo trên xe con cần trục một cách hiệu quả thì bước đầu tiên phải thực hiện nghiên cứu khảo sát động lực học mô hình xe con của cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Sự quan trọng của hiệu ứng con lắc hai bậc tự do được đặc trưng bởi một hàm số của các tham số hệ thống.

## 2. Khảo sát động lực học mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do




**Hình 2.** Mô hình động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do.

Động lực học mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do sát với thực tế hơn và được mô tả tại Hình 2, dưới tâm xe con hoặc tâm puly đỉnh cần (đối với cần trục tự hành) là thanh cứng không trọng lượng có chiều dài $l_1$ treo khối lượng móc treo $m_1$ và phía dưới móc treo là dây treo hàng có chiều dài $l_2$ để treo vật nâng có khối lượng $m_2$. Giả thiết rằng các chiều dài $l_1$ và $l_2$ là không thay đổi. Xe con cần trục có khối lượng $m_0$ được di chuyển dưới tác động của lực

phát động f. Gọi $\theta_1$ và $\theta_2$ lần lượt là các góc lắc của các khối lượng tập trung $m_1$ và $m_2$ quanh vị trí cân bằng thẳng đứng, g là gia tốc trọng trường và x là bậc tự do mô tả vị trí của xe con so với gốc tọa độ. Động lực học mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do được khảo sát theo các bước sau đây:

Sử dụng phương pháp Lagrangian ta xác định các phương trình vi phân chuyển động của hệ động lực học con lắc hai bậc tự do (với giả thiết là các điều kiện đầu bằng không) như sau:

$$\begin{cases} (m_0+m_1+m_2)\ddot{x}+(m_1+m_2)l_1\ddot{\theta}_1\cos\theta_1+m_2l_2\ddot{\theta}_2\cos\theta_2 \\ -(m_1+m_2)l_1\dot{\theta}_1^2\sin\theta_1-m_2l_2\dot{\theta}_2^2\sin\theta_2=f \\ (m_1+m_2)l_1\ddot{x}\cos\theta_1+(m_1+m_2)l_1^2\ddot{\theta}_1+m_2l_1l_2\ddot{\theta}_2\cos(\theta_1-\theta \\ +m_2l_1l_2\dot{\theta}_2^2\sin(\theta_1-\theta_2)+(m_1+m_2)gl_1\sin\theta_1=0 \\ m_2l_2\ddot{x}\cos\theta_2+m_2l_1l_2\ddot{\theta}_1\cos(\theta_1-\theta_2)+m_2l_2^2\ddot{\theta}_2-m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2si \\ +m_2gl_2\sin\theta_2=0 \end{cases} \quad (1)$$

Hệ phương trình vi phân (1) có thể được viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}+\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}+\mathbf{G}(\mathbf{q})=\tau \quad (2)$$

Trong đó: $\mathbf{q}=[x,\theta_1,\theta_2]$ – Vector 3 tọa độ suy rộng

$\tau=[f,0,0]^T$– Vector của lực suy rộng

$\mathbf{M(q)}$ – Ma trận quán tính 3x3

$\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ – Vector của Mô men Coriolis và momen quán tính hướng tâm

$\mathbf{G(q)}$ – Vector của số hạng gia tốc trọng trường.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})=\begin{bmatrix} m_0+m_1+m_2 & (m_1+m_2)l_1\cos\theta_1 & m_2l_2\cos\theta_2 \\ (m_1+m_2)l_1\cos\theta_1 & (m_1+m_2)l_1^2 & m_2l_1l_2\cos(\theta_1-\theta_2) \\ m_2l_2\cos\theta_2 & m_2l_1l_2\cos(\theta_1-\theta_2) & m_2l_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})=\begin{bmatrix} 0 & -(m_1+m_2)l_1\dot{\theta}_1\sin\theta_1 & -m_2l_2\dot{\theta}_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & m_2l_1l_2\dot{\theta}_2\sin(\theta_1-\theta_2) \\ 0 & -m_2l_1l_2\dot{\theta}_1\sin(\theta_1-\theta_2) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q})=[0 \quad (m_1+m_2)gl_1\sin\theta_1 \quad m_2gl_2\sin\theta_2]^T$$

Sử dụng phương pháp tuyến tính hóa quanh vị trí cân bằng ổn định thẳng đứng duy nhất là $\theta_1=\theta_2=0$ bằng cách thực hiện khai triển chuỗi Tailor phương trình (2) chỉ giữ lại các thành phần vô cùng bé bậc thấp và bỏ qua các thành phần vô cùng bé bậc cao ta xác định được phương trình vi phân của hệ dao động tự do tuyến tính. Trong nghiên cứu về các hệ động lực học, sự tuyến tính hóa là một công cụ rất mạnh để đánh giá sự ổn định cục bộ của của một điểm cân bằng (là vị trí thẳng đứng có $\theta_1=\theta_2=0$) của một hệ thống các phương trình vi phân phi tuyến hoặc các hệ động lực học rời rạc.

Phương trình vi phân của hệ dao động tự do tuyến tính sau khi được tuyến tính hóa có dạng:

$$\bar{\mathrm{M}}\ddot{\mathbf{q}}+\mathrm{K}\mathbf{q}=0 \quad (3)$$

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

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

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

giải các định thức của ma trận $\bar{\mathrm{M}}\mathrm{K}$ 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 $\omega_1$ và $\omega_2$ 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:

$$\alpha=\frac{m_1+m_2}{m_1}\left(\frac{1}{l_1}+\frac{1}{l_2}\right) \quad (6)$$

$$\beta=\left(\frac{m_1+m_2}{m_1}\right)^2\left(\frac{1}{l_1}+\frac{1}{l_2}\right)^2-4\left(\frac{m_1+m_2}{m_1}\right)\frac{1}{l_1l_2} \quad (7)$$

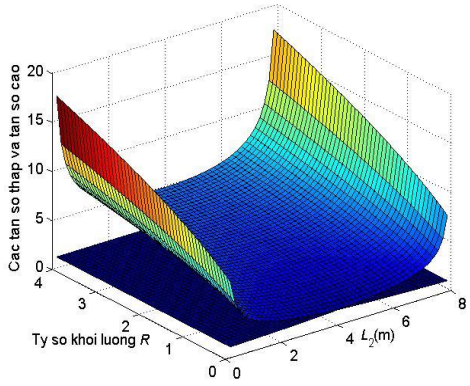
Ta đặt $\mathbf{R}=\mathbf{m_2/m_1}$ được gọi là tỷ số khối lượng giữa tải trọng nâng và móc treo và tổng chiều dài cáp $l=l_1+l_2=$ constant. Khi đó:

$$\omega_1=\sqrt{\frac{g}{2}}\sqrt{(1+R)(\frac{1}{l_1}+\frac{1}{l_2})-\beta} \quad (8)$$

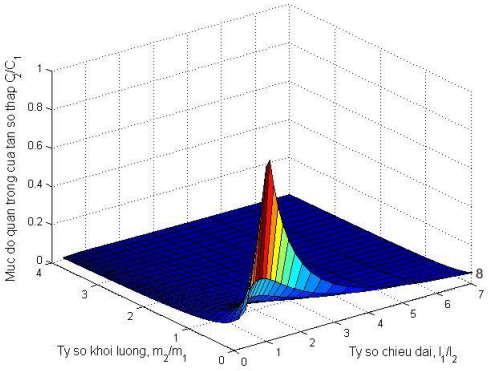
$$\omega_2=\sqrt{\frac{g}{2}}\sqrt{(1+R)\left(\frac{1}{l_1}+\frac{1}{l_2}\right)+\beta} \quad (9)$$

$$\beta=\sqrt{(1+R)^2\left(\frac{1}{l_1}+\frac{1}{l_2}\right)^2-4(1+R)\frac{1}{l_1l_2}} \quad (10)$$

