

# MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG CẦU TRỤC THEO VỊ TRÍ TẢI TRỌNG

Phạm Thế Duy

Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Thành Phố Hồ Chí Minh

**Abstract** — Bài báo trình bày phương pháp mô hình hóa hệ thống điều khiển vị trí chuyển động của tải trọng cho cầu trục, phục vụ cho việc tự động hóa hệ thống cầu trục trong thực tế. Do việc điều khiển các hệ thống cầu trục cho các ứng dụng khác nhau trong thực tế, sẽ đòi hỏi độ chính xác điều khiển khác nhau, đối với các hệ thống yêu cầu độ chính xác thấp có thể sử dụng mô hình động học đơn giản. Để thực hiện mô hình toán học đơn giản nhất, trong bài báo này thực hiện việc mô hình hóa hệ thống cầu trục theo các bước sau: Trước hết thực hiện việc mô hình hóa vị trí chuyển động của xe con, hệ thống dầm và chiều dài nâng hạ tải, với các phương trình ba trục chuyển động theo định luật 2 Newton. Tiếp theo thực hiện các phép xấp xỉ gần đúng để đơn giản hóa các phương trình động học của hệ thống. Để thực hiện việc kiểm tra độ chính xác cần thiết của các phương trình động học, bài báo thực hiện việc mô phỏng hoạt động của mô hình toán theo các tham số của hệ thống cầu trục 20 tấn thực tế. Và hiệu chỉnh độ lợi ngõ vào các lực tác dụng theo các trục để chứng minh tính khả dụng của mô hình toán đã xây dựng.

**Keywords** — Mô hình hóa hệ thống, điều khiển vị trí, điều khiển hệ thống cầu trục, mô hình hóa hệ thống điều khiển cầu trục.

## I. MỞ ĐẦU

Các hệ thống cầu trục ngày nay được sử dụng khá phổ biến trong công nghiệp. Các hệ thống cầu trục này thường sử dụng trong các xưởng sửa chữa cơ khí, sử dụng cho việc di chuyển các thiết bị dụng cụ, vật liệu nặng, hình 1, trong các bến cảng cho việc vận chuyển sắp xếp các container hàng hóa, hình 2. Ngoài ra, chúng cũng được sử dụng trong một số dây chuyền sản xuất các sản phẩm như cột điện, sắt thép, ....

Hiện nay, trong nước đa số các hệ thống cầu trục này thường được vận hành bằng tay với các bộ điều khiển nút bấm, nối dây hoặc vô tuyến, bằng người ngồi lái trên các ca bin như trên các cầu trục container. Trên thế giới, các hệ thống cầu trục đã và đang được thực hiện bán tự động, hoặc tự động hoàn toàn. Việc điều khiển hoàn toàn tự động các hệ thống cầu trục này đang trở thành một nhu cầu cấp thiết, để thực hiện các nhà máy bến cảng tự động, theo các tiêu chuẩn công nghiệp 4.0. Ví dụ như các hệ thống tự động sắp xếp ghi nhớ vị trí của container tại các cảng biển, hoặc các

hệ thống cầu trục tự động vận chuyển hàng hóa, vật liệu cho các quy trình sản xuất trong các nhà máy. Và vì vậy, đã có rất nhiều nghiên cứu nhằm tìm ra giải pháp tốt nhất, rẻ nhất, tối ưu nhất cho các hệ thống cầu trục. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện đang tập trung vào các hệ thống cầu trục sử dụng nhiều, có giá thành cao như hệ thống cầu trục container giữa tàu và bờ, các nghiên cứu cũng chủ yếu tập trung vào các giải thuật chống rung lắc khi tải chuyển động [1] ~ [3]. Hoặc sử dụng các việc mô hình hóa theo phương trình Euler Lagrange với nhiều thông số và giải thuật tính toán phức tạp [4], yêu cầu các bộ điều khiển có giá thành cao. Các giải thuật chống rung lắc cho phép cầu trục vận chuyển với tốc độ cao, nhưng cần tính toán với một mô hình toán đầu đủ tham số và định hướng theo điều khiển tốc độ. Mặt khác, sau khi thực hiện các giải thuật chống rung lắc khi chuyển động bằng các điều khiển tốc độ di chuyển của các trục, để hệ thống cầu trục hoạt động tự động, vẫn cần các thuật toán điều khiển vị trí chuyển động của tải.



Hình 1. Hệ thống cầu trục trong nhà xưởng



Hình 2. Hệ thống cầu trục container trên bờ

Để thực hiện các hệ thống cầu trục tự động, cho các ứng dụng tốc độ thấp, với việc tính toán đơn giản, các giải thuật với các thiết bị điều khiển giá thành hạ, có thể thực hiện việc mô hình hóa hệ thống cầu trục ba chiều một cách tối giản, cho việc mô phỏng và thực hiện các giải thuật điều khiển. Và để quá trình nghiên cứu ứng dụng được dễ dàng, có thể

Tác giả liên hệ: Phạm Thế Duy,

Email: duypt@ptit.edu.vn

Đến tòa soạn: 05/2023, chỉnh sửa: 06/2023, chấp nhận đăng: 07/2023.

