Điều khiển chống rung cho cơ cấu vận chuyển chất lỏng sử dụng phương pháp Hybrid Shape

Sloshing suppression control of rectangle liquid container transfer using Hybrid Shape Approach

Đào Quý Thịnh, Đinh Văn Nam, Dương Minh Đức
Trường ĐHBK Hà Nội
e-Mail: thinh.daoquy@hust.edu.vn, dinhnambk@gmail.com, duc.duongminh@hust.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo này trình bày phương pháp Hybrid Shape làm giảm rung động trong quá trình vận chuyển chất lỏng. Trong phương pháp này bộ điều khiển được thiết kế trong cả miền tần số và miền thời gian. Ngoài việc giảm rung động của bề mặt chất lỏng thì bộ điều khiển vẫn phải đảm bảo tốc độ di chuyển nhanh và dừng chính xác theo yêu cầu công nghệ. Hệ thống được kiểm nghiệm bằng mô hình thực nghiệm sử dụng PLC của hãng Rockwell Automation.

Từ khóa: Chống rung, vận chuyển chất lỏng, điều khiển tối ưu, điều khiển bền vững, Hybrid Shape.

Abstract: This paper is concerned with the advanced control of liquid container transfer, with special consideration given to the suppression of sloshing while maintaining a high speed of transfer for the container, and accuracy of position. The controller is design by the Hybrid Shape approach, which consider both time and frequency characteristics. The effectiveness of the proposed control system is shown through experiments using Rockwell Automation PLC.

Keywords: Sloshing suppression, liquid container transfer, optimization methods, robustness, Hybrid Shape.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
J		hàm mục tiêu
$G_{servo}(s)$		hàm truyền đạt của động cơ AC servo
K_m	m/sV	Hệ số tỷ lệ động cơ servo
T_m	s	Hằng số thời gian của động cơ servo
$G_{slosh(s)}$		Hàm truyền đạt của rung động
ω_n	rad/s	Tần số tự nhiên của dao động
g	m/s^2	Gia tốc trọng trường
h	m	Chiều cao mức chất lỏng
a	m	Kích thước đáy bình chất lỏng
K_p	m/sV	Hệ số khuếch đại bộ điều khiển PID
T_l	s	Hằng số thời gian bộ lọc thông thấp
z		Hệ số bộ lọc Notch
K		Bộ điều khiển Hybrid Shape
K_i		Thành phần thứ i của bộ điều khiển Hybrid Shape
w_i		Hàm phạt ứng với tiêu chuẩn thứ i
r_k		Nghiệm của đặc tính tần số bộ điều khiển Hybrid Shape
r_{cl}		Nghiệm của đặc tính tần số hệ thống
u	[V]	Tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển
O_S	[%]	Độ quá điều chỉnh
e	[m]	Sai lệch tĩnh
T_s	[s]	Thời gian xác lập
fmincon		Công cụ giải bài toán tối ưu fmincon của Matlab

Chữ viết tắt

PLC	Programmable Logic Controller
SIMO	Single Input – Multi Output
PID	Proportional Intergral Derivation
IMC	Internal Model Controller

1. Giới thiệu

Trong công nghệ đúc tự động, thông thường hệ thống khuôn đúc sẽ chạy liên tục và dừng ở vị trí cố định, tại đó cơ cấu rót sẽ đổ đầy kim loại lỏng vào khuôn, sau đó hệ thống khuôn lại tiếp tục chạy. Tuy nhiên như vậy thì năng suất sản xuất sẽ không cao do có thời gian nghỉ của hệ thống khuôn để đảm bảo việc rót chất lỏng vào khuôn chính xác.

Để nâng cao năng suất sản xuất,ta phải điều khiển sao cho hệ thống khuôn sẽ chạy liên tục, còn hệ thống rót sẽ chạy đồng tốc với hệ thống khuôn khi đổ kim loại lỏng, sau đó sẽ tăng tốc tới vị trí tiếp theo như hình H.1. Tuy nhiên với hệ thống như vậy, cơ cấu rót di chuyển với tốc độ rất cao giữa hai lần rót sẽ gây ra rung động rất lớn trên bề mặt kim loại lỏng, thậm chí chàn ra ngoài làm tổn hao kim loại, gây nguy hiểm cho người và thiết bị. Do vậy việc điều khiển để vừa hạn chế việc rung động bề mặt chất lỏng khi di chuyển, vừa đảm bảo tốc độ di chuyển cao và bám vị trí là vô cùng quan trọng. Mặt khác, sau mỗi lần rót mức chất lỏng trong cơ cấu rót cũng giảm dần theo thời gian, dẫn tới tham số của đối tượng điều khiển