Như vậy ta thấy các tần số dao động riêng $\omega_1$ và $\omega_2$ lúc này phụ thuộc vào các chiều dài cáp $l_1$, $l_2$ và tỷ số khối lượng R. Phần tiếp theo, chúng tôi xin trình bày kết quả khảo sát động lực học bằng số các hàm tần số thấp $\omega_1$ và tần số cao $\omega_2$ thay đổi theo các tham số vật lý của hệ thống bằng cách sử dụng phần mềm Matlab vì rằng kết quả khảo sát động lực học là một phần rất quan trọng được sử dụng để thiết kế các bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào hiệu quả. Bộ số liệu thử nghiệm bằng số được lấy của một xe con cần trục bất kỳ có chiều dài cáp từ móc treo đến tải trọng nâng là $l_2$ được xem như một biến số khi tổng chiều dài cáp $l=l_1+l_2$ được giữ bằng hằng số không đổi là 8 m. Như vậy tại mô phỏng bằng số thứ nhất này thì tỷ số khối lượng lần lượt được thay đổi R = (0;1;2;3;4) và $l_2$ là thay đổi khi tổng chiều dài cáp $l=l_1+l_2=8$m luôn là hằng số. Nghĩa là $l_2=8$m thì $l_1=0$; $l_2=6$ thì $l_1=2$; khi $l_2=4$ thì $l_1=4$; và khi $l_2=2$ thì $l_1=6$ vậy $l_2=0$ thì $l_1=8$ m. Kết quả khảo sát động lực học được thể hiện tại hình 3 là đồ thị trong không gian ba chiều của các tần số thấp $\omega_1$ và tần số cao $\omega_2$ theo hai biến số là R và $l_2$ cụ thể là $\omega_1$ và $\omega_2=f(R, l_2)$. Từ đồ thị tại hình 3 ta nhận thấy rằng tần số thấp $\omega_1$ (đường nằm phía dưới) là thay đổi rất ít, chỉ nhô lên một ít chưa bằng 2 tại điều kiện $l=l_1+l_2=8$m và gần tương đương với tần số của một con lắc đơn có chiều dài cáp không đổi là $l=8$ m. Ngoài ra, tần số thấp $\omega_1$ đạt cực đại khi các chiều dài của hai sợi cáp là bằng nhau $l_1=l_2=\frac{l_1+l_2}{2}=4$ m. Mặt khác tần số cao $\omega_2$ (đường nằm phía dưới tại hình 3) $=f(R, l_2)$ có sự phụ thuộc mạnh mẽ vào chiều dài cáp treo hàng $l_2$. Giá trị của tần số cao $\omega_2$ thay đổi thực chất hơn giá trị của tần số thấp $\omega_1$. Sự đóng góp của $\omega_2$ vào biên độ lắc là rất lớn ($\omega_1\approx\omega_2$ do chiều dài và khối lượng hai phần là tương đương nhau $m_1\approx m_2$) ở điều kiện $l_1+l_2$ bằng hằng số là 8m khi chiều dài của hai sợi cáp xấp xỉ bằng nhau $l_1\approx l_2\approx 4$ m.




**Hình 3.** Ảnh hưởng đồng thời của độ dài $l_2$ và tỷ số khối lượng R đến tần số thấp $\omega_1$ (đường phía dưới) và tần số cao $\omega_2$ (đường phía trên) khi chiều dài tổng thể của cáp treo là $l = l_1 + l_2 = 8$m luôn là hằng số và tỷ số khối lượng $R = m_2/m_1 = (0{:}4)$.




**Hình 4.** Ảnh hưởng đồng thời của tỷ số độ dài $l_1/l_2$ và tỷ số khối lượng $R = m_2/m_1 = 0$ đến 4 đến tỷ số biên độ của tần số cao/ biên độ của tần số thấp, cụ thể là tỷ số $C_2/C_1$.

Về tỷ số khối lượng R tại hình 3 ta thấy: giá trị tần số thấp $\omega_1$ càng nhỏ khi mà tỷ số khối lượng $R = m_2/m_1$ càng tăng dần và tần số cao $\omega_2$ cũng càng tăng dần khi tỷ số khối lượng R càng tăng dần (biến thiên ngược lại so với trường hợp $\omega_1$).

Như vậy, các kết quả khảo sát động lực học mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do cho thấy rằng một sơ đồ điều khiển dao động sẽ cần phải bền vững đối với các thay đổi theo tần số cao $\omega_2$ hơn là so với theo tần số thấp $\omega_1$. Tuy nhiên nếu biên độ của tần số cao là rất nhỏ so với biên độ của tần số thấp thì bộ điều khiển không cần quan tâm đến tần số cao $\omega_2$. Mức đóng góp tương đối của cả hai tần số có thể được kiểm chứng bằng cách phá vỡ toàn bộ đáp ứng động lực học thành các thành phần phát sinh từ $\omega_1$ và $\omega_2$.

Các đáp ứng của hai góc lắc $\theta_1$ và $\theta_2$ tới một xung của biên độ A được xác định tại thời điểm ban đầu đã chuyển động $t_0$ là:

$$\theta_1 = \frac{A\omega_1(1+\omega_2^2 l_1\gamma)}{k}\sin[\omega_1(t-t_0)] - \frac{A\omega_2(1+\omega_1^2 l_1\gamma)}{k}\sin[\omega_2(t-t_0)] \quad (11)$$

$$\theta_2 = \frac{A\omega_1}{k}\sin[\omega_1(t-t_0)] - \frac{A\omega_2}{k}\sin[\omega_2(t-t_0)] \quad (12)$$

Trong đó:

$$\gamma = -\frac{g(1+R)}{\omega_1^2\omega_2^2 l_1 l_2} \text{ và } k = \sqrt{\beta} l_1 g$$

Nếu chúng ta giả thiết các góc lắc là nhỏ thì đáp ứng xung của móc treo và tải trọng nâng theo phương ngang x (phương trình mô tả dao động nhúc nhích của xe con theo phương ngang x khi các khối lượng $m_1$ và $m_2$ dao động bé) có thể được ước lượng bằng phương trình sau đây:

$$x = C_1\sin(\omega_1 t + \psi_1) + C_2\sin(\omega_2 t + \psi_2) \quad (13)$$

Trong đó:

$$C_1 = \frac{\omega_1 l_1[1+\omega_2^2\gamma(l_1+l_2)]}{k}\sqrt{\left(\sum_{j=1}^{n} A_j\cos(\omega_1 t_j)\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{n} A_j\sin(\omega_1 t_j)\right)^2} \quad (14)$$

$$C_2 = -\frac{\omega_2 l_1[1+\omega_1^2\gamma(l_1+l_2)]}{k}\sqrt{\left(\sum_{j=1}^{n} A_j\cos(\omega_2 t_j)\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{n} A_j\sin(\omega_2 t_j)\right)^2} \quad (15)$$

$\Psi_1$ và $\Psi_2$ lần lượt là các giá trị ban đầu của x do các điều kiện đầu gây ra. Các hệ số $C_1$ và $C_2$ là các biên độ dao động của x theo (13). $C_1$ và $C_2$ ở các biểu thức (14) và (15) được xác định bằng lấy đạo hàm của x theo biểu thức (13) và thay các vận tốc ở thời điểm ban đầu $t_0$ và vị trí xe con ban đầu ở thời điểm $t_0$. Hai hệ số $C_1$ và $C_2$ cho biết các đóng góp của từng thành phần dao động ví dụ như ($\theta_1$, $\omega_1$, $A_1$, ...) và ($\theta_2$, $\omega_2$, $A_2$, ...) đối với toàn bộ đáp ứng tải trọng nâng. Do mục tiêu của bài báo này là thiết kế một bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào để di chuyển xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do có dao động dư rất nhỏ. Để thực hiện được việc này chúng ta cần phải giới hạn biên độ cực đại của dao động dư từ một chuỗi xung. Do các tần số $\omega_1 \neq \omega_2$ và giảm chấn cho từng thành phần dao động là xấp xỉ bằng 0 nên biên độ cực đại có thể tìm được bằng cách bổ sung các biên độ cực đại từ từng thành phần dao động như sau:

$$V_{amp} = |C_1| + |C_2| \quad (16)$$

Sử dụng phép phân tách này thì đóng góp của thành phần dao động thứ 2 trở nên rõ ràng và cho thấy khi tạo hình dạng tín hiệu đầu vào hai thành phần dao động là bắt buộc. Thông qua khảo sát động lực học bằng phần mềm Matlab ta có hình 4 là đồ thị trong không gian 3 chiều thể hiện hàm số $C_2/C_1 = f(R, l_1/l_2)$ cho thấy tỷ số của sự đóng góp thành phần tần số cao ($\omega_2$) / sự đóng góp thành phần tần số thấp ($\omega_1$) khi cho thay đổi tỷ số khối lượng $R = m_2/m_1 = (0; 1; 2; 3; 4)$ và tỷ số chiều dài cáp ($l_1/l_2 = 0$ đến 8). Quan sát trên đồ thị hình 4 thì cho thấy $C_1$ là rất lớn so với $C_2$ (cụ thể $C_1 \approx 10C_2$ tức là $C_2/C_1 \approx 0.1$) suy ra tần số $\omega_1$ là có tính quyết định ảnh hưởng chính (tức là có biên độ dao động lớn) đến x còn $C_2$ (ứng với tần số cao $\omega_2$) có ảnh hưởng rất nhỏ đến giá trị của x. Tại vùng có giá trị nhỏ lên cực trị thì cho thấy ảnh hưởng của $C_2$ là rất đáng kể nhưng vẫn nhỏ hơn $C_1$ (vì chưa bằng 1). Ngoài ra bề mặt đồ thị còn cho thấy rằng việc tạo hình dạng tín hiệu đầu vào cho mô hình con lắc hai bậc tự do là rất cần thiết đối với các hệ thống có các tỷ số khối lượng R là nhỏ. Đóng góp của thành phần thứ 2 của x (cụ thể là thành phần $C_2\sin(\omega_2 t + \Psi_2)$) là rất lớn khi các chiều dài cáp treo vật nâng $l_1$ và chiều dài cáp treo hàng $l_2$ là xấp xỉ bằng nhau $= 4m => l_1/l_2 \approx 1$.