áp dụng nhanh vào thực tế, trước hết trong bài báo này thực hiện việc mô hình hóa hệ thống cầu trục nhà xưởng 20 tấn như hình 2, hệ thống cầu trục này được sử dụng rất nhiều, thời gian sử dụng ở nhiều nơi khá thấp, nên có thể thực hiện các thực nghiệm sau khi tiến hành các mô phỏng tính toán dễ dàng hơn, các tham số của hệ thống cầu trục này như trong bảng I.

Bảng I: Các tham số cầu trục nhà xưởng 20 tấn

Tham số	Đơn vị tính	Giá trị
Tốc độ cực đại	m/s	0,01
Gia tốc cực đại	m/s <sup>2</sup>	0,02
Độ dài làm việc theo trục X	m	20
Độ dài làm việc theo trục Y	m	5
Độ dài dây	m	15
Khối lượng tải cực đại	Kg	20000
Khối lượng xe con	Kg	1300
Khối lượng ray chuyển động	Kg	2200

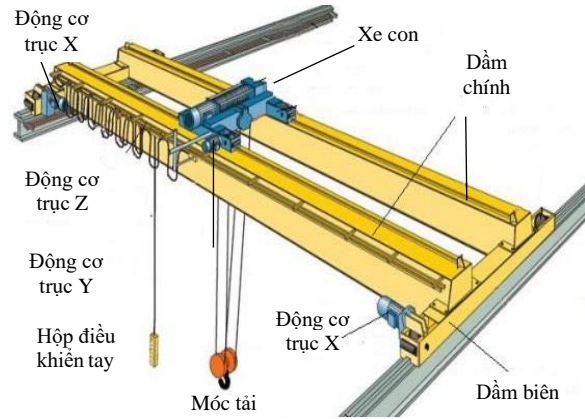
**II. MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG CẦU TRỤC THEO LỰC TRÊN TẢI TRỌNG**

Cầu trục nhà xưởng được truyền động ba trục như trên hình 3. Hai động cơ trục X truyền động để kéo toàn bộ hệ thống dầm chính có xe con nằm trên, chuyển động trên hai thanh ray đặt trên hai dầm sắt chữ I dọc theo xưởng. Động cơ trục Y truyền động kéo xe con chuyển động trên hai thanh ray đặt trên hai dầm chính. Và động cơ trục Z truyền động để kéo tải lên xuống bằng dây. Như vậy, tải trọng di chuyển có thể chuyển động theo ba chiều.

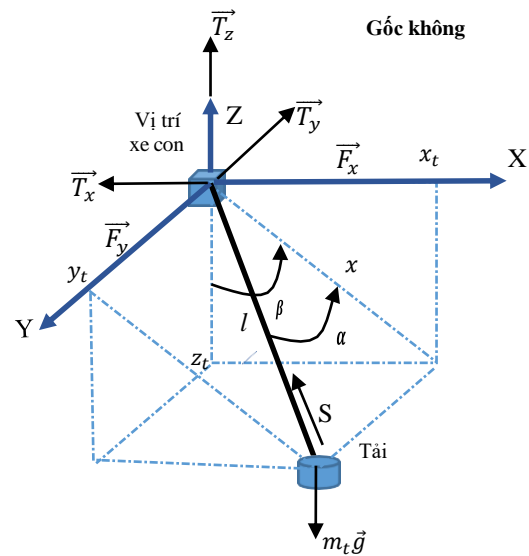
Với góc không đánh dấu theo góc trong bên phải của sơ đồ lực như trên hình 4. Các thông số cơ học của hệ thống như trong bảng II.

Bảng II: Các thông số cơ học của hệ thống cầu trục

Thông số	Ký hiệu
Khối lượng tải trọng cần di chuyển	$m_t$
Khối lượng xe con	$m_x$
Khối lượng của hệ thống dầm chính	$m_d$
Vị trí của tải trọng theo trục X	$x_t$
Vị trí của tải trọng theo trục Y	$y_t$
Vị trí của tải trọng theo trục Z	$z_t$
Vị trí của xe con theo trục X	$x_x$
Vị trí của xe con theo trục Y	$y_x$
Lực tác động di chuyển hệ thống theo trục X	$\vec{F}_x$
Lực tác động di chuyển hệ thống theo trục Y	$\vec{F}_y$
Chiều dài của dây kéo tải	$l$
Lực căng theo trục X	$\vec{T}_x$
Lực căng theo trục Y	$\vec{T}_y$
Phản lực tác động khi nâng tải	$S$



Hình 3. Truyền động cho cầu trục xưởng



Hình 4. Lực tác động trên hệ thống cầu trục

**Các phương trình vị trí tải:**

Theo hình 4 chúng ta có các quan hệ theo vị trí của tải trọng như sau:

$$\sin \beta = \frac{x_t}{x} \tag{1}$$

$$\sin \alpha = \frac{y_t}{l} \tag{2}$$

$$\cos \alpha = \frac{x}{l} \tag{3}$$

$$\cos \beta = \frac{z_t}{x} \tag{4}$$

Sử dụng các phương trình từ (1) đến (4) suy ra:

$$x_t = l \cos \alpha \sin \beta \tag{5}$$

$$y_t = l \sin \alpha \tag{6}$$

$$z_t = l \cos \alpha \cos \beta \tag{7}$$

Và theo các phương trình (5) đến (7) thì vị trí của tải

trong vùng làm việc sẽ là:

$$x_t = x_x + l \cos \alpha \sin \beta \quad (8)$$

$$y_t = y_x + l \sin \alpha \quad (9)$$

$$z_t = l \cos \alpha \cos \beta \quad (10)$$

### 1) Các phương trình động học:

Áp dụng định luật 2 Newton  $F = ma$  cho các phương chuyển động của vật sẽ được:

$$m_t \ddot{x}_t = S_x \quad (11)$$

$$m_t \ddot{y}_t = S_y \quad (12)$$

$$m_t \ddot{z}_t = -S_z - m_t g \quad (13)$$

$$(m_x + m_d) \ddot{x}_x = F_x - T_x + S_x \quad (14)$$

$$m_x \ddot{y}_x = F_y - T_y + S_y \quad (15)$$

Với các thành phần theo các trục của phân lực tải trọng  $S$  là:

$$S_x = S \sin \alpha \sin \beta \quad (16)$$

$$S_y = S \cos \alpha \quad (17)$$

$$S_z = S \sin \alpha \cos \beta \quad (18)$$

Gọi các lực tác động vào mỗi trục của hệ thống cầu trục là  $N_x, N_y, N_z$ . Cân bằng giữa lực tác động ngõ vào và phân lực trên tải trọng ngõ ra, thay vào các phương trình (16), (17), và (18), có thể viết lại các phương trình động học của hệ thống cầu trục như sau:

$$\ddot{x}_t = \frac{N_z \cos \alpha \sin \beta}{m_t} \quad (19)$$

$$\ddot{y}_t = \frac{N_z \sin \alpha}{m_t} \quad (20)$$

$$\ddot{z}_t = \frac{-N_z \cos \alpha \cos \beta}{m_t} \quad (21)$$

$$\ddot{x}_x = \frac{N_x + N_z \cos \alpha \sin \beta}{m_x + m_d} \quad (22)$$

$$\ddot{y}_x = \frac{N_y + N_z \sin \alpha}{m_x} \quad (23)$$

Như vậy, mô hình động học của hệ thống cầu trục được mô tả bằng hệ phương trình vi phân phi tuyến bậc 2 bao gồm các phương trình từ (19) đến (23).

### 2) Đơn giản hóa phương trình động học:

Để đơn giản hóa các phương trình động học mô tả hệ thống từ (19) đến (23), cần sử dụng các giả sử xấp xỉ có thể trong quá trình hoạt động. Khi tải nặng, tốc độ di chuyển không yêu cầu cao, và khả năng chống rung lắc khi di chuyển tốt, có thể giả sử độ lệch của tải trọng theo trục  $z$  nhỏ có thể bỏ qua. Trong thực tế, các hệ thống cầu trục thông thường sử dụng truyền động biến tần, cho phép hiệu chỉnh tốc độ khi bắt đầu và kết thúc chuyển động. Hoặc với các hệ thống cầu trục tự động có thể sử dụng các thuật toán chống rung lắc hiện đại [1] ~ [3], giả thiết này hoàn toàn có thể áp dụng. Mặt khác khi khả

năng chống rung lắc tốt, hoặc độ chính xác điều khiển vị trí tải trọng không yêu cầu cao có thể giả sử các góc  $\alpha$  và  $\beta$  rất nhỏ nên có thể bỏ qua. Với các giả thiết nêu trên có thể sử dụng các phép xấp xỉ lượng giác sau:

$$\cos \alpha \cong 1 \quad (24)$$

$$\sin \alpha \cong \alpha \quad (25)$$

$$\cos \beta \cong 1 \quad (26)$$

$$\sin \beta \cong \beta \quad (27)$$

Sử dụng các xấp xỉ này, thay vào các phương trình từ (19) đến (23), sẽ được mô hình động học của hệ thống cầu trục đơn giản hóa, với các lực tác động ngõ vào như sau:

$$\ddot{x}_t = \frac{N_z}{m_t} \beta \quad (28)$$

$$\ddot{y}_t = \frac{N_z}{m_t} \alpha \quad (29)$$

$$\ddot{z}_t = -\frac{N_z}{m_t} \quad (30)$$

$$\ddot{x}_x = \frac{N_x + N_z \beta}{(m_x + m_d)} \quad (31)$$

$$\ddot{y}_x = \frac{N_y + N_z \alpha}{m_x} \quad (32)$$

Như vậy với các giả thiết gần đúng, chúng ta có mô hình động học đơn giản cho hệ thống cầu trục. Mô hình này có thể hiệu chỉnh để cộng thêm các ảnh hưởng động học khác như: hệ số giảm chấn, hệ số nhớt, mô men quán tính do khối lượng của xe con, của dầm chính, ma sát chuyển động trên các trục, vãn vãn. Khi tính đến các hệ số này, việc tính toán điều khiển sẽ chính xác hơn, tuy nhiên các giải thuật điều khiển sẽ phức tạp cần các thiết bị điều khiển tính toán tốc độ cao, theo thời gian thực với giá thành cao, khó ứng dụng vào thực tế. Mặt khác, các giải thuật điều khiển có thể bù cho các thông số còn thiếu bằng cách tính toán theo các tín hiệu hồi tiếp, hoặc kể cả các thông số hoạt động không thể đo lường được trong thực tế, như với các giải thuật điều khiển thích nghi [5], [6].

Để kiểm tra tính hữu dụng của mô hình động học đã xây dựng, bước tiếp theo sẽ tiến hành các mô phỏng để kiểm tra hoạt động của mô hình động học đã xây dựng, theo các tác động lực ngõ vào và vị trí tải ở ngõ ra.