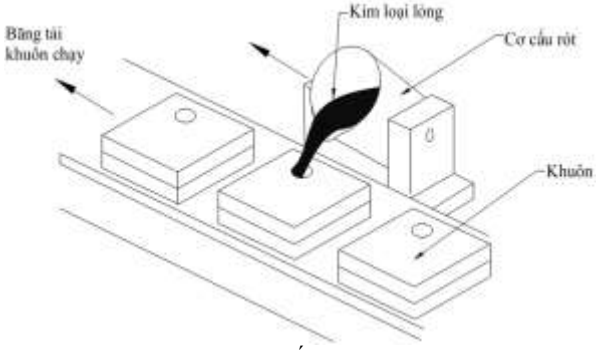
thay đổi. Bộ điều khiển được thiết kế phải đảm bảo tính bền vững với sự thay đổi này.

Trên thế giới đã có nhiều tác giả nghiên cứu vấn đề hạn chế rung động nói chung và giảm rung động bề mặt chất lỏng cho cơ cấu vận chuyển chất lỏng nói riêng. Y.Noda [1] đã sử dụng một bộ lọc có hệ số khuếch đại thay đổi tùy thuộc vào vị trí của cơ cấu rót trong quá trình di chuyển của cơ cấu. K.Yano [2] nghiên cứu phương pháp Hybrid Shape để chống rung cho cơ cấu di chuyển chất lỏng hình trụ trong không gian. Bộ điều khiển được thiết kế trong cả miền thời gian và miền tần số thông qua giải bài toán tối ưu bằng phương pháp đơn hình Simplex. M. Grundelius [5] nghiên cứu các phương pháp chống rung kết hợp với việc giải các bài toán tối ưu như tối ưu thời gian, tối ưu năng lượng, … Một số phương pháp khác như sử dụng bộ quan sát trượt [6], điều khiển theo mô hình dự báo [7], điều khiển phản hồi trạng thái [8], cũng được áp dụng cho điều khiển giảm rung động cho cơ cấu di chuyển chất lỏng.

Trong nước cũng đã có một số tác giả nghiên cứu các phương pháp chống rung cho các ứng dụng trong công nghiệp. Minh Duc Duong [9] đã sử dụng phương pháp tạo dạng điện áp đầu vào để triệt tiêu dao động.

Trong bài báo này trình bày phương pháp giảm dao động của bề mặt chất lỏng khi di chuyển bằng phương pháp Hybrid Shape, đặc biệt thiết bị điều khiển là PLC một thiết bị phổ biến trong công nghiệp nhằm tiến tới ứng dụng phương pháp trong thực tế sản xuất, các nội dung cụ thể như sau:

- Sơ đồ cấu trúc mô hình thực nghiệm và mô hình toán học các đối tượng trong mô hình như mô hình rung động, mô hình động cơ trục vít, sẽ được trình bày trong phần 2.
- Tính toán thiết kế bộ điều khiển theo phương pháp Hybrid Shape. Đưa ra các điều kiện ràng buộc và giải bài toán tối ưu để tìm các thông số của bộ điều khiển sẽ được trình bày trong phần 3.
- Cuối cùng các kết quả mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink cũng như kết qủa của mô hình thực nghiệm sẽ được trình bày trong phần 4.

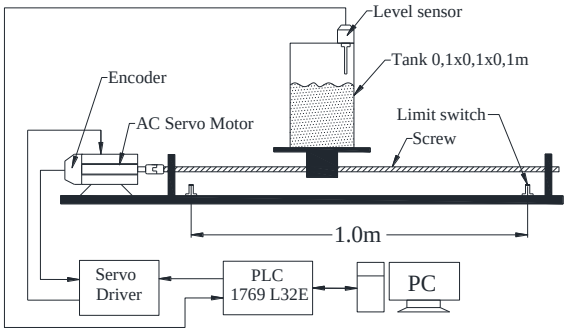


H. 1 *Hệ thống khuôn đúc*

2. Xây dựng mô hình thực nghiệm

2.1 Sơ đồ nguyên lý.

Sơ đồ nguyên lý của mô hình thực nghiệm được trình bày như trong hình H.2:



H. 2 *Sơ đồ nguyên lý mô hình thực nghiệm*

Các thiết bị chính trong mô hình như sau:

- Bình chứa chất lỏng có kích thước a x a x h là 0,1[m] x 0,1[m] x 0,1[m].
- Bình chứa chỉ di chuyển thẳng sử dụng trục vít vô tận độ dài 1 [m], đường kính 0,03 [m], bước ren 0,01 [m/vòng].
- Hệ truyền động động cơ AC Servo R88D-UA của Omron.
- Bộ điều khiển sử dụng PLC của Rockwell Automation, CPU 1769 L32E.

Thiết bị đo mức chất lỏng bằng sóng siêu âm được gắn ở cạnh bình chứa (nơi có rung động lớn nhất) để giám sát rung động của chất lỏng.

Do kim loại lỏng có độ nhớt tương tự nước, ví dụ độ nhớt động học của kim loại lỏng ở 1350^0K và 1400^0K tương ứng là $1{,}365\text{x}10^{-6}$[mPa.s] và $1{,}237\text{x}10^{-6}$[mPa.s], còn độ nhớt động học của nước tại 293^0K là $1{,}237\text{x}10^{-6}$[mPa.s] [2], nên trong mô hình này ta sử dụng nước thay cho kim loại lỏng làm đối tượng nghiên cứu.

2.2 Mô hình hóa đối tượng

Hàm truyền của động cơ AC servo là khâu tích phân quán tính bậc nhất có trễ như công thức (1):

$$G_{servo}(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \qquad (1)$$

Trong đó: K_m, T_m lần lượt là hệ số tỷ lệ, hằng số thời gian của động cơ servo. Thông qua việc nhận dạng bằng đáp ứng bước nhảy ta thu được K_m = 0,025 [m/sV] và T_m = 0,022 [s].

Hàm truyền của rung động của bề mặt chất lỏng phụ thuộc vào gia tốc động cơ được biểu diễn như công thức (2), là một khâu dao động bậc 2 [4]:

$$G_{slosh}(s) = \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i w_{ni}^2}{s^2 + 2w_{ni}z_i s + w_{ni}^2} \qquad (2)$$

Trong đó:

ω_n: là tần số dao động tự nhiên của đối tượng

ζ: là hệ số tắt dần

K: là hệ số khuếch đại của dao động.

Và để cho đơn giản, trong phạm vi bài báo này ta chỉ xét tới thành phần bậc 1 của dao động. Đối với bình chứa hình trụ, kích thước đáy là a[m] x a[m], chiều cao cột nước là h[m], thì tần số dao động tự nhiên bậc 1 được xác định bởi công thức (3) [4]:

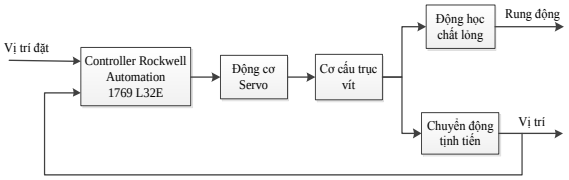
$$w_n = \sqrt{\frac{gp}{a}\tanh\frac{hp}{a}} \qquad (3)$$

Với thông số bình chất lỏng trong mô hình a = 0,1[m], h = 0,1 [m] và g = 9,81 [m/s^2] ta có ω_n = 17,51 [rad/s].

3. Thiết kế bộ điều khiển

3.1 Lựa chọn bộ điều khiển

Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điều khiển cho cơ cấu di chuyển được trình bày trong hình H.1



H. 3 *Cấu trúc của hệ thống điều khiển*

Đối tượng điều khiển ở đây là hệ SIMO, chỉ có 1 đầu vào và 2 đầu ra, do đó với cấu trúc điều khiển phản hồi thông thường chỉ có thể ổn định 1 trong 2 đầu ra là rung động hoặc vị trí. Để giải quyết vấn đề trên phương pháp Hybrid Shape [2] điều khiển vị trí bám theo vị trí đặt, đồng thời bổ sung thêm các bộ lọc kèm các điều kiện tối ưu để giới hạn độ dao động trong phạm vi cho phép mà không cần phải phản hồi độ dao động của chất lỏng.