Như vậy kết quả khảo sát động lực học cho chúng biết rằng một khi các thông số vật lý cụ thể như $m_0$ $m_1$, $m_2$, $l_1$, $l_2$ thì ta sẽ tính ra được các giá trị của các tần số dao động riêng $\omega_1$ và $\omega_2$ từ đó sẽ giúp chúng ta tránh được sự cộng hưởng trong hệ dao động cưỡng bức. Ngoài ra kết quả khảo sát động lực học cũng cho thấy $C_1$ hay ($\omega_1$) là có ảnh hưởng chính đến x và $C_2$ (tức $\omega_2$) cũng có ảnh hưởng nhưng nhỏ hơn $C_1$ từ đó giúp chúng ta chủ động khi thiết kế bộ điều khiển theo hình dạng tín hiệu đầu vào để dập tắt $C_1$ vả cả $C_2$ nhằm triệt tiêu dao động nhúc nhích của xe con để dừng chính xác và trong thời gian ngắn nhất có thể hoặc chỉ thiết kế bộ điều khiển có khả năng dập tắt $C_1$ ( nhưng không dập tắt $C_2$) trong trường hợp không yêu cầu độ dừng chính xác cao (tức là có sai số).

## 3. Thiết kế bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào cho mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do

Một khi bộ phận tạo hình dạng tín hiệu được thiết kế thì các tri thức bổ sung của các trạng thái hệ thống là không cần thiết nữa. Có thể lấy quá trình tạo hình dạng tín hiệu đầu vào của một hệ thống làm ví dụ để xem xét [31]. Một loạt xung được tích chập theo thời gian thực có liên quan đến lệnh ban đầu để tạo ra một lệnh đã có hình dạng tín hiệu. Lệnh xung vận tốc ban đầu được biết đổi thành một lệnh bậc thang để di chuyển hệ thống mà không có dao động. Các biên độ và các vị trí thời gian của của các xung mà tạo thành bộ tạo dạng tín hiệu đầu vào được thiết kế vận dụng các ước lượng của các tần số dao động riêng và các tỷ số giảm chấn. Rõ ràng luôn luôn tồn tại các sai số trong các phép ước lượng này, do đó bộ phận tạo dạng tín hiệu đầu vào phải được làm bền vững đối với các sự thay đổi theo các tham số này. Tuy nhiên thật không may đó là phương pháp tạo hình dạng tín hiệu đầu vào là một chiến thuật điều khiển vòng hở truyền thống. Tính hiệu quả của tạo dạng tín hiệu đầu vào theo truyền thống có thể bị suy giảm khi những vấn đề không mong đợi xuất hiện chẳng hạn như các sai số khi mô hình hóa, các nhiễu, các tính phi tuyến vân vân. Nhằm để xác định các biên độ xung và các định vị thời gian của một bộ tạo dạng tín hiệu đầu vào, một bộ tạo dạng tín hiệu đầu vào cần phải đảm bảo rằng các biên độ và các vị trí thỏa mãn các ràng buộc thiết kế nào đó sao cho bộ phận tạo dạng tín hiệu đầu vào có thể làm việc tốt dưới các ràng buộc. Một số ràng buộc điển hình có thể được xem xét như sau:

- Các ràng buộc thiết kế chính là một sự giới hạn về biên độ dao động được gây ra bởi bộ phận tạo dạng tín hiệu, dưới dạng biểu thức có thể viết như sau:

$$\mathbf{V_{amp} \leq V_{tol}} \quad (17)$$

Ở đây $V_{amp}$ sinh ra phần trăm dao động dư và $V_{tol}$ ký hiệu mức dao động dư có thể chấp nhận được

- Để đảm bảo lời giải nhanh nhất có thể, thì thời gian của xung sau cùng được cực tiểu hóa ở dạng điển hình, có dạng như sau:

$$\mathbf{min(t_n)} \quad (18)$$

Ở đây $t_n$ là xung thứ $n_{th}$ trong một loạt xung liên tiếp tạo thành n xung.

- Các biên độ xung cũng được giới hạn để tổng bằng 1 nhằm để lệnh đã tạo hình dạng tín hiệu có thể đạt tới cùng điểm đặt giống như lệnh chưa tạo dạng hình dạng tín hiệu, được xác định như sau:

$$\sum_{i=1}^{n} A_i = 1 \quad (19)$$

Ở đây $A_i$ có nghĩa là biên độ xung thứ i.

- Các biên độ xung sẽ được biến đổi theo hướng dương vô cực và âm vô cực. Một ràng buộc biên độ xung là để giới hạn các xung để có biên độ dương. Điều này cho thấy rằng các bộ phận tạo hình dạng tín hiệu dương có các biên độ xung giữa 0 và 1, đó là:

$$0 < A_i \leq 1 \quad (20)$$

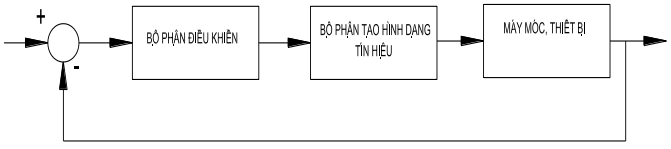
Đối với các bộ phận tạo hình dạng tín hiệu ngõ vào có độ lớn đồng nhất, thì các biên độ xung được ràng buộc là $\pm$ 1. Ràng buộc này có thể được phát biểu như sau:

$$0 < A_i \leq 1 \text{ khi i là lẻ}$$
$$A_i = - A_{max} \text{ khi i là chẵn} \quad (21)$$

Các quan ngại về các sai số mô hình hóa và các tính chất phi tuyến, trong thực tế đã có rất nhiều nghiên cứu chẳng hạn như [32] đã thực hiện để làm cho phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào bền vững hơn. Tuy nhiên, như với một kỹ thuật vòng hở, phương pháp tạo hình dạng tín hiệu đầu vào có thể không làm được gì để thể hiện các nhiễu. Để giải quyết vấn đề này thì sự kết hợp thông minh của kỹ thuật tạo hình dạng đầu vào và bộ điều khiển phản hồi là một giải pháp rất tiềm năng.

### *3.1. Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển*

Khi kết hợp thông minh của kỹ thuật điều khiển tạo hình dạng đầu vào và điều khiển có hồi tiếp thì cấu trúc điều khiển phải được xác định trước. Nhìn chung có hai phương án đó là bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào nằm bên ngoài vòng lặp phản hồi khi đó bộ phận tạo hình dạng tín hiệu sẽ được sử dụng để tạo hình dạng tín hiệu tham chiếu thông thường của hệ thống điều khiển theo vòng kín. Do vậy để kết hợp thông minh điều khiển theo kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào và bộ điều khiển có phản hồi thông thường theo hệ thống vòng kín thì bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào phải được bố trí ở phía trước bộ điều khiển. Tín hiệu điều khiển đã được lọc và được thực thi trên các máy móc thiết bị, bộ phận tạo hình dạng tín hiệu tại hình 5 có thể được thiết kế có cách thức giống như một bộ phận tạo hình dạng tín hiệu tiêu chuẩn ngay cả khi nó làm việc như một bộ lọc.




**Hình 5.** Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển với bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào nằm bên trong vòng lặp có phản hồi. Khối máy móc thiết bị chính là mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do.

### *3.2. Thiết kế điều khiển*

*3.2.1. Thiết kế điều khiển chống rung lắc dựa vào kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập*

Do mục tiêu ban đầu của kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào là để giảm các dao động của móc treo và vật nâng trong mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do, do vậy bộ phận tạo hình dạng tín hiệu dao động cân bằng (ký hiệu là ZV) được nghiên cứu để đưa dao động dư về vị trí cân bằng tại tần số thiết kế. Một bộ tạo hình dạng tín hiệu như vậy hoàn toàn phụ thuộc vào các tham số của hệ thống. Nếu các tham số của hệ thống là không được nhận biết một cách chính xác thì hiệu quả của bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu có thể bị giảm sút một cách bất ngờ. Trong thực tế, các tham số của hệ thống được mô hình hóa nằm trong phạm vi dung sai cho phép đối với các bộ tạo hình dạng tín hiệu dao động cân bằng (ZV) là rất khó và nhiều khi là bất khả thi và chính khó khăn này đã tạo cảm hứng cho việc nghiên cứu xây dựng các bộ phận tạo hình dạng tín hiệu bền vững.

Nhằm để tăng sự bền vững của bộ tạo hình dạng tín hiệu dao động cân bằng (ZV) thì phương pháp đạo hàm được xem xét, đó là đặt phép lấy đạo hàm theo tần số của dao động dư và cho bằng 0. Một bộ phận tạo hình dạng tín hiệu dao động cân bằng cao cấp như vậy được gọi là bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đạo hàm và dao động cân bằng ký hiệu là ZVD.