## MÔ PHỎNG MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC

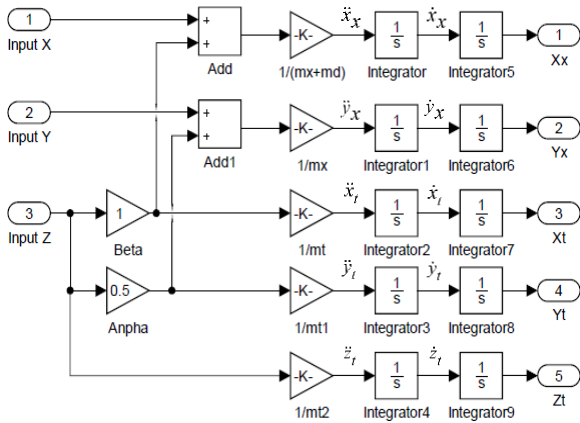
Do các hệ thống cầu trục thực có giá thành cao, thời gian sử dụng thường xuyên. Nên để việc nghiên cứu dễ dàng hơn, các thử nghiệm trong quá trình nghiên cứu được nhanh chóng, nhóm nghiên cứu dự kiến thực hiện một mô hình cầu trục thu nhỏ, sau khi mô hình hóa chạy mô phỏng, các kết quả sẽ được tiếp tục kiểm nghiệm lại trên mô hình thu nhỏ, để hiệu chỉnh và chạy các giải thuật điều khiển khác nhau, cuối cùng các giải thuật điều khiển tốt nhất sẽ thực hiện trên hệ thống cầu trục thực.

Như vậy, trước hết bài báo thực hiện việc mô hình hóa hệ thống mô hình cầu trục thu nhỏ dự kiến, với các tham số cho trong bảng III.

Bảng III: Các tham số mô hình cầu trục thu nhỏ dự kiến

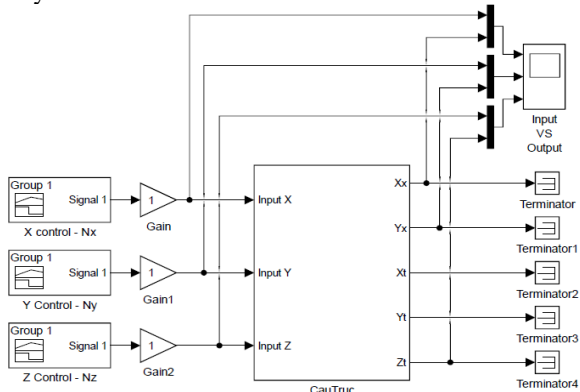
Tham số	Đơn vị tính	Giá trị
Tốc độ cực đại	m/s	0,3
Gia tốc cực đại	m/s <sup>2</sup>	0,6
Độ dài làm việc theo trục X	mm	920
Độ dài làm việc theo trục Y	mm	920
Độ dài dây	m	820
Khối lượng tải cực đại	Kg	1
Khối lượng xe con	Kg	1,16
Khối lượng ray chuyển động	Kg	2,2

Mô hình động học theo các phương trình từ (28) đến được thực hiện trên Simulink như trên hình 5. Các ngõ vào Input X, Y, Z tương ứng cấp tín hiệu điều khiển ngõ vào  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$ . Với các phương trình vi phân mô tả vị trí bậc 2, để có các vị trí tải và xe con ở ngõ ra, có thể lấy tích phân hai lần như trên hình 5.

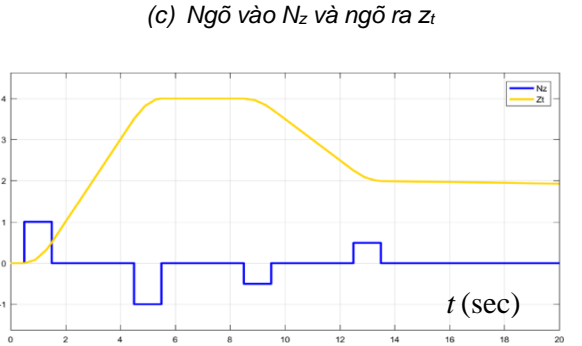
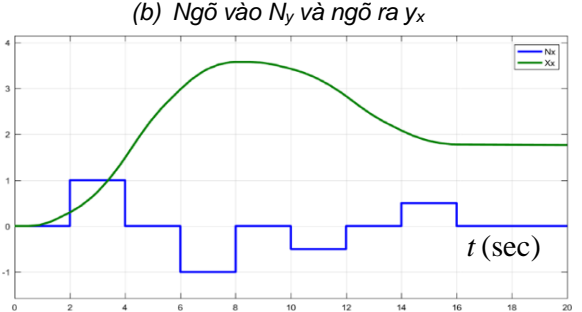
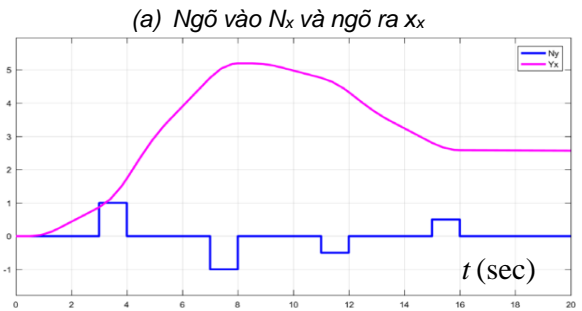


Hình 5. Sơ đồ khối mô hình động hệ thống cầu trục

Để cung cấp các tín hiệu lực điều khiển ngõ vào, chạy mô phỏng thử nghiệm mô hình, xem xét các đáp ứng ngõ ra, có thể thực hiện sơ đồ điều khiển như trên hình 6. Với hệ thống cầu trục được thực hiện bằng các phương trình động học trong hình 5. Các ngõ vào được cung cấp các tín hiệu điều khiển trong dải [-1,1]. Với lực tổng hợp trên cả ba trục ở ngõ vào, và độ lợi các ngõ vào bằng 1. Kết quả mô phỏng vị trí xe con và độ dài dây kéo tải như trên hình 7.