Cụ thể bộ điều khiển của hệ thống gồm các thành phần như trong công thức (4):

$$K(s) = \sum_{i=1}^{3} K_i(s) \qquad (4)$$

Trong đó K_1 là thành phần điều khiển vị trí. Theo công thức (1) thì đối tượng vị trí có chứa thành phần tích phân nên K_1 được lựa chọn là bộ điều khiển tỷ lệ.

$$K_1(s) = K_p \qquad (5)$$

Để loại bỏ thành phần rung động bậc cao cũng như các thành phần nhiễu bậc cao khác, bộ điều khiển sẽ được bổ sung thêm một bộ lọc thông thấp $K_2(s)$

$$K_2(s) = \frac{1}{T_l s + 1} \qquad (6)$$

Thành phần cuối cùng $K_3(s)$ của bộ điều khiển là một bộ lọc Notch có tần số bằng với tần số dao động tự nhiên bậc 1 của rung động bề mặt chất lỏng trong công thức (7):

$$G(s) = \frac{s^2 + 2w_n x s + w_n^2}{s^2 + w_n x s + w_n^2} \qquad (7)$$

Như vậy, hàm truyền của bộ điều khiển được biểu diễn như công thức (8).

$$K(s) = \sum_{i=1}^{3} K_i(s) = \frac{K_p(s^2 + 2x w_n s + w_n^2)}{(T_l s + 1)(s^2 + w_n s + w_n^2)} \qquad (8)$$

Trong đó các hệ số K_p, T_l là các thông số cần xác định. Và như đã đề cập ở phần trên, hai tham số này sẽ được xác định thông qua giải bài toán tối ưu các điều kiện ràng buộc

3.2 Tính toán bộ điều khiển

3.2.1. Các điều kiện ràng buộc

Trong phương pháp Hybrid Shape [2] đưa ra rất nhiều tiêu chuẩn điều khiển trong cả miền thời gian và miền tần số. Các điều kiện này được xây dựng bằng cách sử dụng các hàm phạt, các hàm phạt được đưa ra dựa vào các tiêu chuẩn từ (I) đến (IV) sau đây.

- Tiêu chuẩn (I): Bộ điều khiển và hệ thống kín phải ổn định. Do đó hàm phạt sẽ được đưa ra nếu điều kiện sau đây bị vi phạm

$$\begin{aligned} &\mathrm{Re}[r_K] < 0,\ \mathrm{Re}[r_{cl}] < 0 \\ &K_P > 0,\ T_l > 0 \end{aligned} \qquad (9)$$

Trong đó r_K và r_{cl} lần lượt là nghiệm của đặc tính tần số của bộ điều khiển và hệ thống kín.

- Tiêu chuẩn (II): Hệ số tỷ lệ của bộ điều khiển phải nhỏ hơn 0 [dB] tại các tần số ω_l = 314 [rad/s] và ω_n = 17,55 [rad/s] để giảm ảnh hưởng của các rung động tần số cao cũng như dập dao động tại tần số tự nhiên. Do đó hàm phạt được đưa ra khi điều kiện sau đây bị vi phạm

$$|K(\omega_l)| < 0 \text{ [dB]} \qquad (10)$$

$$|K(\omega_n)| < 0 \text{ [dB]} \qquad (11)$$

- Tiêu chuẩn (III): Giới hạn tín hiệu điều khiển u từ PLC ra bộ điều khiển Servo không vượt quá 10[V]

$$\mathrm{Max}[u] \le 10 \text{ [V]} \qquad (12)$$

- Tiêu chuẩn (IV): Phải đảm bảo vị trí dừng chính xác hay sai lệch của vị trí không vượt quá 10^{-2}[m]

$$\mathrm{Max}\,[O_s] \le 10^{-2}\text{[m]} \qquad (13)$$

3.2.2. Hàm mục tiêu

Dựa vào các điều kiện ở các công thức từ (9) đến (13) như trên ta đưa ra hàm tối ưu:

$$\min_{K(s)} \quad J = T_s + J_p \qquad (14)$$

Trong đó:

$$J_p = \sum_{i=1}^{4} w_i \qquad (15)$$

$$T_s = \min\{t \,\|\, y_f - y(t)| < y_e\} \qquad (16)$$

ω_n là hàm phạt tương ứng với tiêu chuẩn thứ i nhận giá trị là 10^6 nếu tiêu chuẩn bị vi phạm.

y_f là vị trí đặt

y_e là sai lệch cho phép giữa vị trí đặt và vị trí thực.