Có vô số cách để thiết kế các bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu duy nhất [33]. Từ các phương trình xác định các tần số dao động riêng thấp và tần số dao động riêng cao đã được tuyến tính hóa (4) và 5) của mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do ta thấy để triệt tiêu các dao động có hai dạng tần số như vậy, thì bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đạo hàm và dao động cân bằng tích chập $ZVD_{cov}$ phải được xác lập và để triệt tiêu dao động có một tần số $f_0$ thì bộ tạo hình dạng tín hiệu đạo hàm và dao động cân bằng của nó là $ZVD_{f0}$ được xác định như sau:

$$ZVD_{f0} = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{\pi}{f_0} & \frac{2\pi}{f_0} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Xét các chuyển động con lắc hai bậc tự do tại hình 2, các dao động có chứa hai tần số dao động riêng, đó là, tần số thấp $\omega_1$ (của móc treo) và tần số cao $\omega_2$ (của vật nâng). Hai bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đạo hàm và dao động cân bằng ký hiệu là ZVD theo hai tần số dao động riêng này có thể được xác định bằng các biểu thức dưới đây:

$$ZVD_{\omega_1} = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_1} & \frac{2\pi}{\omega_1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$ZVD_{\omega_2} = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_2} & \frac{2\pi}{\omega_2} \end{bmatrix}$$

Tích chập hai bộ tạo hình dạng tín hiệu ta có được ma trận tích chập (ký hiệu là $ZVD_{cov}$) được xác định như sau:

$$ZVD_{cov} = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_1} & \frac{2\pi}{\omega_1} & \frac{\pi}{\omega_2} & \frac{\pi}{\omega_1}+\frac{\pi}{\omega_2} & \frac{2\pi}{\omega_1}+\frac{\pi}{\omega_2} & \frac{2\pi}{\omega_2} & \frac{\pi}{\omega_1}+\frac{2\pi}{\omega_2} & \frac{2\pi}{\omega_1}+\frac{2\pi}{\omega_2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Phương trình (24) chỉ là bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đạo hàm và dao động cân bằng tích chập $ZVD_{cov}$. Cuối cùng, lực tác dụng vào mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do tại Hình 2 được tạo ra bằng cách tích chập định luật điều khiển phản hồi u với bộ tạo hình dạng tín hiệu $ZVD_{cov}$:

$$f = u * ZVD_{cov} \quad (25)$$

Ở đây: * là ký hiệu của toán tử tích chập.

*3.2.2 Thiết kế điều khiển chống rung lắc dựa vào kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời*

Ý tưởng cơ bản của bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời là để tạo ra khoảng thời gian của bộ tạo hình dạng tín hiệu $t_n$ tại phương trình (18) ngắn nhất có thể. Về mặt kỹ thuật, việc thiết kế bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đồng thời là để cực tiểu hóa thời gian xung của bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào theo một số các ràng buộc, ở đây các hàm mục tiêu hoặc hàm phạt được thiết lập như sau:

$$\text{Hàm mục tiêu} \quad \mathbf{min}\ t_n \quad (26)$$

Các ràng buộc sau đây cần được xem xét trong bài toán tối ưu hóa:

$$\text{Dao động dư } V_{amp} \le V_{tol} \quad (27)$$

Tại phương trình (26) thì $V_{amp} = |C_1| + |C_2|$, ở đây $C_1$ và $C_2$ được xác định từ các phương trình (14) và (15)

$$\text{Các biên độ xung } \sum_{i=1}^{n} A_i = 1 \quad (28)$$

Do các xung dương được nạp vào, ta có:

$$\text{Bộ tạo hình dạng tín hiệu dương } A_i > 0 \quad (29)$$

Các ràng buộc nêu trên có thể được rút ra từ khái niệm của việc tạo hình dạng tín hiệu đầu vào. Ngoài ra, một bộ tạo hình dạng tín hiệu 5 xung được sử dụng để triệt tiêu các chuyển động con lắc ở dạng hai bậc tự do sao cho một ràng buộc bổ sung được đưa ra như sau:

$$\begin{matrix} A_1 - A_5 = 0 \\ \text{Tính đối xứng} \\ A_2 - A_4 = 0 \end{matrix} \quad (30)$$

Lời giải của bài toán tối ưu hóa có thể được giải quyết bằng hộp công cụ tối ưu hóa trong ngôn ngữ lập trình Matlab.

Lấy mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do có các thông số vật lý như sau:

$m_0 = 1$ kg, $m_1 = 0.5$ kg, $m_2 = 1$ kg, $l_1 = 1$m, $l_2 = 1$m, và gia tốc trọng trường $g = 9.81$ m/s$^2$. Sau 4 vòng lặp, thì lời giải của bộ phận tạo hình dạng tín hiệu ngõ vào đồng thời đã được thiết kế $SIS_{shaper}$ có được như sau:

$$SIS_{shaper} = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2342 & 0.2543 & 0.0000 & 0.2342 & 0.2543 \\ 0 & 0.4186 & 0.8727 & 0.9065 & 1.822 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Phương trình (31) chỉ là bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đồng thời. Cuối cùng, lực phát động tác dụng vào mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do tại hình 2 được tạo ra bằng cách tích chập định luật điều khiển phản hồi u với bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đồng thời $SIS_{shaper}$:

$$f = u^* SIS_{shaper} \quad (32)$$

Ở đây, * là ký hiệu của toán tử tích chập.

## 4. Các kết quả thử nghiệm mô phỏng bằng số

Xét phần cấu trúc điều khiển tại hình 5 cho thấy bất kỳ định luật điều khiển có phản hồi nào cũng có thể tích hợp với bộ phận điều khiển chống rung 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 kiểu tích chập $ZVD_{cov}$ và với bộ phận điều khiển chống rung lắc cho mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do dựa trên kỹ thuật tạo hình dáng tín hiệu đầu vào đồng thời $SIS_{shaper}$. Trong nội dung bài báo này chúng tôi sử dụng hai bộ phận điều khiển có hồi tiếp đó là điều khiển chống rung lắc dựa trên kỹ thuật thụ động và bộ điều khiển chống rung lắc hệ mờ dựa vào kỹ thuật mô đun lệnh một đầu vào đã được nghiên cứu để tích hợp với bộ điều khiển chống rung lắc dựa trên kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu ngõ vào kiểu tích chập và bộ điều khiển chống rung lắc dựa trên kỹ thuật tạo hình dạng đầu vào kiểu đồng bộ nêu trên. Cơ sở lý thuyết và thiết kế bộ điều khiển dựa trên kỹ thuật thụ động để điều khiển chống rung lắc cho mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do đã được nghiên cứu và trình bày chi tiết trong các công trình [41, 23, 42, 43, 44, 45, 46, 48]. Tương tự cơ sở lý thuyết về tập mờ cũng như thiết kế bộ điều khiển hệ mờ dựa trên kỹ thuật mô đun lệnh một đầu vào để chống rung lắc cho mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do đã được nghiên cứu và trình bày chi tiết trong các công trình nghiên cứu như [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 48]. Như vậy bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và bộ điều khiển hệ mờ dựa trên mô đun lệnh một đầu vào được chúng tôi sử dụng để tích hợp với các bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và kiểu đồng thời. Trong các phần dưới đây chúng tôi xin được trình bày kết quả mô phỏng bằng số khi tích hợp các hệ thống điều khiển nêu trên với nhau sau khi nạp số liệu vào trong cấu trúc điều khiển tại Hình 5.

### *4.1. Điều khiển chống rung lắc khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập với bộ điều khiển dựa trên kỹ thuật thụ động.*

Nạp số liệu vào cấu trúc điều khiển tại hình 5 và tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập với bộ điều khiển chống rung lắc dựa vào kỹ thuật thụ động như đã trình bày. Một thiết kế điều khiển phối hợp như vậy được áp dụng và trình bày nhằm để giúp chúng ta nhận ra tính hiệu quả của bài toán điều khiển vận chuyển của mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do.

#### *4.1.1. Kết quả mô phỏng bằng số để hỗ trợ thiết kế điều khiển*

Các thông số vật lý của mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do được xác định để mô phỏng trong chương trình Matlab như sau: $m_0 = 1$kg (trọng lượng xe con), $m_1 = 0.5$kg, $m_2 = 1$kg, $l_1 = 1$m, và $l_2 = 1$m. (các tham số vật lý này được lấy giống nhau trong các bộ điều khiển nhằm mục đích dễ so sánh, nhận xét).

Bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập đã được thiết kế trong phương trình (24) Cuối cùng, định luật điều khiển áp dụng cho xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do được xác định bởi phương trình (25).

Mục tiêu điều khiển là để di chuyển vật nâng $m_2$ đến một vị trí mong muốn. Không mất tính tổng quát, vị trí mong muốn x được đặt là 1m tính từ gốc tọa độ tại hình 2. Trong khi đó, bộ phận điều khiển cần phải triệt tiêu các chuyển động của móc treo và vật nâng trong mô hình con lắc hai bậc tự do. Các kết quả mô phỏng bằng số được trình bày tại các Hình từ 6 đến 12.

#### *4.1.2 Một số nhận xét về kết quả mô phỏng bằng số*

Tại các Hình từ 6 đến 12, cho thấy việc thiết kế điều khiển mà tích hợp bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập nằm bên trong vòng lặp có phản hồi là đạt được mục tiêu điều khiển vận chuyển.