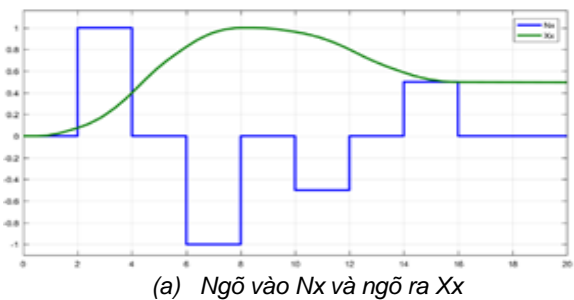
Hình 6. Sơ đồ khối mô phỏng mô hình động học hệ thống cầu trục



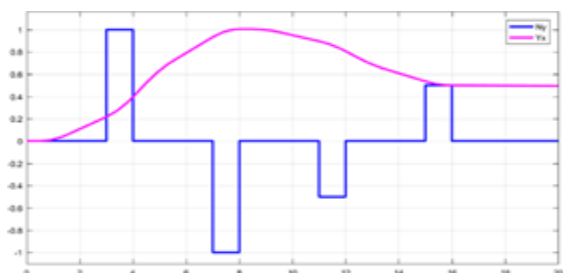
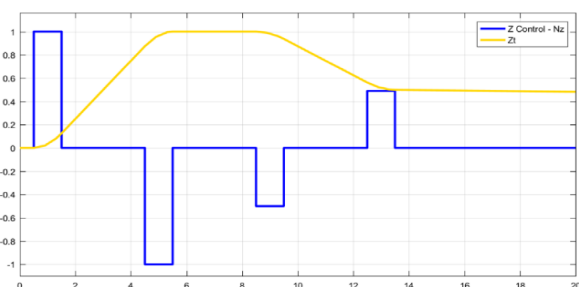
Hình 7. Kết quả mô phỏng mô hình với độ lợi ngõ vào bằng 1

Theo kết quả mô phỏng hình 7, có thể thấy với các lực tổng hợp theo các chiều ở ngõ vào, hệ thống có một vị trí xác định ở ngõ ra. Với việc điều khiển vòng hở, và bỏ qua nhiều thông số, cũng như có một số tham số là hằng số, nên vị trí ra mặc dù có xu hướng tiến theo các tác động ngõ vào, nhưng với sai lệch khá lớn. Các sai lệch này có thể giảm bớt bằng các giải thuật điều khiển vòng kín, cũng như tính toán chính xác thêm các tham số cho mô hình khi có yêu cầu độ chính xác điều khiển cao. Tuy nhiên, với việc chọn cách số khuếch đại ngõ vào thích hợp, vị trí ngõ ra của hệ thống theo ba trục sẽ chính xác hơn như trên hình 8.

Có thể thấy trên kết quả mô phỏng, tín hiệu vị trí ngõ ra của xe theo trục X và Y, tương ứng gần đúng với vị trí của tải trọng, và độ dài theo trục Z của tải trọng chạy đúng theo yêu cầu điều khiển ngõ vào, có nghĩa là theo lý thuyết mô hình có thể sử dụng được. Các sai số trong thực tế có thể hiệu chỉnh bằng các hệ số cộng thêm và các thuật toán điều khiển.



(a) Ngõ vào  $N_x$  và ngõ ra  $X_x$

(b) Ngõ vào  $N_y$  và ngõ ra  $Y_x$ (c) Ngõ vào  $N_z$  và ngõ ra  $Z_t$ Hình 8. Kết quả mô phỏng mô hình với độ lợi ngõ vào bằng  $X_0=0,3; Y_0=0,17; Z_0=1$ 

### III. MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG CẦU TRỤC THEO KHÔNG GIAN TRẠNG THÁI

Chúng ta có thể sử dụng mô hình không gian trạng thái để mô tả hệ thống cầu trục. Đây là phương pháp mô hình hóa cho các hệ thống điều khiển có mức độ phức tạp cao. Trước tiên, cần hiệu chỉnh mô hình động học theo lực của hệ thống trong phần trước, để tạo ra tập biến tuyến tính cho mô hình không gian trạng thái của hệ thống. Trước tiên ký hiệu chiều dài của tải theo trục  $Z$  là  $z_x$ . Sử dụng các xấp xỉ đã sử dụng trong phần trước, các phương trình vị trí tải (8), (9), (10) sẽ ở dạng:

$$\dot{x}_t = \dot{x}_x + z_x \dot{\beta} \quad (33)$$

$$\dot{y}_t = \dot{y}_x + z_x \dot{\alpha} \quad (34)$$

$$\dot{z}_t = -\dot{z}_x \quad (35)$$

Tốc độ chuyển động của tải trọng sẽ tính được bằng cách lấy đạo hàm các phương trình (33), (34), (35).