Mục tiêu đặt ra là phải tối thiểu hóa T_s để cơ cấu rót có thể bám nhanh nhất với sự di chuyển của hệ thống khuôn đúc.

3.2.3. Giải bài toán tối ưu

Với các điều kiện ràng buộc và hàm tối ưu như trên ta sử dụng công cụ giải bài toán tối ưu fmincon của phần mềm Matlab/Simulink.

Với thông số đầu vào : y_f = 0,5 [m], y_e = 10^{-2}[m] ta thu được kết quả:

- Các tham số xác định được như sau:

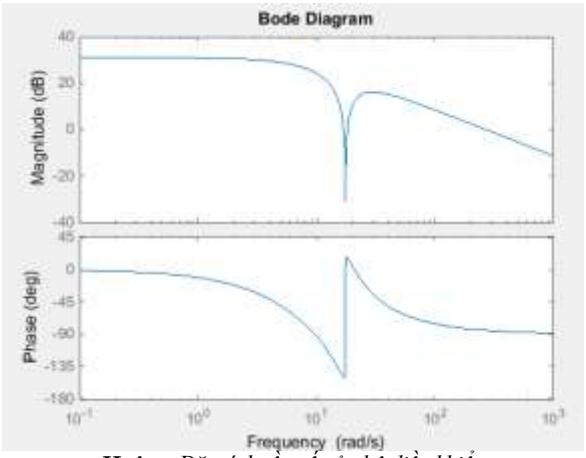
  K_p = 35

  T_l = 0,13 [s]

  T_s = 2,209 [s]

- Đặc tính tần số của bộ điều khiển:

Đặc tính tần số của bộ điều khiển thu được như hình H.4. Hệ số khuếch đại của bộ điều khiển < 0 [dB] tại tần số dao động tự nhiên 17,51 [rad/s] và các tần số >100 [rad/s] đảm bảo làm giảm rung động cũng như giảm ảnh hưởng của nhiễu và các dao động bậc cao.

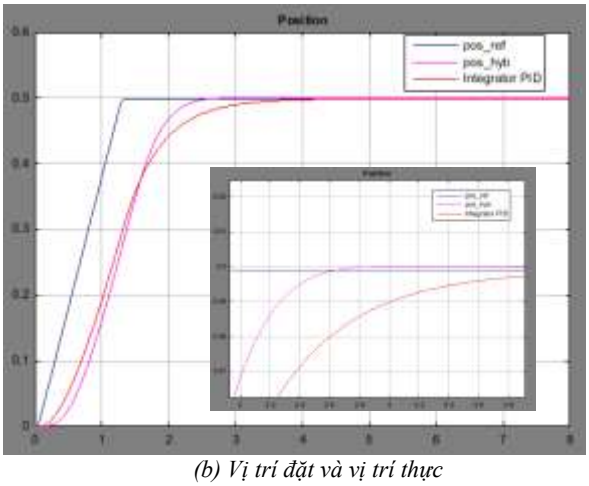


H. 4 *Đặc tính tần số của bộ điều khiển*

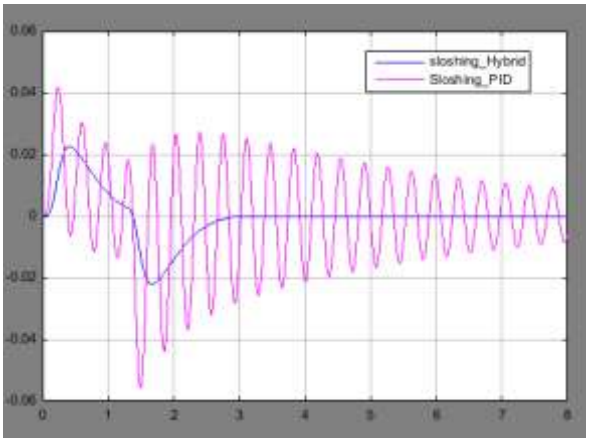
4. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

4.1 Kết quả mô phỏng

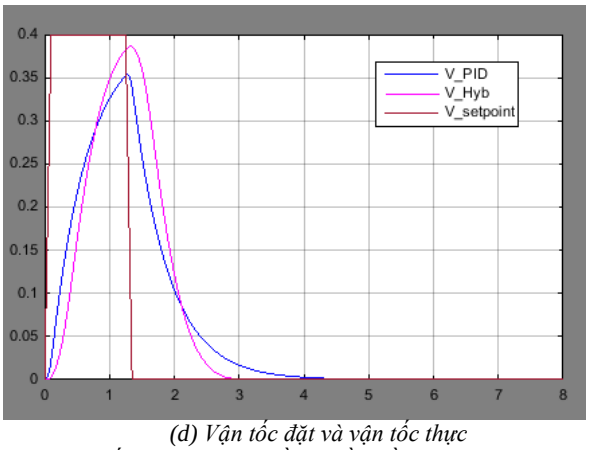
Với các thông số mô hình và bộ điều khiển như trên ta tiến hành mô phỏng sử dụng phần mềm Matlab/Simulink. Và để đánh giá hiệu quả giảm rung động của bộ điều khiển Hybrid Shape ta tiến hành so sánh với phương pháp dùng bộ điều khiển PID (được tổng hợp theo tiêu chuẩn mô hình nội IMC). Quỹ đạo đặt theo dạng 2-1-2, với khoảng thời gian gia tốc, giảm tốc là 0,1 [s]; tổng quãng đường là 0,5 [m]. Kết quả mô phỏng được trình bày trong hình H.5.



(b) Vị trí đặt và vị trí thực



(c) Độ rung



(d) Vận tốc đặt và vận tốc thực

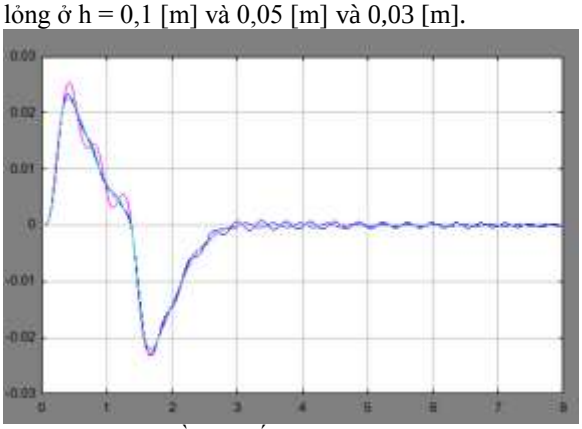
H. 5 *Kết quả mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink*

Bảng B.1 so sánh kết quả kết quả mô phỏng ta nhận thấy cả hai phương pháp PID và Hybrid Shape đáp ứng vị trí đều bám với lượng đặt, tuy nhiên độ rung của phương pháp PID (≈0,04 [m]) lớn hơn nhiều so với phương pháp Hybrid Shape (≈0,02 [m]):

Tiêu chí		PID	Hybrid Shape
Vị trí	Os [%]	0	0
	Error [m]	<0,01	<0,01
	Ts [s]	3,0	2,2
Độ rung	Biên độ [m]	≈0,04	≈0,02
	Số lần dao động	Lớn	2

B.1. *Bảng so sánh kết quả mô phỏng theo phương pháp Hybrid Shape và PID*

Để xét tính bền vững của hệ thống ta tiến hành thay đổi tham số của đối tượng với giả thiết mỗi lần chiết rót mức chất lỏng trong bình giảm đi Δa = 0,01 [m]. Hình H.6 là kết quả mô phỏng độ rung của mức chất lỏng ở h = 0,1 [m] và 0,05 [m] và 0,03 [m].



H. 6 *Độ rung bề mặt chất lỏng tại h = 0,1; 0,05 và 0,03 [m]*

Nhìn vào kết quả ta nhận thấy khi mức nước thay đổi thì độ rung của bề mặt chất lỏng thay đổi không đáng kể. Điều này là hợp lý vì theo hình H.4 hệ số khuếch đại của bộ điều khiển < 0 tại một dải tần số khá rộng xung quanh tần số dao động tự nhiên.

4.2 Kết quả thực nghiệm

Sau khi tiến hành mô phỏng cho kết quả hợp lý, ta triển khai xây dựng mô hình thực nghiệm với cấu trúc đã nêu trong phần 2. Mô hình được triển khai tại phòng thí nghiệm Rockwell Automation, trường Đại

học Bách Khoa Hà Nội, hình ảnh thực tế của mô hình được trình bày trong hình H.7

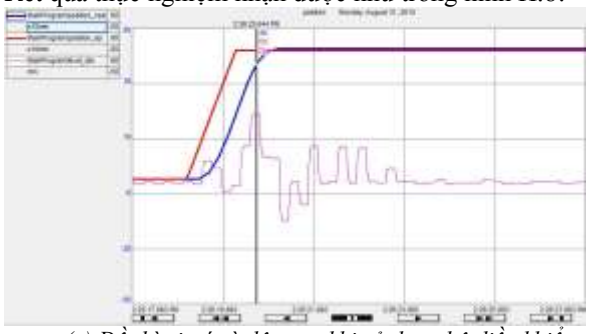
H. 7 *Hình ảnh thực tế của mô hình thực nghiệm*

Cũng tương tự như quá trình mô phỏng ở phần 4.1, ta tiến hành thực nghiệm với cả hai bộ điều khiển P và bộ điều khiển Hybrid Shape với quỹ đạo đặt dạng 2-1-2, với tổng chiều dài quãng đường là 0,5 [m]. Các thông số thực nghiệm cụ thể như sau:

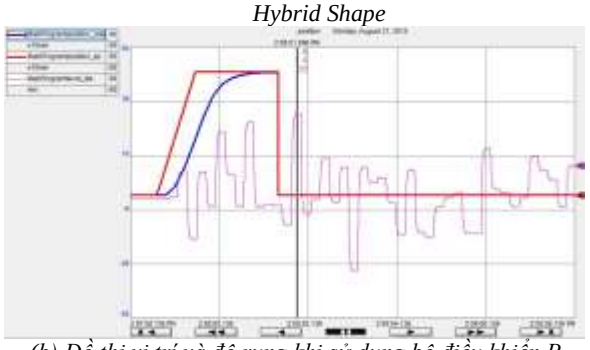
TT	Thông số cài đặt	Giá trị	Đơn vị
1	Bước ren trục vít	0,01	m
2	Thời gian gia tốc động cơ	0,1	s
3	Thời gian giảm tốc động cơ	0,2	s
4	Tỷ lệ tốc độ động cơ/điện áp đầu vào	300	vòng/phútV
5	Gia tốc tối đa	4	m/s^2
6	Chu kỳ quét của PLC	2	ms

B.2 *Thông số cài đặt khi chạy thực nghiệm*

Kết quả thực nghiệm nhận được như trong hình H.8:



(a) Đồ thì vị trí và độ rung khi sử dụng bộ điều khiển Hybrid Shape



(b) Đồ thị vị trí và độ rung khi sử dụng bộ điều khiển P

H. 8 *Kết quả thực nghiệm*

Do thiết bị đo mức tự chế tạo nên kết quả đo có độ chính xác chưa cao. Tuy nhiên kết quả cũng cho thấy được hiệu quả chống rung của bộ điều khiển Hybrid Shape so với bộ điều khiển P. Kết quả cụ thể như trong bảng B.3.

Tiêu chí		PID	Hybrid Shape
Vị trí	Os [%]	0	0
	Error [m]	0,01	0,01
	Ts [s]	2,7	2,2
Độ rung	Biên độ [m]	0,033	0,026
	Số lần dao động	Lớn	Ít hơn

B.3. *Bảng so sánh kết quả thực nghiệm sử dụng bộ điều khiển Hybrid Shape và bộ điều khiển P*

Cả hai bộ điều khiển đều cho đáp ứng vị trí bám với lượng đặt, sai lệch vị trí đều là 0,01 [m], biên độ rung lớn nhất của bộ P là 0,033 [m] với số lần dao động rất lớn biên độ rung của bộ Hybrid Shape là 0,026 [m] với số lần dao động ít hơn đáng kể.

5. Kết luận

Bài báo nghiên cứu một phương pháp điều khiển cho cho cơ cấu vận chuyển chất lỏng được thiết kế theo phương pháp Hybrid Shape. Bằng cách giải bài toán tối ưu các điều kiện ràng buộc trong cả miền tần số và miền thời gian. Các kết quả đã đạt được:

- Chỉ sử dụng một bộ điều khiển phản hồi cho mạch vòng vị trí nhưng vẫn đảm bảo giảm rung động (so với bộ điều khiển P thông thường) trên bề mặt chất lỏng khi di chuyển.
- Khảo sát được tính bền vững của hệ thống với sự thay đổi của tham số đối tượng trong quá trình hoạt động.
- Ứng dụng một thiết bị thường gặp trong công nghiệp là PLC để thay cho các card DSP chuyên dụng trong mô hình thực nghiệm.

Một số vấn đề cần phải nghiên cứu thêm như: hoàn thiện bộ điều khiển Hybrid Shape cho các đối tượng rung động khác trong công nghiệp như cầu trục, cần trục, …; tự điều chỉnh online tham số của bộ điều khiển thay cho việc nhận dạng đối tượng offline; sử dụng thiết bị đo mức có độ chính xác cao hơn để có thể khảo sát được tính bền vững của bộ điều khiển theo sự thay đổi của tham số đối tượng.

Tài liệu tham khảo

[1] Y. Noda, K. Yano and K. Terashima: *Tracking Control with Sloshing-Suppression of Self-Transfer Ladle to Continuous Type Mold Line in Automatic Pouring System*. SCE 2002 Aug. 5-7,2W2, Osaka.

[2] K. Yano, S. Higashikawa and K. Terashima: *Liquid Container Transfer Control on 3D Transfer Path by Hybrid Shaped Approach*. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications, September 5-7, 2001 Mexico City, Mexico.

[3] Ken'ichi Yano, and Kazuhiko Terashima: *Robust Liquid Container Transfer Control for Complete Sloshing Suppression.* IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 9, No. 3, May 2001.

[4] Mattias Grundelius and Bo Bernhardsson, *Control of Liquid Slosh in an Industrial Packaging Machine*, Proceedings of the 1999 IEEE lnlemalional Conference on Conlrol Applications, Kohala Coast-Island of Hawai'i, Hawai'i, USA * August 22-27, 1999.

[5] Mattias Grundelius: *Methods for Control of Liquid Slosh*, PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, 2001. Proceeding of Natl. Sci. Counc. ROC(A), vol.25, no. 4, pp. 254-258, 2001.

[6] Kurode, S. ; Bandyopadhyay ; Gandhi, P.S. *"Sliding mode observer for estimation of slosh states in a moving container"*, Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference.

[7] R.Shibuya, H.Okatsuka, Y.Noda, K.Terashima, *"Transferring and tilt motion control of the liquid container to suppress sloshing by using Generalized Predictive Control method"*, System Integration (SII), 2011.

[8] Reyhanoglu, M. ; *Hervas, J.R. "Partial-state feedback control design for liquid container transfer with sloshing suppression"*, IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.

[9] Minh Duc Duong and Kazuhiko Terashima, *"Input shaping based GUI tool for vibration suppression control and its applications to industrial processes"*, Hội nghị Điều khiển - Tự động hóa toàn quốc lần thứ 2, 2013.

[10] K. Yano, and K. Terashima: *Sloshing Suppression Control of Liquid Transfer Systems Considering a 3-D Transfer Path*. IEEE Transactions on Mechatronics, Vol. 10, No. 1 Feb 2005.

Đào Quý Thịnh sinh năm 1984. Anh nhận bằng kỹ sư chuyên ngành Tự động hóa Công nghiệp và bằng Thạc sỹ chuyên ngành Kỹ thuật tự động hóa tại trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST), trong các năm 2007 và 2009. Từ tháng 9 năm 2011 đến nay anh là giảng viên bộ môn Tự động hóa Công nghiệp trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST). Hướng nghiên cứu chính hiện nay của anh là về điều khiển logic và PLC; điều khiển chống rung và robot.

Đinh Văn Nam sinh năm 1992. Anh nhận bằng cử nhân Công nghệ chuyên ngành Tự động hóa Công nghiệp năm 2015, hiện đang tiếp tục theo học hệ kỹ sư cùng chuyên ngành tại trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST). Hướng nghiên cứu chính hiện nay của anh là về vi điều khiển, điều khiển chống rung.

Dương Minh Đức sinh năm 1979. Anh nhận bằng kỹ sư chuyên ngành Tự động hóa công nghiệp tại trường Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2002. Sau đó anh nhận bằng Thạc sỹ và Tiến sỹ về Điện –Điện tử - Công nghệ thông tin tại đại học Công nghệ Toyohashi, Nhật Bản trong các năm 2005 và 2008. Từ năm 2002 đến nay anh là Giảng viên bộ môn Tự động hóa Công nghiệp trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST). Hướng nghiên cứu chính của anh hiện nay trong các lĩnh vực vận hành từ xa song phương, điều khiển chống rung và Robot.