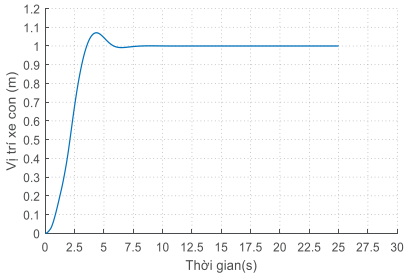
Tại Hình 6 cho thấy xe con đến vị trí mong muốn ($x = 1$ m) mất thời gian là khoảng 6,5 giây.

Tại các đường cong trong hình 8 và 10 cho thấy rằng hai độ lệch góc (biên độ dao động) của móc treo $\theta_1$ và vật nâng $\theta_2$ ban đầu là nhỏ và sau khoảng thời gian 6,5 giây (xe con đến vị trí mong muốn) thì biên độ chỉ dao động dư rất bé một chút quanh vị trí cân bằng 0 và sau khoảng thời gian là 9 giây thì dao động tắt về 0.

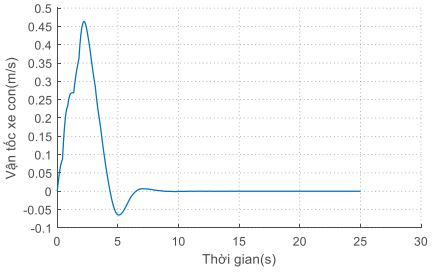
Nhằm để giữ hai độ lệch góc nhỏ nhất có thể, lực phát động f trong Hình 12 thay đổi một cách sắc nhọn tại lúc khởi động ban đầu với biên độ bé. Khi xe con gần tới vị trí mong muốn $x = 1$m, lực phát động f tác động một cách rất êm dịu vào hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do (do $f \approx 0$). Và sau khoảng thời gian là 9 giây thì lực phát động $f = 0$.

Kết quả mô phỏng tại các Hình 8 đến 11, các góc lắc móc treo và tải trọng nâng không còn có dao động dư rất nhỏ nào khi xe con đến tại vị trí mong muốn (góc lắc của móc treo và vật nâng tiến về 0 nhanh hơn, biên độ dao động nhỏ hơn nhiều).

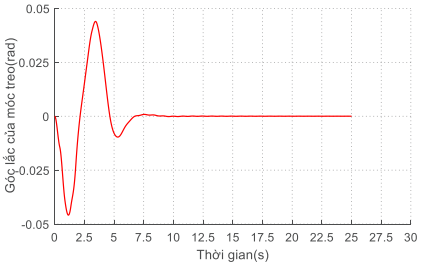
Ngoài ra kết quả tại Hình 12 còn cho thấy rằng bộ phận tạo hình dạng tín hiệu trong thiết kế điều khiển phối hợp làm việc giống như bộ hạn chế. Khi xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do di chuyển, bộ tạo hình dạng tín hiệu không chỉ tạo hình dạng tín hiệu điều khiển thông qua thiết kế điều khiển đã đề xuất mà nó còn có thể làm giảm bớt sự biến thiên của tín hiệu điều khiển tác động vào xe con cần trục.




**Hình 6.** Vị trí xe con x (m) theo thời gian t (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.

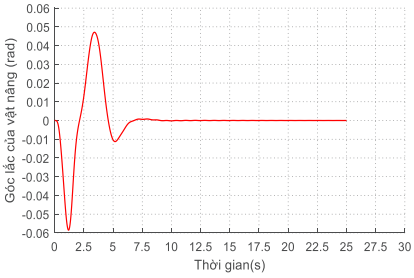



**Hình 7.** Vận tốc xe con cần trục v= dx/dt (m/s) theo thời gian t(s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.

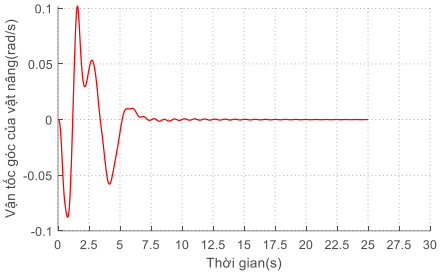



**Hình 8**. Góc lắc của móc treo $\theta_1$ (rad) theo thời gian t (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.

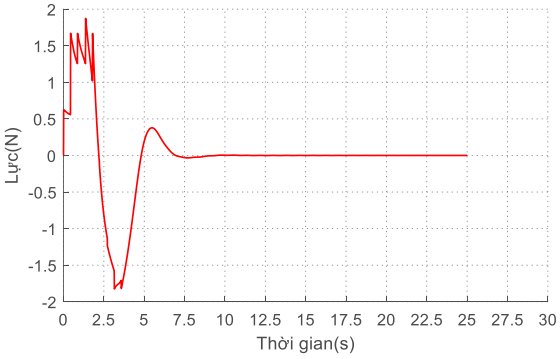
**Hình 9.** Vận tốc góc của móc treo $\frac{d\theta_1}{dt}$ (rad/s) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.




**Hình 10.** Góc lắc của tải trọng nâng $\theta_2$ (rad) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.




**Hình 11.** Vận tốc góc của tải trọng nâng $\frac{d\theta_2}{dt}$ (rad/s) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.




**Hình 12.** tín hiệu đầu vào điều khiển là lực phát động f (N) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển dựa tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.

*4.2. Điều khiển chống lắc khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động*

Nhằm nâng cao hiệu quả của bộ phận tạo hình dạng tín hiệu ngõ vào kiểu đồng thời, nạp số liệu vào Hình 5 đồng thời tích hợp bộ điều khiển chống rung lắc dựa vào kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời với bộ điều khiển chống rung lắc dựa vào kỹ thuật thụ động. Việc thiết kế một bộ phận điều khiển như vậy được trình bày để giúp chúng ta thấy rõ được mục tiêu và tính hiệu quả của bài toán điều khiển vận chuyển của hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do.

*4.2.1. Kết quả mô phỏng bằng số để hỗ trợ thiết kế điều khiển*

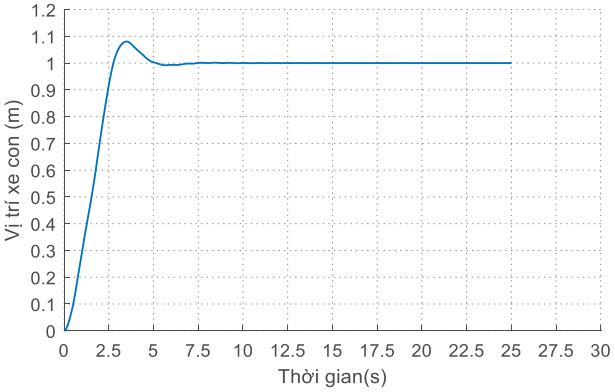
Không mất tính tổng quát và để dễ ràng so sánh, nhận xét, các thông số vật lý của hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do được giữ không thay đổi, đó là, $m_0 =$ 1kg, $m_1 = 0.5$kg, $m_2 = 1$kg, $l_1 = 1$m và $l_2 = 1$m.

Bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đồng thời đã được thiết kế tại phương trình (31). Cuối cùng, định luật điều khiển áp dụng cho xe con cần trục được xác định bằng phương trình (32). Cần chú ý rằng một giá trị tại phương trình (31) là bằng không. Điều này có nghĩa rằng xung được giữ không thay đổi ở thời điểm đó. Do đó, chuỗi xung tác dụng vào xe con cần trục là:

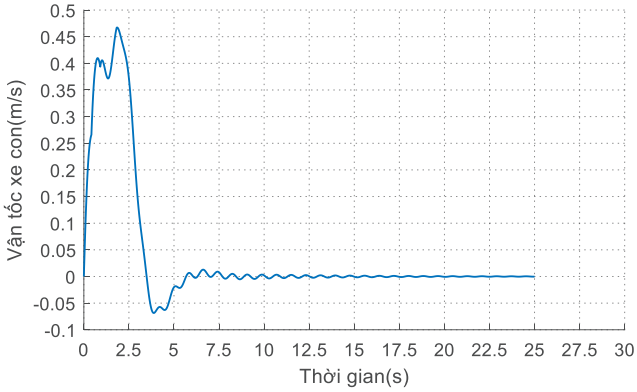
$$SIS_{shaper} = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2342 & 0.2543 & 0.0000 & 0.2342 & 0.2543 \\ 0 & 0.4186 & 0.8727 & 0.9065 & 1.822 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Loạt xung cũng có thể đảm bảo rằng hệ thống xe con cần trục có **$t_n$ đạt cực tiểu** và thời gian không hợp lý là được loại bỏ.