$$\dot{x}_t = \dot{x}_x + \dot{z}_x \beta + z_x \dot{\beta} \quad (36)$$

$$\dot{y}_t = \dot{y}_x + \dot{z}_x \alpha + z_x \dot{\alpha} \quad (37)$$

$$\dot{z}_t = -\dot{z}_x \quad (38)$$

Gia tốc chuyển động của tải trọng sẽ tính được bằng cách lấy đạo hàm bậc hai (33), (34), (35).

$$\ddot{x}_x + \ddot{z}_x \beta + 2\dot{z}_x \dot{\alpha} + z_x \ddot{\alpha} = \frac{N_z}{m_t} \beta \quad (42)$$

$$\ddot{y}_x + \ddot{z}_x \alpha + 2\dot{z}_x \dot{\alpha} + z_x \ddot{\alpha} = \frac{N_z}{m_t} \alpha \quad (43)$$

$$\ddot{z}_x = -\frac{N_z}{m_t} \quad (44)$$

$$\ddot{x}_x = \frac{N_x + N_z \beta}{(m_x + m_d)} \quad (45)$$

$$\ddot{y}_x = \frac{N_y + N_z \alpha}{m_x} \quad (46)$$

Tập hợp nhỏ nhất của các biến độc lập tuyến tính của hệ thống, sao cho giá trị của các phần tử trong tập hợp biến tại thời điểm  $t_0$ , cùng với các hàm cường bức đã biết, xác định hoàn toàn giá trị của các biến hệ thống tại thời điểm  $t \geq t_0$  được gọi là các biến trạng thái [5]. Tuyến tính hóa hệ thống phi tuyến bằng các biến trạng thái trong (47)-(56).

$$x_1 = x_x \quad (47)$$

$$x_2 = \dot{x}_x \quad (48)$$

$$x_3 = y_x \quad (49)$$

$$x_4 = \dot{y}_x \quad (50)$$

$$x_5 = \beta \quad (51)$$

$$x_6 = \dot{\beta} \quad (52)$$

$$x_7 = \alpha \quad (53)$$

$$x_8 = \dot{\alpha} \quad (54)$$

$$x_9 = z_x \quad (55)$$

$$x_{10} = \dot{z}_x \quad (56)$$

Một véc tơ bao gồm toàn bộ các phần tử là các biến trạng thái được gọi là véc tơ trạng thái [5]. Nó được biểu diễn bằng véc tơ. Các biến được đo bằng các encoder ở ngõ ra là véc tơ. Trong trường hợp này các biến biết  $x_x, y_x, z_x, \alpha, \beta$  là các biến chưa biết. Theo các phương trình (47) – (56) các thể đặt các hàm ngõ ra như sau:

$$y_1 = x_x = x_1 \quad (57)$$

$$y_2 = y_x = x_3 \quad (58)$$

$$y_3 = \beta = x_5 \quad (59)$$

$$y_4 = \alpha = x_7 \quad (60)$$

$$y_5 = z_x = x_9 \quad (61)$$

Các biến ngõ vào là các lực điều khiển  $N_x, N_y, N_z$  chúng tạo thành một véc tơ ngõ vào  $p \times 1: [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]^T$  với  $p$  là số ngõ vào. Một tập gồm  $n$  phương trình vi phân có  $n$  biến, trong đó  $n$  biến cần giải là các biến trạng thái được gọi là phương trình trạng thái [5]. Các vi phân trạng thái được tính trong các phương trình (42) – (46). Hệ phương trình trạng thái đơn giản hóa cho hệ thống cầu trục sẽ như sau:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_x = x_2 \quad (62)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{x}_x = \frac{N_x + N_z x_5}{(m_x + m_d)} \quad (63)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{y}_x = x_4 \quad (64)$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{y}_x = \frac{N_y + N_z x_7}{m_x} \quad (65)$$

$$\dot{x}_5 = \dot{\beta} = x_6 \quad (66)$$

$$\dot{x}_6 = \ddot{\beta} = \frac{2 \frac{N_z}{m_t} x_5 - \frac{N_x + N_z x_5}{m_x + m_d} - 2x_{10} x_6}{x_9} \quad (67)$$

$$\dot{x}_7 = \dot{\alpha} = x_8 \quad (68)$$

$$\dot{x}_8 = \ddot{\alpha} = \frac{2 \frac{N_z}{m_t} x_7 - \frac{N_y + N_z x_7}{m_x} - 2x_{10} x_8}{x_9} \quad (69)$$

$$\dot{x}_9 = \dot{z}_x = x_{10} \quad (70)$$

$$\dot{x}_{10} = \ddot{z}_x = -\frac{N_z}{m_t} \quad (71)$$

Để biểu diễn hệ thống bằng hệ phương trình trạng thái chuẩn cần tìm các ma trận trạng thái A, B, C, D. Các thành phần của các ma trận trạng thái được biểu diễn bằng các phương trình (72)-(75).

$$a_{ij} = \frac{\delta \dot{x}_i}{\delta x_j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (72)$$

$$b_{ij} = \frac{\delta \dot{x}_i}{\delta u_j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (73)$$

$$c_{ij} = \frac{\delta y_i}{\delta x_j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (74)$$

$$d_{ij} = \frac{\delta y_i}{\delta u_j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (75)$$