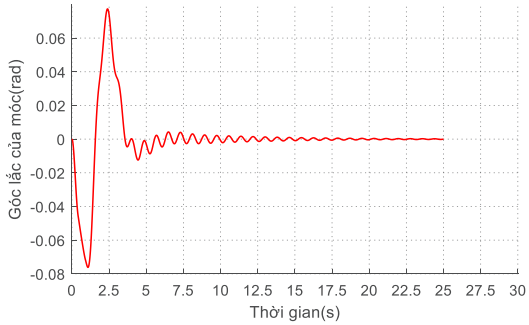
Do mục tiêu điều khiển là để vận chuyển tải trọng nâng đến một vị trí mong muốn. Vị trí mong muốn x được đặt tại 1m, có nghĩa rằng x =1m tính từ gốc tọa độ ban đầu như tại Hình 2. Trong khi bộ điều khiển cần phải triệt tiêu các chuyển động của móc treo và vật nâng trong mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Nạp số liệu vào Hình 5 và chạy chương trình Matlab ta có **các** kết quả mô phỏng bằng số trong chương trình Matlab được trình bày tại các Hình từ 13 đến 19 dưới đây:



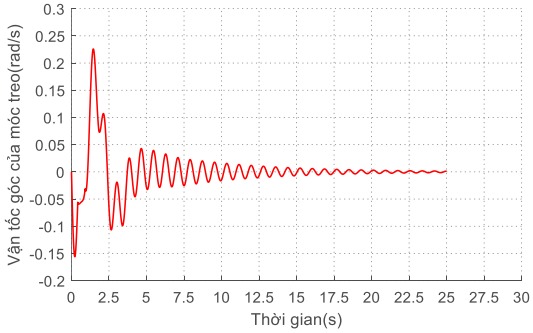

**Hình 13.** Vị trí xe con x(m) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.



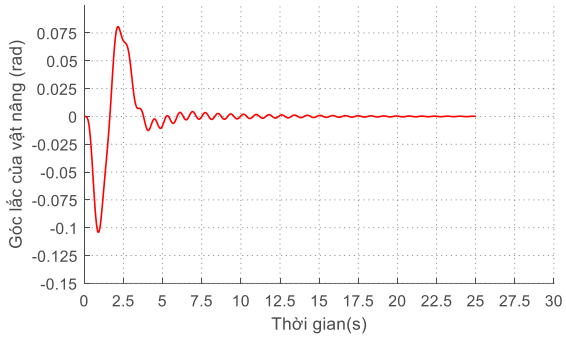

**Hình 14.** Vận tốc xe con cần trục dx/dt (m/s) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.



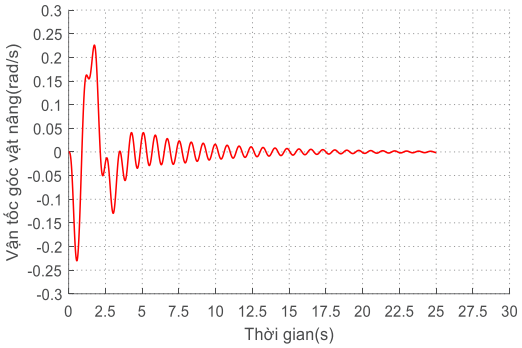

**Hình 15.** Góc lắc của móc treo $\theta_1$ (rad) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.



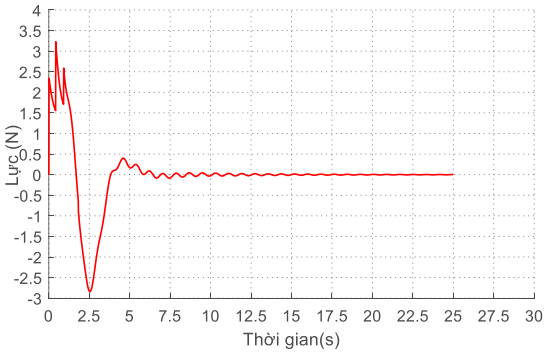

**Hình 16.** Vận tốc góc của móc treo $\frac{d\theta_1}{dt}$ (rad/s) theo thời gian (s) khi tích bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.




**Hình 17.** Góc lắc của vật nâng $\theta_2$ (rad) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.




**Hình 18.** Vận tốc góc của vật nâng $\frac{d\theta_2}{dt}$ (rad/s) hay là đạo hàm góc lắc của vật nâng theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.




**Hình 19.** Tín hiệu đầu vào điều khiển, lực phát động f (N) theo thời gian t (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động.

*4.2.2 Một số nhận xét về kết quả mô phỏng bằng số*

Tại các Hình từ 13 đến 19 cho thấy việc thiết kế điều khiển mà tích hợp bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời nằm bên trong vòng lặp có phản hồi là đạt được mục tiêu điều khiển vận chuyển.

Tại Hình 13 cho thấy xe con đến vị trí mong muốn (x = 1m) mất thời gian là khoảng 7 giây.

Các đường cong tại các Hình 15 và 17 cho thấy rằng hai độ lệch góc (biên độ dao động) của móc treo $\theta_1$ và vật nâng $\theta_2$ ban đầu là khá lớn và thời gian dao động kéo dài và sau khoảng thời gian là 7 giây (tức là xe con đến vị trí mong muốn) thì biên độ của $\theta_1$ và $\theta_2$ có giảm xuống quanh vị trí cân bằng 0 và sau khoảng thời gian là 12.5 giây thì $\theta_1$ và $\theta_2$ vẫn còn dao động với biên độ bé nhưng không tắt hẳn về 0 như trường hợp $\theta_1$ và $\theta_2$ của trường hợp tích hợp bộ điều khiển kiểu tích chập với bộ điều khiển kiểu thụ động. Như vậy về mặt đồ thị ta thấy các đường cong $\theta_1$ và $\theta_2$ tại các Hình 15 và 17 có chất lượng kém hơn nhiều so với các đường cong $\theta_1$ và $\theta_2$ tại các Hình 8 và 10 của bộ điều khiển thụ động tích hợp với bộ điều khiển kiểu tích chập.

Về tín hiệu điều khiển, lực phát động f tại hình 19 thay đổi một cách sắc nhọn tại lúc khởi động ban đầu với biên độ khá lớn và cụ thể là lớn hơn biên độ của lực phát động tại Hình 12. Khi xe con gần tới vị trí mong muốn x = 1 m (sau 7 giây), lực phát động f tác động một cách nhỏ với biên độ bé hơn vào hệ xe con cần trục. Và sau khoảng thời gian là 12.5 giây thì lực phát động f nhỏ dần nữa và tiến dần 0. Từ kết quả mô phỏng ta thấy khi so sánh đường cong lực phát động f tại Hình19 có chất lượng kém hơn nhiều so với đường cong tại Hình 12 của bộ điều khiển thụ động tích hợp với bộ điều khiển kiểu tích chập. Như vậy từ các kết quả mô phỏng bằng số thì cho thấy bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đồng bộ không có hiệu quả điều khiển tốt hơn bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập.

*4.3. Điều khiển chống rung lắc khi tích hợp bộ điều khiển hệ mờ dựa vào các mô đun lệnh một đầu vào với bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời*

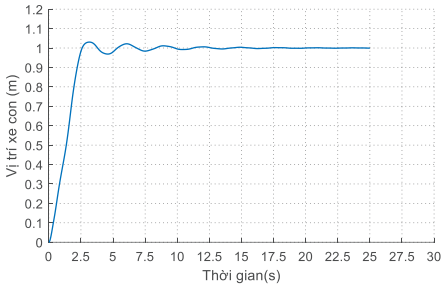
Không mất tính tổng quát và để dễ ràng so sánh, nhận xét, các thông số vật lý của hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do được giữ không thay đổi, đó là, $m_0$ = 1kg, $m_1$ = 0.5kg, $m_2$ = 1kg, $l_1$ = 1m và $l_2$ = 1m.

Nhằm để nâng cao tính hiệu quả của bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đồng thời, cấu trúc điều khiển tại hình 5 được chấp

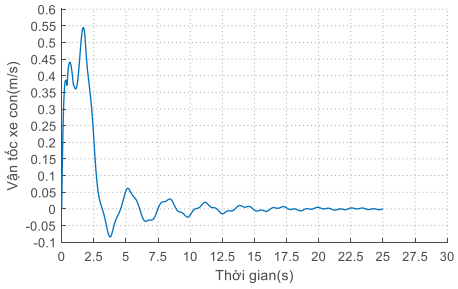
thuận, nạp số liệu và tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời được tích hợp với bộ điều khiển xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do hệ mờ dựa vào kỹ thuật các mô đun lệnh một đầu vào. Một thiết kế điều khiển như vậy được áp dụng và trình bày ở đây để chúng ta thấy rõ được mục đích của bài toán điều khiển vận chuyển của xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do.

*4.3.1. Kết quả mô phỏng bằng số để hỗ trợ thiết kế điều khiển*

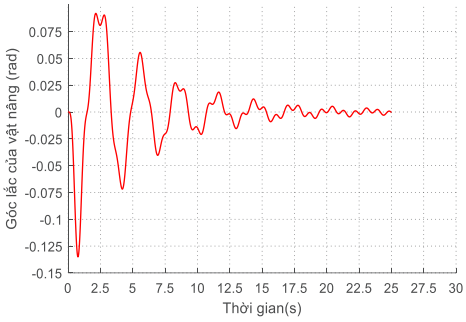
Bộ điều khiển hệ mờ dựa vào kỹ thuật các mô đun lệnh một đầu vào (được ký hiệu là SIRMs) được sử dụng ở đây để tích hợp với bộ điều khiển xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do dựa vào kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào đồng thời. Bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời đã được thiết kế theo phương trình (31). Cuối cùng, định luật điều khiển áp dụng cho hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do được xác định bằng phương trình (32). Ở đây xung lỗi cũng được loại bỏ. Mục tiêu điều khiển là để vận chuyển tải trọng nâng $m_2$ đến một vị trí mong muốn x = 1 m tính từ gốc tọa độ như tại Hình 2. Bộ điều khiển cần phải triệt tiêu các chuyển động của móc treo và vật nâng trong mô hình xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do. Sự tích hợp hệ thống và các kết quả mô phỏng bằng số được thể hiện tại các Hình từ 20 đến 26.