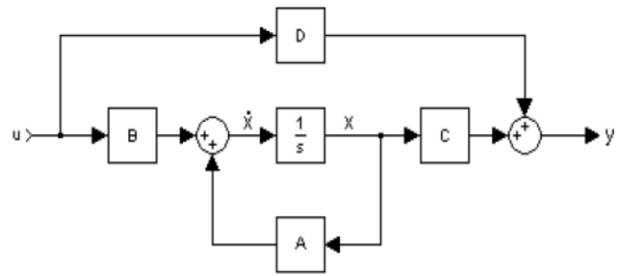
Tất cả các phương trình vi phân cho các thành phần của các ma trận trạng thái đều có thể tính toán được. Tuy nhiên, các ma trận A, B, C, D cần thỏa mãn điểm ổn định

$$x^0 = [x^0 \dot{x}^0 y^0 \dot{y}^0 \beta^0 \dot{\beta}^0 \alpha^0 \dot{\alpha}^0 l^0 \dot{l}^0]^T = [0000000000]^T,$$

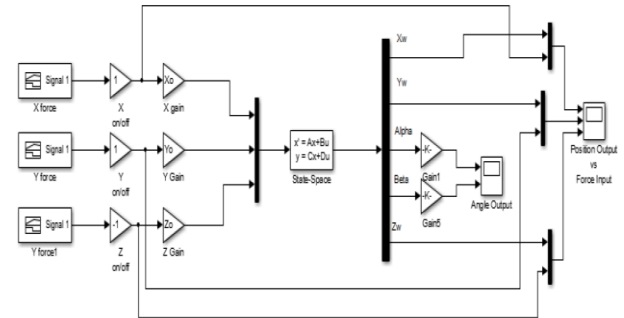
và ngõ vào, do tất cả các đạo hàm của các biến trạng thái, các biến đo lường và các lực tác động cần bằng không, khi tải trọng chuyển động tới vị trí điều khiển.

### MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TRONG KHÔNG GIAN TRẠNG THÁI

Để mô phỏng mô hình không gian trạng thái, chúng ta thay thế các ma trận của mô hình cầu trục và mô hình không gian trạng thái chuẩn của một hệ thống bất kỳ như trên hình 9. Và theo các phương trình đã xây dựng chúng ta có mô hình biểu diễn không gian trạng thái của hệ thống cầu trục trong Simulink như hình 10.

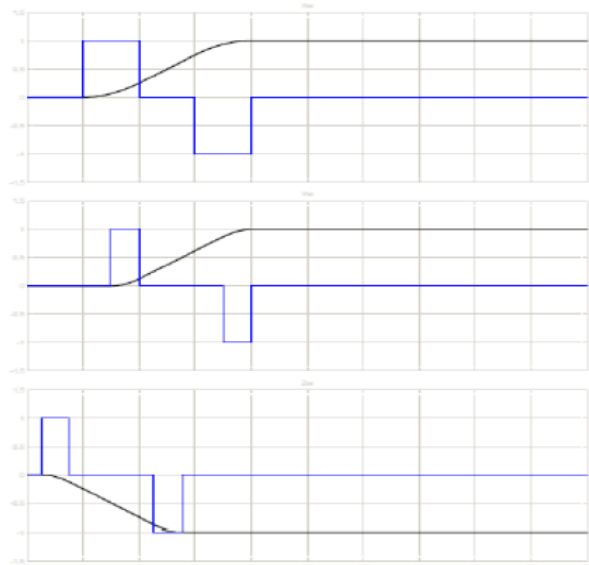


Hình 9. Mô hình biểu diễn không gian trạng thái

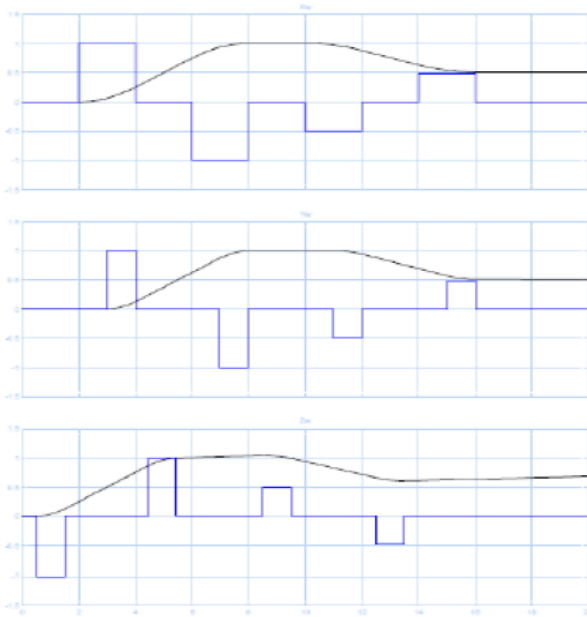


Hình 10. Mô hình không gian trạng thái mô phỏng hệ thống cầu trục trong Simulink

Với các lực ngõ vào mô tả trong phần mô hình động ở trên, với độ lợi áp dụng cho lực tác động mỗi trục, có thể mô phỏng hệ thống với sơ đồ khối như hình 10. Với một giá trị ngõ ra chúng ta cần thiết lập tập biến như trong (57) – (61). Hai loại lực tác động ngõ vào cho các ngõ ra như trên hình 11. Đường xung vuông là xung lực tác động ngõ vào, và đường còn lại biểu diễn vị trí tải trọng ở ngõ ra. Hình 11 (a) biểu diễn ngõ ra với các xung lực đơn ngõ vào, có thể thấy rằng mô hình cho phép hệ thống đạt được vị trí mong muốn trên cả 3 trục chuyển động. Do trục Z chuyển động ngược với chiều biểu diễn trong mô hình lực nên ngõ vào được nhân với -1. Hình 11(b) mô tả ngõ ra với xung lực kép ở ngõ vào. Tức là tải trọng được điều khiển tới hai vị trí khác nhau, có thể thấy kết quả mô phỏng giống với kết quả mô hình động học đơn giản trong phần trước.