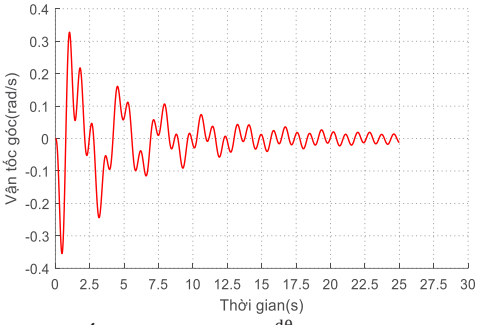

**Hình 20.** Vị trí xe con x(m) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển mờ dựa vào kỹ thuật các mô đun lệnh một đầu vào.



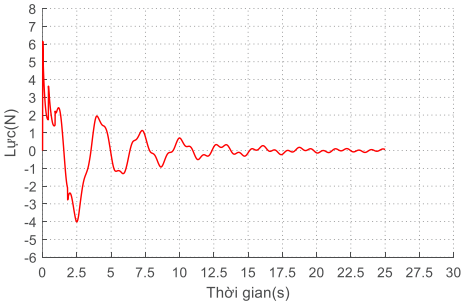

**Hình 21.** Vận tốc xe con cần trục dx/dt (m/s) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển mờ dựa vào kỹ thuật các mô đun lệnh một đầu vào.




**Hình 24.** Góc lắc của vật nâng $\theta_2$ (rad) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển mờ dựa vào kỹ thuật các mô đun lệnh một đầu vào.




**Hình 25.** Vận tốc góc của tải nâng $\frac{d\theta_2}{dt}$ (rad/s) hay là đạo hàm góc lắc của vật nâng theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển mờ dựa vào kỹ thuật các mô đun lệnh một đầu vào.




**Hình 26.** Tín hiệu đầu vào điều khiển là lực phát động f(N) theo thời gian (s) khi tích hợp bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời và bộ điều khiển mờ dựa vào kỹ thuật các mô đun lệnh một đầu vào.

*4.3.2. Một số nhận xét về kết quả mô phỏng bằng số*

Kết quả mô phỏng thể hiện tại các hình từ 20 đến 26 cho thấy việc thiết kế điều khiển khi tích hợp bộ điều khiển mờ dựa trên cơ sở các mô đun lệnh một đầu vào và bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời nằm bên trong vòng lặp có phản hồi là đạt được mục tiêu điều khiển vận chuyển.

Tại Hình 20 cho thấy xe con đến vị trí mong muốn (x = 1m) mất thời gian là khoảng 13 giây.

Các đường cong tại các hình 22 và 24 cho thấy rằng hai độ lệch góc (biên độ dao động) của móc treo $\theta_1$ và vật nâng $\theta_2$ ban đầu là lớn với thời gian dao động kéo dài. Sau khoảng thời gian 13 giây (xe con đến vị trí mong muốn) thì biên độ dao động của $\theta_1$ và $\theta_2$ có giảm dần nhưng vẫn còn khá lớn khi so sánh với các đường cong $\theta_1$ và $\theta_2$ của các bộ điều khiển thụ động tích hợp với bộ điều khiển kiểu đồng thời. Sau khoảng thời gian 25 giây vẫn chưa tắt về 0 mà vẫn còn dao động dư với biên độ khá bé. Như vậy về mặt đồ thị ta thấy các đường cong $\theta_1$ và $\theta_2$ tại các Hình 22 và 24 có chất lượng kém hơn nhiều so với các đường cong $\theta_1$ và $\theta_2$ tại các Hình 15 và 17 của bộ điều khiển kiểu thụ động tích hợp với bộ điều khiển kiểu đồng thời.

Về tín hiệu điều khiển, lực phát động f tại hình 26 thay đổi một cách sắc nhọn tại lúc khởi động ban đầu với biên độ rất lớn với thời gian dao động kéo dài và cụ thể là lớn hơn biên độ của lực phát động tại hình 19 và hình 12. Khi xe con gần tới vị trí mong muốn x = 1m, lực phát động f tác động một cách giảm dần nhưng biên độ vẫn còn khá lớn. Và sau khoảng thời gian là 25 giây thì lực phát động f vẫn chưa về 0. Từ kết quả mô phỏng ta thấy khi so sánh đường cong lực phát động f tại Hình 26 có chất lượng kém hơn so với đường tín hiệu điều khiển tại Hình 19 của bộ điều khiển thụ động tích hợp với bộ điều khiển đồng thời và có chất lượng kém hơn nhiều so với đường cong tại hình 12 của bộ điều khiển thụ động tích hợp với bộ điều khiển kiểu tích chập. Như vậy, lực điều khiển f tác động vào xe con được trình bày tại hình 26 cho thấy rằng hệ xe con cần trục cần 1 lực điều khiển lớn tại vị trí khởi đầu. Điều này có thể gây ra hiện tượng quá tải cho động cơ dẫn động cơ cấu di chuyển xe con trong thực tế.

Tóm lại từ các kết quả mô phỏng bằng số và thông qua các nhận xét nêu trên thì cho thấy rằng việc tích hợp bộ phận tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động có hiệu quả điều khiển cao hơn việc tích hợp bộ phận điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng thời. Trong khi đó việc tích hợp bộ điều khiển mờ dựa trên nguyên tắc các mô đun lệnh một đầu vào với bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu đồng bộ lại có chất lượng điều khiển kém hơn khi tích chập bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và bộ tạo hình dạng tín hiệu đồng thời. Điều này có nghĩa rằng sự tích hợp của bộ phận điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và bộ phân tạo hình dạng tín hiệu kiểu tích chập là có hiệu quả điều khiển cao nhất, đóng góp vào việc nâng cao hiệu quả điều khiển chống rung lắc cho xe con cần trục xây dựng ở dạng con lắc hai bậc tự do.

## 5. Kết luận

Mô hình động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do phản ánh sát với thực tế của xe con cần trục khi so với mô hình động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc một bậc tực do. Để có các thông tin đầu vào cho việc thiết kế hợp lý các bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào để điều khiển động cơ dẫn động xe con cần trục, chúng tôi đã thực hiện khảo sát bằng số động lực học xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do nhằm xác định các tần số dao động riêng của móc treo và vật nâng cũng như chỉ ra mức độ ảnh hưởng của các biên độ của tần số thấp (móc treo) và tần số cao (của vật nâng). Tần số cao trở có ảnh hưởng chính khi khối lượng móc treo là đáng kể khi so sánh với khối lượng của tải nâng. Ngoài ra, đóng góp của tần số cao là cực đại khi chiều dài cáp nâng vật và chiều dài cáp treo hàng là bằng nhau. Chúng tôi đã thực hiện thiết kế các bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập và kiểu đồng thời có tính bền vững với các sai số mô hình hóa và các sai số về tần số. chúng tôi đã thực hiện việc tích hợp các hệ thống điều khiển riêng biệt đó là bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật thụ động và bộ điều khiển mờ dựa trên mô đun lệnh một đầu vào với các bộ điều khiển tạo hình dạng tín hiệu đầu vào nêu trên được đặt bên trong vòng lặp có phản hồi trong cấu trúc điều khiển kiểu lai ghép. Chúng tôi đã thực hiện các mô phỏng bằng chương trình Matlab với các thông số vật lý bằng số của một hệ xe con cần trục ở dạng con lắc hai bậc tự do bất kỳ. Từ các kết quả mô phỏng, chúng tôi đã thực hiện các sự so sánh về chất lượng điều khiển giữa các bộ điều khiển tích hợp nêu trên thì cho thấy sự tích hợp của bộ điều khiển dựa trên kỹ thuật thụ động và bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập cho hiệu quả điều khiển cao nhất trong số 3 bộ điều khiển đã được tích hợp. Nó có thể triệt tiêu được các dao động dư trong khoảng thời gian ngắn. Điều này chứng minh rằng sự tích hợp của bộ điều khiển dựa trên kỹ thuật thụ động và bộ tạo hình dạng tín hiệu đầu vào kiểu tích chập góp phần vào việc nâng cao chất lượng điều khiển chống rung lắc cho xe con cần trục kiểu dạng con lắc hai bậc tự do.

## Lời cám ơn

Các tác giả xin được chân thành cảm tạ Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã hỗ trợ cho đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp trường năm 2021 mã số đề tài: 37-2021/KHXD. Các tác giả cũng xin được chân thành bày tỏ sự biết ơn tới các bạn đồng nghiệp, các nhà khoa học, Ban biên tập Tạp chí Vật liệu và Xây dựng của Viện Vật liệu Xây dựng- Bộ Xây dựng đã có những giúp đỡ và đóng góp những ý kiến quí báu trong quá trình bình duyệt bản thảo.

## Tài liệu tham khảo

[1]. Abdel- Rahman EM, Nayfeh AH, Masoud ZN. *Dynamics and control of cranes: a review*. J Vib Control, 2003. **9**(7): p.863-908.

[2]. Tuan L, Janchiv A, Kim GH, Lee SG. *Feedback linearization control of overhead cranes with varying cable length*. In: Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea, 2011. p. 906–911.

[3]. Tuan L, Kim GH, Lee SG. *Partial feedback linearization control of the three-dimensional overhead crane*. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Seoul, Korea, 2012. p. 1198–1203.

[4]. Wu XQ, He XX, Sun N, Fang YC. *A novel anti-swing control method for 3-D overhead cranes*. In: Proceedings of American Control Conference, Portland OR, USA, 2014. p. 2821–2826.

[5]. Maschke B, Ortega R, Van der Schaft AJ. *Energy-based Lyapunov functions for forced Hamiltonian systems with dissipation*. IEEE Trans Autom Control, 2000. **45**(8): p.1498–1502.

[6]. Karkoub MA, Zribi M. *Modelling and energy based nonlinear control of crane lifters*. IEE Proc Control Theory Appl, 2002. **149**(3): p. 209–216.

[7]. Guo W, Liu D, Yi J, Zhao D. *Passivity-based-control for double-pendulum-type overhead cranes*. In: Proceedings of IEEE Region 10 Annual International Conference, Chiang Mai, Thailand, 2004. p. 546–549.

[8]. Collado J, Lozano R, Fantoni I. *Control of convey-crane based on passivity*. In: Proceedings of American Control Conference, Chicago IL, USA, 2000. p. 1260–1264.

[9]. Cao LZ, Wang HW, Niu C, Wei SB. *Adaptive backstepping control of crane hoisting system*. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, China, 2007, p. 245–248.

[10]. Yang JH, Yang KS. *Adaptive control for 3-D overhead crane systems*. In: Proceedings of American Control Conference, Minneapolis MN, USA, 2006. p. 1832–1837.

[11]. Yang TW, O'Connor WJ. *Wave based robust control of a crane system*. In: Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006. p. 2724–2729.

[12]. Uchiyama N. *Robust control of rotary crane by partial-state feedback with integrator*. Mechatronics, 2009. **19**(8): p.1294–1302.

[13]. Deng JM, Becerra VM. *Application of constrained predictive control on a 3D crane system*. In: Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore City, Singapore, 2004. p. 583–587.

[14]. Michels K, Klawonn F, Kruse R, Numberger A. *Fuzzy control: Fundamentals, stability and design of fuzzy controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006.

[15]. Ross IM, Fahroo F. *Pseudospectral methods for optimal motion planning of differentially flat systems*. IEEE Trans Autom Control, 2004. **49**(8): p. 1410–1413.

[16]. Zameroski D, Starr G, Wood J, Lumia R. *Rapid swing-free transport of nonlinear payloads using dynamic programming*. J Dyn Syst Meas Control Trans ASME, 2008, 130(4), DOI:10.1115/1.2936384.

[17]. Da Cruz JJ, Leonardi F. *Minimum-time anti-swing motion planning of cranes using linear programming*. Optimum Control Appl Meth, 2013. **34**(2): p. 191–201.

[18]. French L, Singhouse W, Seering W. *An expert system for the design of input shapers*. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications, Kohala Coast-Island, USA, 1999. p. 713–718.

[19]. Singer N, 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 Translational Actuators,"* in Proceedings of the 2000 American Control Conference, Vol. 2. p. 1052–1056.

[22]. Tanaka, S., and Kouno, S., 1998, *"Automatic Measurement and Control of the Attitude of Crane Lifters: Lifter-Attitude Measurement and Control,"* Control Eng. Pract.,**6**(9), p. 1099–1107.

[23]. Ortega R, Perez JA, Nicklasson PJ, Sira-Ramirez H. *Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: Mechanical, electrical and electromechanical applications*. Berlin: Springer, 2013.

[24]. Qian D, Tong S, Yang B, Lee S. *Design of simultaneous input-shaping-based SIRMs fuzzy control for double-pendulum-type overhead cranes*. Bull Pol Acad Sci-Tech Sci, 2015. **63**(4): p. 887–896.

[25]. Smith, O. J. M., 1958, *Feedback Control Systems*, McGraw-Hill, New York.

[26]. Singer, N., and Seering, W., 1990, *"Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration"* J. Dyn. Syst., Meas., Control.112. p. 76–82.

[27]. Kenison, M., and Singhose, W., 2002, *"Concurrent Design of Input Shaping and Proportional Plus Derivative Feedback Control,"* ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control. **1243** (3): p. 398–405.

[28]. Singer, N., Singhose, W., and Kriikku, E., 1997, *"An Input Shaping Controller Enabling Cranes to Move Without Sway,"* in ANS Seventh Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Augusta, GA, Vol. 1. p. 225–231.

[29]. Singhose, W., Porter, L., Kenison, M., and Kriikku, E., 2000, *"Effects of Hoisting on the Input Shaping Control of Gantry Cranes,"* Control Eng. Pract., **8**(10): p. 1159–1165.

[30]. Sorensen, K., Singhose, W., and Dickerson, S., 2007, *"A Controller Enabling Precise Positioning and Sway Reduction in Bridge and Gantry Cranes,"* Control Eng. Pract.**15**(7): p. 825–837.

[31]. Vaughan J, Kim D, Singhose W. *Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics*. IEEE Trans Control Syst Technol, 2010. **18**(6): p. 1345–1358.

[32]. Pai MC. *Robust input shaping control for multi-mode flexible structures using neuro-sliding mode output feedback control*. J Frankl Inst – Eng Appl Math, 2012. **349**(3): p. 1283–1303.

[33]. Qian DW, Tong SW, Yi JQ. *Adaptive control based on incremental hierarchical sliding mode for overhead crane systems*. Appl Math Inform Sci, 2013. **7**(4): p. 1359–1364.

[34]. Chen G, Pham TT. *Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems*. Padstow: CRC Press, 2000.

[35]. Yager RR, Zadeh LA. *An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems*. Berlin: Springer, 2012.

[36]. Yi J, Yubazaki N, Hirota K. *Anti-swing and positioning control of overhead traveling crane*. Inf Sci, 2003. **155**(1): p. 19 – 42.

[37]. Seki H, Ishii H, Mizumoto M. *On the generalization of single input rule modules connected type fuzzy reasoning method*. IEEE Trans Fuzzy Syst, 2008. **16**(5): p. 1180 –1187.

[38]. Liu D, Yi J, Zhao D, Wang W. *Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane. Mechatronics*, 2005. **15**(5): p. 505–522.

[39]. Lee LH, Huang CH, Ku SC, Yang ZH, Chang CY. *Efficient visual feedback method to control a three-dimensional overhead crane*. IEEE Trans Ind Electron, 2014. **61**(8): p. 4073–4083.

[40]. Qian DW, Tong SW, Lee S. *Fuzzy-logic-based control of payloads subjected to double-pendulum motion in overhead cranes*. Autom Constr, 2016, 65: p. 133–143.

[41]. Liu DT, Guo WP, Yi JQ. *Dynamics and GA-based stable control for a class of underactuated mechanical systems*. Int J Control Autom Syst, 2008. **6**(1): p. 35–43.

[42]. Fantoni I, Lozano R, Spong MW. *Energy based control of the pendubot*. IEEE Trans Autom Control, 2000. **45**(4): p. 725–729.

[43]. Khalil HK (1996), *Nonlinear systems*. *Upper Saddle River*, NJ: Prentice-Hall, 1996.

[44]. Spong MW, Holm JK, Lee D. *Passivity-based control of bipedal locomotion*. IEEE Robot Autom Mag, 2007. **14**(2): p. 30–40.

[45]. Ortega R, Van Der Schaft A, Maschke B, Escobar G. *Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems*. Automatica, 2002, 38(4): p. 585–596.

[46]. Gao H, Chen T, Chai T. *Passivity and passification for networked control systems*. SIAM J. Control Optim, 2007. **46**(4): p. 1299–1322.

[47]. Xue D, Chen Y, Atherton DP. *Linear feedback control: Analysis and design with MATLAB*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.

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

[49]. Hồ Việt Long, Dương Minh Đức, *Điều khiển chống rung cho cẩu tháp*, 2017, CASD 2017.

[50]. 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.

[51]. 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.

[52]. 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.

[53]. Nguyễn Văn Hùng, *Nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm, khảo sát động lực học và khả năng điều khiển ổn định của vật nâng theo phương ngang khi di chuyển xe con cầu trục*" 2013, *Luận văn thạc sỹ kỹ thuật chuyên ngành Kỹ thuật cơ khí*; Mã số: 60520103, ĐHXD 2013. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

[54]. 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.

[55]. 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.

[56]. 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.