(a) Lực đơn ngõ vào



(b) Lực kép tác động ngõ vào

Hình 11. Mô phỏng mô hình hệ thống cầu trục trong không gian trạng

#### IV. KẾT LUẬN

Bài báo thực hiện việc xây dựng mô hình toán học của hệ thống cầu trục với chuyển động của tải theo ba trục bằng các áp dụng định luật 2 Newton cho chuyển động của tải trọng. Mặc dù đây là một hệ thống phi tuyến bậc cao, nhưng các phương trình lượng giác xấp xỉ cũng có thể sử dụng để xây dựng mô hình đơn giản cho hệ thống. Mô hình toán học của hệ thống là phi tuyến với các phương trình vi phân bậc 2, sau khi thực hiện các xấp xỉ để tăng độ ổn định cho hệ thống trong quá trình mô phỏng đã thêm độ lợi cho lực tác động trên mỗi trục.

Tiếp theo đề tài thực hiện việc mô hình hóa hệ thống trong không gian trạng thái, các phương trình vi phân trong phần trước được sử dụng để xây dựng mô hình không gian trạng thái cho hệ thống với 10 biến trạng thái 3 ngõ vào và 5 ngõ ra. Kết quả mô phỏng trong hình 11 cho thấy mô hình xây dựng có thể sử dụng được trong việc điều khiển hệ thống cầu trục.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT) cơ sở tại Thành Phố Hồ Chí Minh trong đề tài có mã số 01-HV-2022- RD\_ĐT2.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Gyoung-Hahn Kim, Phuong-Tung Pham, Quang Hieu Ngo, and Quoc Chi Nguyen: "Neural Network-based Robust Anti-sway Control of an Industrial Crane Subjected to Hoisting Dynamics and Uncertain Hydrodynamic Forces". International Journal of Control, Automation and Systems 19(X), pp.1-9, (2021)
- [1] Yubin Miao, Fenglin Xu, Yanwei Hu, Jianping An and Ming Zhang: "Anti-swing control of the overhead crane system based on the harmony search radial basis function neural network algorithm". Advances in Mechanical Engineering Vol. 11(3), pp. 1–10 (2019).
- [2] Phuong-Tung Pham; Gyoung-Hahn Kim; Keum-Shik

Hong: "Boundary Control of an Overhead Crane Hoisting System with Flexible Rope in the Presence of Input Saturation". International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) 20<sup>th</sup>, (2020).

- [3] Đặng Việt Phương Nam, Ngô Văn Thuỳ: Nhận dạng và giám dao động cầu trục sử dụng mạng nơ ron nhân tạo. Tạp chí khoa học giáo dục kỹ thuật **22**, pp. 62-88 (2012)
- [4] John Wiley & Sons, Inc., Nise, N. S. Control Systems Engineering: Sixth Edition International Student Version. – Pomona: California State Polytechnic University, 2011. – 968 p.
- [5] Phạm Thế Duy, Nguyễn Huy Hùng: Thiết kế bộ điều khiển tốc độ bằng tải sử dụng điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu hiệu chỉnh và toán tử tham chiếu có nhiều biên độ giới hạn, Tạp chí khoa học thông tin và truyền thông **23**(7), pp. 798-804 (2019).
- [6] Nguyễn Quốc Chí, Nguyễn Hùng, Điều khiển thích nghi cho cụm quần liểu trong hệ thống vận chuyển vật liệu mềm. Science and technology development Vol 18, 35-42 (2015)

#### MODELING OVERHEAD CRANE SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF LOAD POSITION

**Abstract:** This paper presents a method to model the system of controlling the position of the load for the overhead crane, serving the automation of the overhead crane system in practice. Since the control of overhead crane systems for different applications in practice will require different control accuracy, for systems requiring low accuracy, a simple dynamic model can be used. Therefore, in this paper, the modeling of the overhead crane system is carried out according to the following steps: First of all, the model of the moving position of the trolley, the girder system and the length of lifting and lowering the load is performed, with the equations of three axes of motion according to Newton's 2nd law. Next, approximate approximations are made to simplify the dynamic equations of the system. To check the necessary accuracy of the dynamic equations, the article simulates the operation of the mathematical model, according to the parameters of the miniature overhead crane system. And correct the input gain of the forces acting along the axes to demonstrate the usability of the built mathematical model.



**Phạm Thế Duy**

Nhận học vị Thạc sĩ năm 1998

Hiện công tác tại Học viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn thông Cơ Sở tại TP. Hồ Chí Minh

Lĩnh vực nghiên cứu: Hệ thống nhúng, Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa.