

# ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO ĐỐI TƯỢNG CON LẮC NGƯỢC CÓ LIÊN KẾT ĐÀN HỒI SỬ DỤNG ĐẠI SỐ GIA TỬ

Vũ Như Lâm<sup>1</sup>, Nguyễn Tiến Duy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Đại học Thăng Long, Hà Nội

<sup>2</sup>Đại học Kỹ thuật công nghiệp, Đại học Thái Nguyên, Thái Nguyên

vnlan@ioit.ac.vn, duy.infor@tmut.edu.vn

**TÓM TẮT** - Con lắc ngược là đối tượng có rất nhiều ứng dụng trong thực tế. Điều khiển con lắc ngược là bài toán đã được nhiều nhà khoa học nghiên cứu với các phương pháp điều khiển khác nhau như sử dụng bộ điều khiển PI, điều khiển trượt, điều khiển sử dụng mạng nơ ron, điều khiển bằng logic mờ, ... Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu 2 bộ điều khiển cho đối tượng “con lắc ngược có liên kết đàn hồi – cân nhớt chịu tải chu kỳ” đó là điều khiển mờ trượt sử dụng logic mờ (Sliding Mode Fuzzy Controller – SMFC) và điều khiển mờ trượt sử dụng đại số gia tử (Sliding Mode Hedge-Algebras Controller – SMHAC). Kết hợp với việc ứng dụng giải thuật di truyền để tối ưu hoá các tham số mờ của SMHAC để đạt được chất lượng điều khiển tốt hơn. Mục tiêu nghiên cứu là so sánh, đánh giá chất lượng điều khiển và khả năng ứng dụng đại số gia tử trong điều khiển mờ trượt. Kết quả đạt được cho thấy SMHAC điều khiển đưa con lắc về vị trí cân bằng nhanh hơn cả về thời gian xác lập, độ chính xác và độ ổn định của con lắc so với SMFC. Qua đó cho thấy tính hiệu quả của đại số gia tử trong lớp bài toán điều khiển mờ trượt dựa trên hệ luật ngôn ngữ.

**Từ khóa** - Fuzzy, Genetic Algorithm, Hedge Algebras, Inverted Pendulum, Sliding Mode Control.

## I. GIỚI THIỆU

Điều khiển ổn định cho đối tượng con lắc ngược là một trong những vấn đề cơ bản và quan trọng nhất trong kỹ thuật điều khiển. Con lắc ngược là một đối tượng phi tuyến, khó điều khiển [9] và thường được điều khiển bởi các phương pháp điều khiển hệ phi tuyến [6]. Trong lớp bài toán này, nhiều nhà nghiên cứu đã phát triển các phương pháp điều khiển khác nhau. Tuy nhiên, nó vẫn luôn là một lĩnh vực nhận được nhiều sự quan tâm bởi ứng dụng rộng rãi của nó như trong kỹ thuật về tên lửa, hướng dẫn hành trình tên lửa, địa chấn và trong các hệ thống điện tử hàng không (ví dụ như máy bay, tàu con thoi không gian, vệ tinh, tàu thủy, robot, ô tô, ...). Vì vậy nó được coi như một mô hình tiêu biểu để thử nghiệm các kỹ thuật điều khiển kinh điển và hiện đại [7], [8], [10], [11]. Cho đến nay, đã có rất nhiều phương pháp điều khiển con lắc ngược. Có thể chia thành mấy nhóm như sau: nhóm phương pháp điều khiển kinh điển, chẳng hạn như PI, PID [8], [9]; nhóm điều khiển hiện đại như điều khiển trượt thích nghi [7], điều khiển trượt bền vững [10]; nhóm các phương pháp sử dụng trí tuệ nhân tạo như mạng neuran, logic mờ và đại số gia tử [2] kết hợp với giải thuật di truyền (GA), tối ưu bầy đàn (PSO) [10], [17]. Nguyên lý chính được trình bày trong các phương pháp đó là điều khiển góc lệch của con lắc ngược so với vị trí cân bằng.

Điều khiển theo nguyên lý trượt, hay còn gọi là điều khiển trong chế độ trượt là một phương pháp điều khiển bền vững cho hệ phi tuyến. Bộ điều khiển trượt kinh điển được biết đến với nhiều những ứng dụng trong điều khiển tốc độ nhanh. Chúng thường bao gồm hai khâu PD và Relay 2 vị trí mắc nối tiếp để tạo ra tín hiệu điều khiển. Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển sẽ nhận giá trị  $U_{max}$  hoặc  $-U_{max}$ . Chính vì vậy mà xảy ra hiện tượng trượt (sliding) và kèm theo sự rung (chattering), là hiện tượng mà quỹ đạo trạng thái “trượt” zích-zắc theo mặt trượt về gốc tọa độ. Hiện tượng này có thể gây hại cho các cơ cấu cơ khí của đối tượng. Để hạn chế điều này, việc mờ hoá tín hiệu điều khiển và các thông tin đầu vào của bộ điều khiển giúp cho có thể giảm được hiện tượng chattering. Có thể thấy nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp điều khiển trượt kết hợp với điều khiển mờ [7] – [10], [12]. Khi đó, bộ điều khiển được gọi là bộ điều khiển mờ trong chế độ trượt [14].

Điều khiển theo logic mờ có một đặc điểm đó là không đòi hỏi phải biết về mô hình toán học cụ thể của đối tượng và cho phép tiếp cận một cách trực quan hơn để thiết kế so với các bộ điều khiển kinh điển. Ngoài ra, các bộ điều khiển logic mờ có khả năng xử lý tín hiệu không chắc chắn, không rõ ràng. Mặc dù tập mờ được sử dụng trong điều khiển mờ với mục đích diễn đạt ngữ nghĩa của ngôn ngữ tự nhiên xuất hiện trong luật điều khiển mờ nhưng lại không có mối liên hệ chặt chẽ giữa tập mờ với các từ ngôn ngữ này về mặt ngữ nghĩa. Trong thực tế, khi thiết kế bộ điều khiển mờ người thiết kế thường lựa chọn và sắp xếp các tập mờ chủ yếu là theo kinh nghiệm. Những hạn chế này làm giảm khả năng mô tả chặt chẽ giữa tập mờ và ngữ nghĩa của ngôn ngữ trong các mô hình mờ sử dụng tri thức dưới dạng luật. Trên thực tế, một điều quan trọng khi thiết kế bộ điều khiển mờ dựa trên tri thức chuyên gia là phải sử dụng mối quan hệ thứ tự giữa các giá trị ngôn ngữ xuất hiện trong hệ luật.

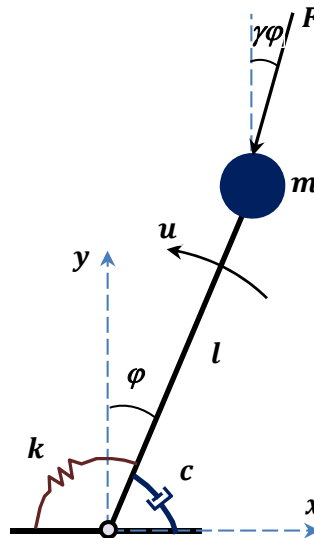
Đại số gia tử đã được phát triển để mô hình hóa ngữ nghĩa dựa trên thứ tự của các từ ngôn ngữ (giá trị ngôn ngữ) của các biến ngôn ngữ [15], [16]. Sử dụng đại số gia tử có thể lượng hoá giá trị ngữ nghĩa của các biến ngôn ngữ trong luật và cho phép mô tả hệ luật mờ bằng một “siêu mặt” trong không gian thực. Từ đó, việc giải bài toán suy luận xấp xỉ đơn giản chỉ là bằng phép nội suy trên “siêu mặt” này. Các bộ điều khiển sử dụng đại số gia tử đã được ứng dụng như bộ điều khiển điện áp trong hệ thống máy phát tự kích từ [3], điều khiển động cơ một chiều [4], điều khiển chủ động kết cấu [5] đã cho thấy tính hiệu quả của phương pháp luận này.

Với mục tiêu phát triển ứng dụng đại số gia tử trong điều khiển lớp các đối tượng phi tuyến, trong bài báo này, chúng tôi thiết kế 2 bộ điều khiển cho đối tượng “con lắc ngược có liên kết đàn hồi – cản nhớt chịu tải chu kỳ” đó là SMFC và SMHAC. Kết hợp với việc ứng dụng giải thuật di truyền để tối ưu hoá tham mờ của SMHAC để đạt được chất lượng điều khiển tốt hơn.

## II. MÔ HÌNH CON LẮC NGƯỢC CÓ LIÊN KẾT ĐÀN HỒI

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng mô hình con lắc ngược có liên kết đàn hồi – cản nhớt (The damped-elastic-jointed inverted pendulum) chịu tải chu kỳ  $F$  có hướng bám theo con lắc [1], [2] làm đối tượng điều khiển cho mục đích nghiên cứu và so sánh các phương pháp điều khiển.

Mô hình của con lắc được mô tả như trên 0. Con lắc ngược có chiều dài  $l$  với khối lượng  $m$  tại đỉnh của con lắc. Cơ cấu lò xo đàn hồi (có độ cứng không đổi  $k$ ) và cản phụ bằng dầu (có hệ số cản không đổi  $c$ ) giúp cho con lắc tránh được góc lệch quá lớn khi dao động. Lực chu kỳ  $F$  tác động lên con lắc với một góc lệch  $\gamma\varphi$ . Mô men điều khiển  $u(t)$  có tác dụng đưa con lắc về vị trí cân bằng tại  $\varphi = 0$ .



**Hình 1.** Mô hình con lắc ngược có liên kết đàn hồi – cản nhớt chịu tải chu kỳ  $F$  có hướng bám theo con lắc

Phương trình vi phân trạng thái của con lắc ngược như sau:

$$ml^2\ddot{\varphi} + c\dot{\varphi} + k\varphi - mlg \sin \varphi = u + Fl \sin(\varphi - \gamma\varphi) \quad (2.1)$$

Đặt  $[x_1, x_2]^T = [\varphi, \dot{\varphi}]^T$ , (2.1) được viết lại dưới dạng không gian trạng thái như sau:

$$\dot{x}_1 = \dot{\varphi} = x_2 \quad (2.2)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{\varphi} = -\frac{k}{ml^2}x_1 + \frac{g}{l}\sin x_1 + \frac{Fl \sin(x_1 - \gamma x_1)}{ml^2} - \frac{c}{ml^2}x_2 + \frac{u}{ml^2} \quad (2.3)$$

Với tải chu kỳ  $F$ :

$$F = P_1 + P_2 \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

Đầu ra  $y(t) = \varphi(t) = x_1(t)$

Mục tiêu của bài toán điều khiển là tìm mô men điều khiển  $u(t)$  để đưa con lắc ngược từ một vị trí mất cân bằng nào đó ( $x_1(t) \neq 0, x_2(t) \neq 0$ ) trở về vị trí cân bằng ( $x_1(t) \rightarrow 0, x_2(t) \rightarrow 0$ ). Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu 2 hướng tiếp cận để xây dựng bộ điều khiển. Đó là thiết kế bộ điều khiển mờ – trượt sử dụng logic mờ (SMFC – Sliding Mode Fuzzy Controller) và bộ điều khiển mờ – trượt sử dụng đại số gia tử (SMHAC – Sliding Mode Hedge-Algebras Controller). Dựa trên chất lượng điều khiển của các bộ điều khiển về độ ổn định và thời gian đáp ứng, đánh giá tính ưu việt của các phương pháp điều khiển.

## III. ĐIỀU KHIỂN MỜ TRƯỢT

### A. Điều khiển mờ trượt cho đối tượng con lắc ngược

Theo nguyên lý điều khiển trong chế độ trượt, để điều khiển đối tượng phi tuyến bậc hai (2.1) – (2.3) thì quyết định giá trị mô men điều khiển  $u(t)$  dựa trên sự phân tích và tổng hợp của hai tín hiệu:

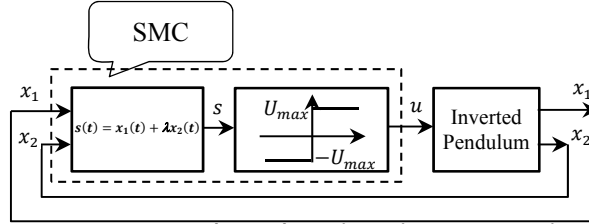
$$e(t) = y(t) - \varphi_r(t) = \varphi(t) = x_1(t)$$

Là tín hiệu sai lệch giữa mục tiêu điều khiển  $\varphi_r(t)$  và giá trị đầu ra  $y(t) = \varphi(t) = x_1(t)$  (trong bài toán này, giá trị mục tiêu là  $x_1(t) \rightarrow 0, x_2(t) \rightarrow 0$  nên  $\varphi_r(t) = 0$ ). Và thành phần đạo hàm theo  $t$  của  $e$ :

$$\dot{e}(t) = \dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

Hàm trượt được chọn như sau:

$$s(t) = e(t) + \lambda \dot{e}(t) = x_1(t) + \lambda x_2(t) \tag{3.1}$$



Hình 2. Sơ đồ hệ thống điều khiển trượt kinh điển

Có nghĩa là  $x_1(t)$  và  $x_2(t)$  phụ thuộc nhau trên mặt trượt  $s(t)$  (như trên 0).

Khi hàm trượt  $s(t) = 0$ , nghiệm của phương trình (3.1) có dạng  $e(t) = e^{-t/\lambda}$ .  $\lambda$  được gọi là hằng thời gian của hàm trượt  $s(t)$ .  $\lambda$  càng nhỏ thì trạng thái hệ thống càng chậm tiến về mặt trượt. Khi  $t \rightarrow \infty$  thì  $x_1(t) \rightarrow 0$  [14].

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov [6], chọn một hàm xác định dương:

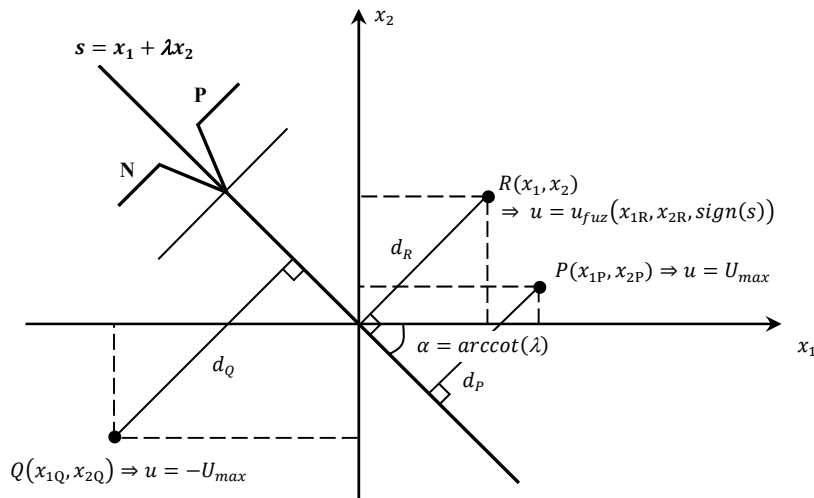
$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t) \tag{3.2}$$

$$\dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) \tag{3.3}$$

Để  $\dot{V}(t)$  xác định âm, chọn  $\dot{s}(t) = -k \text{sign}(s(t))$ ,  $k$  là hằng số dương chọn trước. Thay  $\dot{s}(t)$  vào (3.3) được:

$$\dot{V}(t) = -s(t)k \text{sign}(s(t)) \tag{3.4}$$

Từ (3.4) cho thấy: Nếu  $s(t) > 0$  thì  $\dot{V}(t) < 0$  và ngược lại. Nếu  $s(t) = 0$  thì  $\dot{V}(t) = 0$ . Vậy, hệ thống sẽ ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.



Hình 3. Mặt trượt  $s(t) = x_1(t) + \lambda x_2(t)$

Như vậy giữa  $x_1(t)$  và  $x_2(t)$  phải có sự liên quan chặt chẽ và thông qua một cặp giá trị giữa  $x_1(t)$  và  $x_2(t)$  được thể hiện trên 0 ta sẽ ra quyết định giá trị mô men điều khiển  $u(t)$  hợp lý. Để hiểu rõ hơn ta phân tích như sau:

- Giả sử  $x_1(t)$  là sai lệch tức thời theo thời gian, vậy giá trị đạo hàm  $x_2(t)$  theo thời gian được hiểu như là giá trị sai lệch mới sẽ đạt đến hay xảy ra trong tương lai sau lần quyết định điều khiển mới nhất.
- Ý tưởng thiết kế là sẽ dựa theo  $x_1(t)$  và sự phỏng đoán giá trị  $x_2(t)$  trong tương lai để ra quyết định điều khiển để từ đó bản thân giá trị  $x_1(t)$  trong tương lai sẽ dần đến 0.

Để đạt được như vậy thì giá trị mô men điều khiển  $u(t)$  tác động lên đối tượng phải thay đổi có quy luật thích hợp để giá trị  $x_1(t)$  tiến về 0 nhanh nhất và ổn định.

Trong bộ điều khiển trượt kinh điển, phía sau khối tổng hợp tín hiệu trạng thái  $s(t)$  là một khâu role hai trạng thái (0) do vậy tín hiệu đầu ra điều khiển  $u(t)$  chỉ có thể là  $U_{max}$  nếu trạng thái hệ thống tại điểm  $P(x_1(t), x_2(t))$  nằm

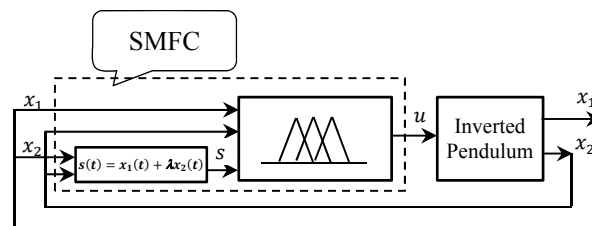
phía trên đường thẳng  $s(t)$  (khoảng cách tới  $s(t)$  bằng  $d_p$ ) hoặc bằng  $-U_{max}$  nếu trạng thái hệ thống tại điểm  $Q(x_1(t), x_2(t))$  nằm phía dưới đường thẳng  $s(t)$  (khoảng cách tới  $s(t)$  bằng  $d_o$ ) (0).

Theo cách chọn  $u(t)$  như vậy và đối tượng là một khâu dao động bậc hai thì trong một khoảng thời gian yêu cầu nhất định để  $x_1(t) \rightarrow 0$  là khó thực hiện. Ngoài ra, giá trị của  $u(t)$  chỉ nhận một trong hai giá trị là  $U_{max}$  hoặc  $-U_{max}$  tùy thuộc vào  $sign(s(t))$  nên gây ra hiện tượng chattering, ảnh hưởng không tốt đến cơ cấu cơ khí của đối tượng. Để tránh điều này, bộ điều khiển cần thiết đưa ra giá trị  $u(t)$  không chỉ phụ thuộc vào  $sign(s(t))$  mà còn phụ thuộc vào khoảng cách  $d_R$  từ một điểm trạng thái  $R(x_1(t), x_2(t))$  đến mặt trượt  $s(t)$  (0).

Chính từ đây, thay vì sử dụng một khâu role hai vị trí chúng ta đưa ra ý tưởng thành lập luật hợp thành (có cơ sở xác định) để chọn giá trị  $u(t)$  hợp lý dựa trên dấu và khoảng cách từ điểm trạng thái  $R(x_1(t), x_2(t))$  so với mặt trượt  $s(t)$ . Nói cách khác ta thành lập một bộ điều khiển mờ có hai đầu vào là  $x_1(t)$  và  $x_2(t)$  kết hợp với  $sign(s(t))$  để chọn được giá trị mô men điều khiển  $u(t)$ . Như vậy, bộ điều khiển vẫn đảm bảo làm việc đúng đắn theo nguyên lý trượt là sẽ đưa đối tượng từ một điểm trạng thái nào đó về trạng thái ổn định và giảm hiện tượng chattering.

### B. Thiết kế bộ điều khiển mờ trượt theo mô hình mờ Mamdani (SMFC)

Mô hình bộ điều khiển mờ trượt cho đối tượng “con lắc ngược có liên kết đàn hồi – cần nhớt chịu tải chu kỳ” được cho như trên 0.



Hình 4. Sơ đồ hệ thống điều khiển mờ trượt cho đối tượng con lắc ngược

Nói chung, bộ điều khiển mờ theo mô hình Sugeno thường được sử dụng nhiều hơn theo mô hình Mamdani vì tính đơn giản trong thiết kế (các tập mờ đầu ra có dạng singleton) và đơn giản trong việc tính toán để giải mờ ra giá trị rõ ở đầu ra. Tuy nhiên, bộ điều khiển mờ theo mô hình Mamdani được biết đến một cách rộng rãi vì nó cho phép thiết kế một cách trực quan theo phát biểu hệ luật của mô hình mờ. Vì vậy, chúng tôi lựa chọn mô hình Mamdani để thiết kế bộ điều khiển mờ cho đối tượng con lắc ngược.

**Bước 1:** Xác định các biến ngôn ngữ vào – ra và tập nền của chúng:

Biến vào:

- Biến vào 1:  $x_1 = \varphi$ , là sai lệch điều khiển.  $-1 \text{ rad} \leq x_1 \leq 1 \text{ rad}$
- Biến vào 2:  $x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\varphi}$ , là biến trạng thái, đạo hàm của sai lệch.  $-4 \text{ rad/s} \leq x_2 \leq 4 \text{ rad/s}$

Các giá trị ngôn ngữ của  $x_1$  và  $x_2$  gồm:  $N$  (Negative),  $ZE$  (Zero),  $P$  (Positive).

- Biến vào 3:  $s = x_1 + \lambda x_2$ , là mặt trượt.

Các giá trị ngôn ngữ của  $s$  gồm:  $N$  (Negative),  $P$  (Positive). Với  $\lambda = -0,15$ .

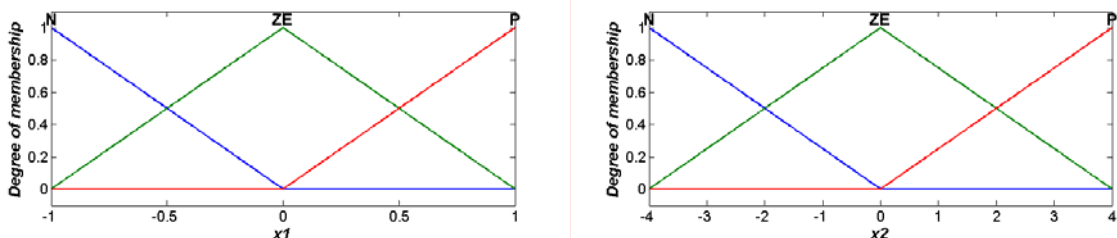
Biến ra:

- $u$ , là giá trị điều khiển.  $-100 \text{ Nm} \leq u \leq 100 \text{ Nm}$

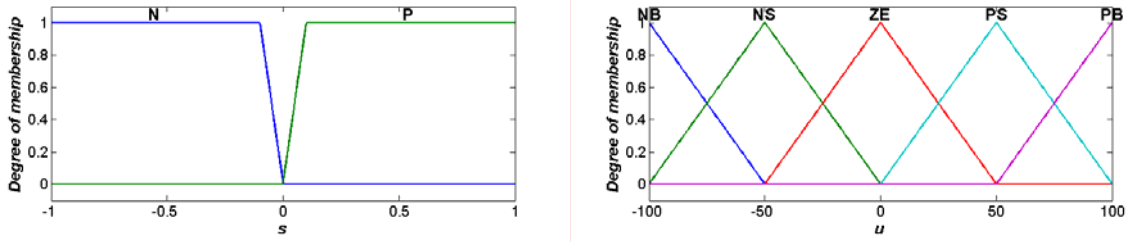
Các giá trị ngôn ngữ của  $u$  gồm:  $NB$  (Negative Big),  $NS$  (Negative Small),  $ZE$  (Zero),  $PS$  (Positive Small),  $PB$  (Positive Big).

**Bước 2:** Định nghĩa các tập mờ cho các biến ngôn ngữ

Hàm thuộc của các tập mờ dạng tam giác được thiết kế như trên 0 và 0.



Hình 5. Tập mờ của các biến  $x_1$  và  $x_2$



Hình 6. Tập mờ của các biến s và u

**Bước 3:** Xây dựng hệ luật điều khiển

Hệ luật điều khiển của bộ điều khiển mờ trượt được cho như trong 0.

**Bảng 1.** Hệ luật điều khiển của FMSC

		$x_1$					
		$s = N$			$s = P$		
		$N$	$ZE$	$P$	$N$	$ZE$	$P$
$x_2$	$N$	$ZE$	$ZE$	$PS$	$N$	$NB$	$NB$
	$ZE$	$ZE$	$PS$	$PB$	$ZE$	$NB$	$NS$
	$P$	$PS$	$PB$	$PB$	$P$	$NS$	$ZE$

Các luật trong bảng được hiểu như sau:

**if**  $s = N$  **and**  $x_1 = N$  **and**  $x_2 = N$  **then**  $u = ZE$

**if**  $s = N$  **and**  $x_1 = N$  **and**  $x_2 = P$  **then**  $u = PS$

**if**  $s = ZE$  **and**  $x_1 = N$  **and**  $x_2 = P$  **then**  $u = PB$

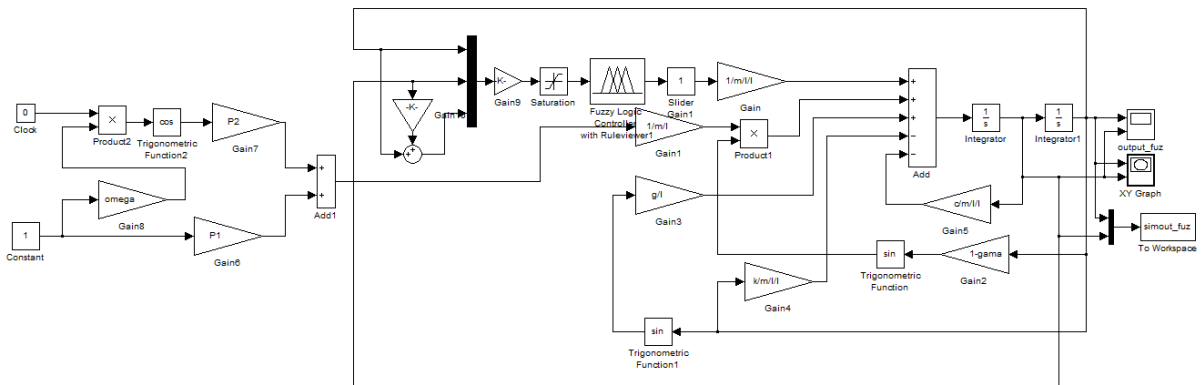
**if**  $s = P$  **and**  $x_1 = N$  **and**  $x_2 = P$  **then**  $u = NS$

...

**Bước 4:** Quy tắc hợp thành được chọn là Max-Min.

**Bước 5:** Phương pháp giải mờ theo trọng tâm.

Sử dụng Matlab Simulink để mô phỏng hệ thống, ta có sơ đồ như trên 0.



Hình 7. Mô hình mô phỏng hệ thống với SMFC

**IV. ĐIỀU KHIỂN MỜ TRƯỢT SỬ DỤNG ĐẠI SỐ GIA TỬ**

**A. Đại số gia tử**

Phần này, chúng tôi trình bày vắn tắt những vấn đề cốt lõi của lý thuyết đại số gia tử. Nội dung bao gồm các khái niệm về đại số gia tử, mối quan hệ dấu của các gia tử và các phần tử sinh, độ đo tính mờ của hạng tử ngôn ngữ và vấn đề lượng hoá giá trị ngữ nghĩa của ngôn ngữ.

Giả sử ta có một tập các giá trị ngôn ngữ là miền ngôn ngữ của biến ngôn ngữ nhiệt độ gồm các hạng tử sau:  $X = dom(TEMPERATURE) = \{Very\ Very\ small < Very\ small < small < Little\ small < Very\ Little\ small < medium < Very\ Little\ big < Little\ big < big < Very\ big < Very\ Very\ big < \dots\}$ . Các giá trị ngôn ngữ này

được sử dụng trong các bài toán lập luận xấp xỉ dựa trên tri thức bằng luật. Một vấn đề đặt ra là cần có một cấu trúc đủ mạnh dựa trên tính thứ tự vốn có của giá trị ngôn ngữ trong miền của biến ngôn ngữ. Từ đó, có thể tính toán được ngữ nghĩa trên giá trị ngôn ngữ của biến ngôn ngữ trong các bài toán suy luận xấp xỉ.

**Khái niệm đại số gia tử:** Mỗi biến ngôn ngữ  $X$  được biểu thị như một cấu trúc đại số  $\mathcal{AX} = (X, G, C, H, \leq)$ , gọi là đại số gia tử, trong đó  $X$  là tập các hạng tử trong  $X$ ;  $\leq$  biểu thị mối quan hệ thứ tự ngữ nghĩa tự nhiên của các hạng tử trên  $X$ ;  $G = \{c^-, c^+\}$ ,  $c^- \leq c^+$ , được gọi là các phần tử sinh (ví dụ:  $G = \{\text{small} < \text{big}\}$ );  $C = \{\mathbf{0}, \mathbf{W}, \mathbf{1}\}$  là tập các hằng, với  $\mathbf{0} \leq c^- \leq \mathbf{W} \leq c^+ \leq \mathbf{1}$ , để chỉ các phần tử có ngữ nghĩa nhỏ nhất, lớn nhất và phần tử trung hoà (ví dụ:  $\mathbf{W} = \text{medium}$ );  $H = H^- \cup H^+$ , với  $H^- = \{h_{-q} \geq \dots \geq h_{-2} \geq h_{-1}\}$  là tập các gia tử âm,  $\forall h \in H^-$  thì  $hc^+ \leq c^+$  và  $H^+ = \{h_1 \leq h_2 \leq \dots \leq h_p\}$  là các gia tử dương,  $\forall h \in H^+$  thì  $hc^+ \leq c^+$ . Ví dụ  $H^- = \{\text{Little} > \text{Rather}\}$ ,  $H^+ = \{\text{More} < \text{Very}\}$ . Với  $x \in X$ ,  $x = h_n h_{n-1} \dots h_1 c$ ,  $h_j \in H$ ,  $c \in G$ . Với quan hệ thứ tự giữa các phần tử sinh, các gia tử và chiều tác động của các gia tử như trên, có thể được biểu thị bằng dấu của chúng [3], [15], [16] như sau:

**Hàm dấu:**  $\text{sgn}: X \rightarrow \{-1, 0, 1\}$  được định nghĩa một cách đệ quy như sau:

Với  $k, h \in H$ ,  $c \in G$ ,  $x \in X$

$$\text{sgn}(c^+) = +1 \text{ và } \text{sgn}(c^-) = -1 \quad (4.1)$$

$$\{h \in H^+ | \text{sgn}(h) = +1\} \text{ và } \{h \in H^- | \text{sgn}(h) = -1\} \quad (4.2)$$

$$\text{sgn}(hc^+) = +\text{sgn}(c^+) \text{ nếu } hc^+ \geq c^+ \text{ hoặc } \text{sgn}(hc^-) = +\text{sgn}(c^-) \text{ nếu } hc^- \leq c^-$$

$$\text{và } \text{sgn}(hc^+) = -\text{sgn}(c^+) \text{ nếu } hc^+ \leq c^+ \text{ hoặc } \text{sgn}(hc^-) = -\text{sgn}(c^-) \text{ nếu } hc^- \geq c^-.$$

$$\text{Hay } \text{sgn}(hc) = \text{sgn}(h)\text{sgn}(c). \quad (4.3)$$

$$\text{sgn}(kx) = +\text{sgn}(x) \text{ nếu } k \text{ là dương đối với } h \text{ (sgn}(k, h) = +1)$$

$$\text{và } \text{sgn}(kx) = -\text{sgn}(x) \text{ nếu } k \text{ là âm đối với } h \text{ (sgn}(k, h) = -1). \quad (4.4)$$

$$\text{sgn}(kx) = \mathbf{0} \text{ nếu } kx = hx. \quad (4.5)$$

Tổng quát:

$\forall x \in H(G)$ , có thể được viết là:

$$x = h_n h_{n-1} \dots h_1 c, h_j \in H, c \in G.$$

Khi đó:

$$\text{sgn}(x) = \text{sgn}(h_n, h_{n-1}) \dots \text{sgn}(h_2, h_1)\text{sgn}(h_1)\text{sgn}(c) \quad (4.6)$$

$$\text{sgn}(hx) = +1 \Rightarrow (hx \geq x) \text{ và } \text{sgn}(hx) = -1 \Rightarrow (hx \leq x)$$

**Độ đo tính mờ:** Khái niệm “mờ” của thông tin ngôn ngữ mờ là rất quan trọng trong việc tính toán giá trị ngữ nghĩa của từ ngữ [15], [16]. Ngữ nghĩa của giá trị ngôn ngữ trong  $\mathcal{AX}$  được xây dựng từ các tập  $H(x) = \{x = h_n h_{n-1} \dots h_1 c, h_j \in H, c \in G\} \cup \{x\}$ ,  $x \in X$ , có thể coi như một mô hình mờ của  $x$ . Tập  $H(x)$ ,  $x \in X$ , xác định độ đo tính mờ  $f_m$  của  $X$ , chính bằng “bán kính” của  $H(x)$  và có thể được tính toán một cách đệ quy từ độ đo tính mờ của các phần tử sinh,  $f_m(c^-)$ ,  $f_m(c^+)$  và độ đo tính mờ của gia tử  $\mu(h)$ ,  $h \in H$ . Chúng được gọi là các tham số mờ của  $X$ .

$f_m: X \rightarrow [0, 1]$  gọi là độ đo tính mờ nếu thỏa mãn các điều kiện sau:

$$f_m(c^-) + f_m(c^+) = 1 \text{ và}$$

$$\sum_{h \in H} f_m(hx) = f_m(x), \text{ với } \forall x \in X \quad (4.7)$$

Với các phần tử  $\mathbf{0}$ ,  $\mathbf{W}$  và  $\mathbf{1}$ ,

$$f_m(\mathbf{0}) = f_m(\mathbf{W}) = f_m(\mathbf{1}) = \mathbf{0} \quad (4.8)$$

$$\text{Và với } \forall x, y \in X, \forall h \in H, \frac{f_m(hx)}{f_m(x)} = \frac{f_m(hy)}{f_m(y)} \quad (4.9)$$

Đẳng thức (4.9) không phụ thuộc vào các phần tử  $x$ ,  $y$ , nó đặc trưng cho gia tử  $h$ , gọi là độ đo tính mờ của  $h$ , ký hiệu là  $\mu(h)$ . Tính chất của  $f_m(x)$  và  $\mu(h)$  như sau:

Ta có  $x \in X$ ,  $x = h_n h_{n-1} \dots h_1 c$ ,

$$f_m(hx) = \mu(h)f_m(x), \forall x \in X \quad (4.10)$$

$$f_m(h_n h_{n-1} \dots h_1 c) = \mu(h_n)\mu(h_{n-1}) \dots \mu(h_1)f_m(c), c \in G \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=-1}^{-q} \mu(h_i) = \alpha \text{ và } \sum_{i=1}^p \mu(h_i) = \beta, \text{ với } \alpha, \beta > \mathbf{0} \text{ và } \alpha + \beta = \mathbf{1} \quad (4.12)$$

**Ánh xạ ngữ nghĩa định lượng:** Với bộ tham số mờ xác định, giá trị ngữ nghĩa định lượng được xác định bởi hàm ánh xạ ngữ nghĩa định lượng (SQM – Semantically Quantifying Mapping)  $v$  một cách đệ quy như sau:

$$v(W) = \theta = fm(c^-) \tag{4.13}$$

$$v(c^-) = \theta - \alpha fm(c^-) = \beta fm(c^-) \tag{4.14}$$

$$v(c^+) = \theta + \alpha fm(c^-) = 1 - \beta fm(c^+) \tag{4.15}$$

$$v(h_j x) = v(x) + Sgn(h_j x) \left\{ \left[ \sum_{i=Sgn(j)}^j fm(h_i x) \right] - \omega(h_j x) fm(h_j x) \right\}, \tag{4.16}$$

Với:

$$\omega(h_j x) = \frac{1}{2} [1 + Sgn(h_j x) Sgn(h_p h_j x) (\beta - \alpha)], j \in [-q \wedge p] = [-q, p] \setminus \{0\} \tag{4.17}$$

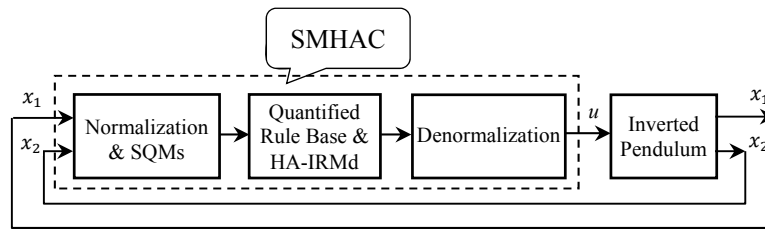
Hàm SQM có thể ánh xạ một cách trực tiếp từ giá trị ngôn ngữ vào giá trị định lượng ngữ nghĩa của nó. Vì vậy, dựa trên SQM, có thể mô phỏng phương pháp suy luận xấp xỉ của con người mà luôn đảm bảo thứ tự ngữ nghĩa của ngôn ngữ. Đó chính là cơ sở để xây dựng một phương pháp thiết kế bộ điều khiển HA, ứng dụng trong lĩnh vực điều khiển [3], [4]. Theo phương pháp này, các bước chính để thiết kế bộ điều khiển cho đối tượng con lắc ngược có liên kết đàn hồi – cân nhớt chịu tải chu kỳ  $F$  có hướng bám theo con lắc như sau:

**Bước 1:** Lựa chọn các thành phần đại số gia từ đối với các biến vào – ra.

**Bước 2:** Chuyển hệ luật của mô hình mờ ban đầu về hệ luật với các nhãn ngôn ngữ trong đại số gia từ.

**Bước 3:** Tính toán giá trị định lượng ngữ nghĩa cho các nhãn ngôn ngữ, xây dựng mặt quan hệ vào – ra trong không gian thực  $S_{real}$  (với bộ tham số mờ xác định).

Khi bộ điều khiển làm việc, bài toán lập luật xấp xỉ được tính toán bằng phương pháp nội suy trên mặt  $S_{real}$ .



**Hình 8.** Sơ đồ hệ thống điều khiển đối tượng con lắc ngược

Trên 0 là sơ đồ hệ thống với bộ điều khiển mờ theo tiếp cận đại số gia từ. Các thành phần của bộ điều khiển bao gồm:

- **Normalization:** chuẩn hoá miền biến thiên của các biến vào và tính toán giá trị định lượng ngữ nghĩa cho các nhãn ngôn ngữ, xây dựng mặt quan hệ vào – ra  $S_{real}$  (0).
- **Quantified Rule Base & HA-IRMd:** Thực hiện giải bài toán lập luật xấp xỉ bằng phương pháp nội suy trên mặt quan hệ vào – ra.
- **Denormalization:** chuyển đổi giá trị điều khiển ngữ nghĩa về miền giá trị biến thiên của biến điều khiển.

**B. Thiết kế bộ điều khiển mờ trượt sử dụng đại số gia từ (SMHAC)**

Trên cơ sở mô hình điều khiển mờ được phát biểu bằng hệ luật (0), miền biến thiên của các biến vào – ra và theo sơ đồ điều khiển 0. Chúng tôi thiết kế bộ điều khiển mờ trượt theo tiếp cận đại số gia từ như sau [3], [4].

**Bước 1:** Các thành phần trong đại số gia từ được xác định:

Quan sát trên hệ luật của bộ điều khiển mờ (0), ta thấy có các hạng từ ngôn ngữ của các biến vào gồm:  $N, ZE, P$ ; biến ra gồm:  $NB, NS, ZE, PS, PB$ . Chúng được hình thành và sắp xếp đối xứng từ 2 phần tử đối lập là  $N, P$  và phần tử mang tính trung hoà là  $ZE$ . Từ đó, để mô tả hệ mờ một cách đúng đắn, cấu trúc đại số gia từ cho các biến vào – ra được xây dựng như sau:

- 1) Tập phần tử sinh  $G = \{N (Negative), P (Positive)\}$ .
- 2) Tập các gia từ được chọn:  $H^- = \{L (Little)\}$  và  $H^+ = \{V (Very)\}$ .
- 3) Các tham số mờ của các đại số gia từ sẽ gồm:
  - + Độ đo tính mờ  $\theta = fm(N) (fm(N) + fm(P) = 1 \Rightarrow fm(P) = 1 - \theta)$ .
  - + Độ đo tính mờ của các gia từ. Ở đây, ta chỉ có 2 gia từ nên  $\alpha = \mu(L), \beta = \mu(V) = 1 - \alpha$ .

Các tham số mờ trên của đại số gia từ cho các biến  $x_1, x_2$  và  $u$  được chọn theo trực giác như trong 0.

**Bảng 2.** Tham số mờ của các đại số gia tử

	$x_1$	$x_2$	$u$
$\theta = fm(N)$	0,5	0,5	0,5
$\alpha = \mu(L)$	0,5	0,5	0,5

4) Mọi quan hệ dấu của các gia tử đối với các gia tử khác và các phần tử sinh được xác định như trong 0.

**Bảng 3.** Mọi quan hệ dấu của các gia tử và các phần tử sinh

	$V$	$L$	$N$	$P$
$V$	+	+	-	+
$L$	-	-	+	-

**Bước 2:** Chuyển hệ luật của mô hình mờ về hệ luật với các nhãn ngôn ngữ trong đại số gia tử.

1) Từ hệ luật theo nhãn ngôn ngữ của mô hình mờ ban đầu, chuyển một cách tương ứng các giá trị ngôn ngữ thành các nhãn ngôn ngữ trong  $X$  của đại số gia tử. Cụ thể như trong 0.

**Bảng 4.** Các nhãn ngôn ngữ

Hedge Algebra		Fuzzy	
<i>Very Negative</i>	$VN$	<i>Negative Big</i>	$NB$
<i>Negative</i>	$N$	<i>Negative</i>	$N$
<i>Little Negative</i>	$LN$	<i>Negative Small</i>	$NS$
<i>Neural</i>	$W$	<i>Zerro</i>	$ZE$
<i>Little Positive</i>	$LP$	<i>Positive Small</i>	$PS$
<i>Positive</i>	$P$	<i>Positive</i>	$P$
<i>Very Positive</i>	$VP$	<i>Positive Big</i>	$PB$

2) Chuyển hệ luật mờ thành hệ luật trong đại số gia tử một cách tương ứng, ta được (0).

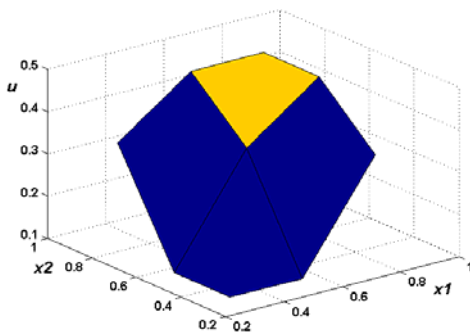
**Bảng 5.** Hệ luật điều khiển trong đại số gia tử

		$x_1$						
		$s = N$				$s = P$		
		$N$	$W$	$P$		$N$	$W$	$P$
$x_2$	$N$	$W$	$W$	$LP$	$N$	$VN$	$VN$	$LN$
	$W$	$W$	$LP$	$VP$	$W$	$VN$	$LN$	$W$
	$P$	$LP$	$VP$	$VP$	$P$	$LN$	$W$	$W$

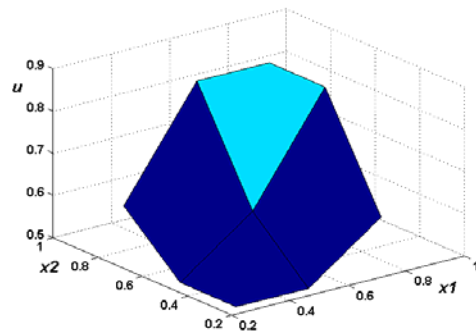
**Bước 3:** Tính toán giá trị định lượng ngữ nghĩa của các hạng tử ngôn ngữ trong bảng luật (0) theo hàm định lượng ngữ nghĩa (4. 13) – (4. 17) được:

**Bảng 6.** SAM

		$x_1$						
		$s = N$				$s = P$		
		<b>0,250</b>	<b>0,500</b>	<b>0,750</b>		<b>0,250</b>	<b>0,500</b>	<b>0,75</b>
$x_2$	<b>0,250</b>	0,500	0,500	0,625	<b>0,250</b>	0,125	0,125	0,375
	<b>0,500</b>	0,500	0,625	0,875	<b>0,500</b>	0,125	0,375	0,500
	<b>0,750</b>	0,625	0,875	0,875	<b>0,750</b>	0,375	0,500	0,500



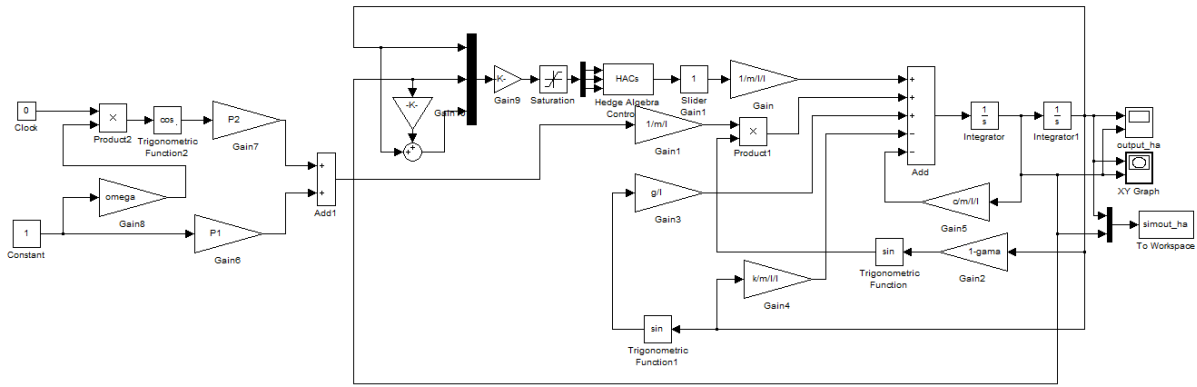
(a)  $s < 0$



(b)  $s \geq 0$

**Hình 9.** Mặt cong quan hệ vào ra của SMHAC –  $S_{real}$





Sử dụng Matlab Simulink để mô phỏng hệ thống, ta có sơ đồ như trên 0.

**Hình 10.** Mô hình mô phỏng hệ thống với SMHAC

**V. TỐI ƯU HOÁ THAM SỐ**

Giải thuật di truyền được biết đến như một công cụ tối ưu hoá tham số hiệu quả. Đây là thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên toàn cục dựa trên sự mô phỏng của quá trình tiến hoá tự nhiên [13]. Xuất phát từ bộ tham số ngẫu nhiên, GA tìm kiếm “song song” sẽ tránh được tình huống cục bộ địa phương. Vì thế GA có khả năng tìm kiếm được bộ tham số tối ưu trong các không gian phức tạp. Việc đánh giá tham số được đo bằng hàm mục tiêu.

Trong bài toán này, mục tiêu tối ưu đó là bộ điều khiển cần đưa ra mô men điều khiển  $u(t)$  để đưa con lắc ngược từ một vị trí mất cân bằng nào đó ( $x_1(t) \neq 0, x_2(t) \neq 0$ ) trở về vị trí cân bằng ( $x_1(t) \rightarrow 0, x_2(t) \rightarrow 0$ ) trong khoảng thời gian ngắn nhất và tối thiểu hiện tượng chattering. Có nghĩa là cần tối thiểu hoá  $x_1(t)$  và  $x_2(t)$ . Vì lý do cần  $x_1(t)$  tiến nhanh về 0 thì bộ điều khiển phải đưa ra  $u(t)$  lớn nên  $x_2(t)$  cũng sẽ rất lớn. Điều đó dẫn đến vị trí con lắc có thể vượt quá điểm cân bằng. Để dung hoà mối quan hệ này, hàm mục tiêu được xây dựng như sau:

$$g = \max \left( \frac{1}{1 + (1-\delta)^2 \sqrt{\sum_{k=1}^n x_1(k)^2} + \delta^2 \sqrt{\sum_{k=1}^n x_2(k)^2}} \right), \text{ Với } \delta = 0, 1; \tag{5. 1}$$

Với hàm mục tiêu (5. 2), sử dụng GA để tối ưu hoá tham số mờ của các đại số gia từ bộ điều khiển, ta nhận được kết quả như trong 0.

**Bảng 7.** Tham số mờ của đại số gia từ cho các biến  $x_1, x_2$  và  $u$

	$x_1$	$x_2$	$u$
$\theta = fm(N)$	0,5	0,5	0,5
$\alpha = \mu(L)$	0,3004	0,6926	0,6988

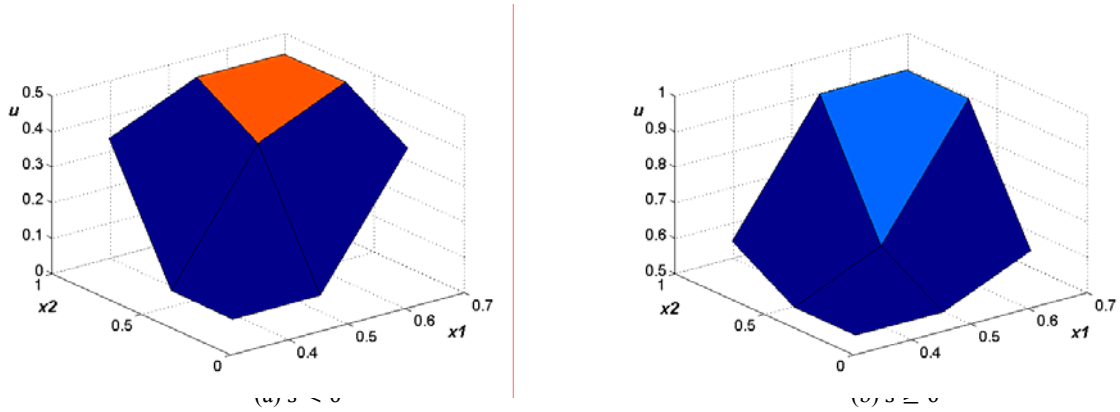
Giá trị đạt được của hàm mục tiêu theo (5. 1):

$$g = 0,175357$$

Từ bộ tham số tối ưu tìm được thông qua GA (0), tính toán giá trị định lượng ngữ nghĩa của các hạng tử ngôn ngữ trong bảng luật (0) theo hàm định lượng ngữ nghĩa (4. 13) – (4. 17) ta được bảng OP-SAM như trong 0 và mặt  $S_{real}$  tương ứng như trên 0.

**Bảng 8.** OP-SAM với các tham số mờ tối ưu

		$x_1$						
		$s = N$			$s = P$			
		0,3498	0,5000	0,6502	0,3498	0,5000	0,6502	
$x_2$	0,1537	0,5000	0,5000	0,6052	0,1537	0,0454	0,0454	0,3948
	0,5000	0,5000	0,6052	0,9546	0,5000	0,0454	0,3948	0,5000
	0,8463	0,6052	0,9546	0,9546	0,8463	0,3948	0,5000	0,5000

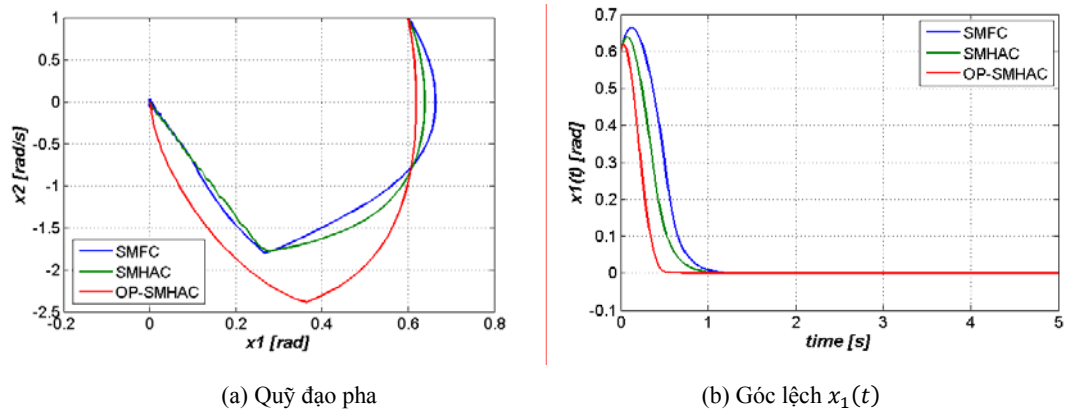


Hình 11. Mặt cong quan hệ vào ra với các tham số mờ tối ưu –  $S_{real}$

## VI. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

### A. Kết quả mô phỏng

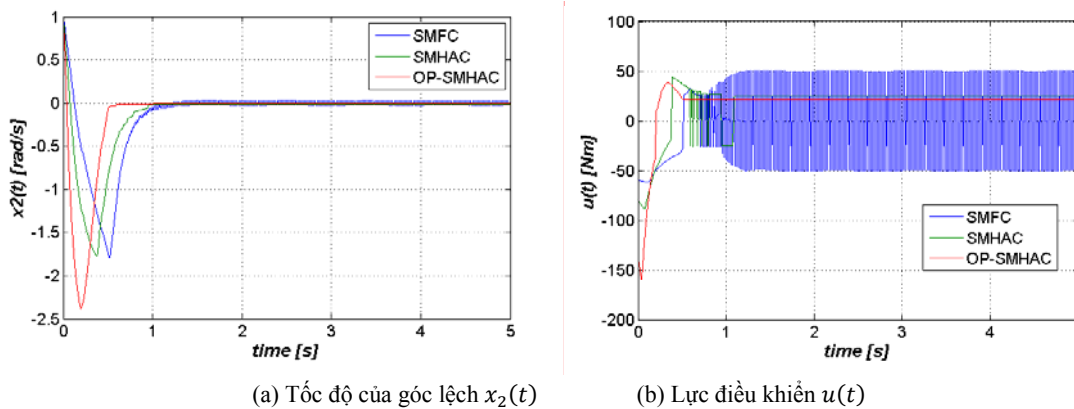
Với các tham số [1]  $m_0 = 2 \text{ kg}$ ,  $k = 2 \text{ Nm}$ ,  $c = 0,005 \text{ Nms}$ ,  $l = 1.5 \text{ m}$ ,  $\gamma = 0,5$ ,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $P_1 = 10 \text{ N}$ ,  $P_2 = 1 \text{ N}$ ,  $\omega = \pi/2$  và sơ kiện  $x_1(0) = 0,6 \text{ rad}$ ,  $x_2(0) = 1 \text{ rad/s}$ , chu kỳ lấy mẫu (thời gian lấy mẫu – sample time)  $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ . Mô phỏng hệ thống bằng Matlab Simulink với các bộ điều khiển đã thiết kế là SMFC, SMHAC và SMHAC với các tham số mờ tối ưu, ta thu được kết quả như trên 0 và 0.



(a) Quỹ đạo pha

(b) Góc lệch  $x_1(t)$

Hình 12. Quỹ đạo pha và góc lệch  $x_1(t)$  của con lắc



(a) Tốc độ của góc lệch  $x_2(t)$

(b) Lực điều khiển  $u(t)$

Hình 13. Tốc độ của góc lệch  $x_2(t)$  và lực điều khiển  $u(t)$

### B. Thảo luận

Quan sát sự biến thiên của  $x_1$  đối với các bộ điều khiển trên 0 (a) và 0 (b) thấy rằng, đối với bộ điều khiển SMFC thì biên độ dao động của  $x_1$  là lớn nhất. Kế đến là đối với SMHAC và cuối cùng là SMHAC với tham số tối ưu (OP-SMHAC). Từ vị trí ban đầu  $x_1 = 0,6$ , bộ điều khiển SMFC tạo ra một tín hiệu điều khiển làm cho con lắc vượt xa khỏi vị trí cân bằng rồi mới bắt đầu giảm dần về vị trí cân bằng. Mức độ vượt quá này giảm hơn chút ít so với bộ điều khiển SMHAC và OP-SMHAC. Nhưng cũng trên 0 (b), thấy rằng bộ điều khiển SMHAC đưa con lắc về vị trí cân bằng nhanh hơn so với SMFC và đặc biệt với bộ điều khiển OP-SMHAC, thời gian đưa con lắc về vị trí cân bằng là nhỏ nhất.

Quan sát sự biến thiên của  $x_2$  trên các 0 (a) và 0 (b), rõ ràng rằng: bộ điều khiển SMFC và SMHAC có  $x_2$  với biên độ vượt quá xấp xỉ bằng nhau, nhưng SMHAC đưa  $x_2$  tiến nhanh hơn về giá trị 0. Bộ điều khiển SMFC gây nên sự dao động của  $x_2$  quanh vị trí cân bằng xấp xỉ giá trị 0 do bởi tác động của lực có chu kỳ  $F$ . Điều này dẫn đến vị trí của con lắc vẫn dao động với một biên độ nào đó quanh vị trí cân bằng. Bộ điều khiển OP-SMHAC tạo ra  $x_2$  có biên độ tương đối lớn, nhưng tiến nhanh nhất đến vị trí cân bằng và ổn định tại giá trị 0.

0 (b) cho thấy mô men điều khiển  $u$  đối với các bộ điều khiển. OP-SMHAC tạo ra  $u$  có giá trị lớn ngay tại thời gian đầu và nhanh chóng xác lập giá trị để giữ cho con lắc ở vị trí ổn định. Đối với SMHAC, giá trị  $u$  có số lần đổi dấu nhiều hơn trước khi tiến tới giá trị xác lập và có biên độ lớn hơn so với OP-SMHAC. Điều đó có nghĩa, bộ điều khiển SMHAC cần một năng lượng điều khiển lớn hơn để duy trì vị trí ổn định của con lắc. Bộ điều khiển SMFC tạo ra một mô men điều khiển  $u$  có biên độ nhỏ trong khoảng thời gian đầu, nhưng thời gian đưa con lắc tới vị trí cân bằng là lớn hơn cả. Tuy nhiên, khi con lắc đã gần đạt tới vị trí cân bằng thì bộ điều khiển SMFC vẫn không giữ cho con lắc ở vị trí ổn định được bởi lực chu kỳ  $F$ , mô men điều khiển  $u$  liên tục đổi dấu với biên độ lớn. Đây là nhược điểm không thể khắc phục được của SMFC.

Hiện tượng chattering là hiện tượng quỹ đạo pha của  $x_1, x_2$  dao động quanh mặt trượt. Trên 0 (a) thấy rằng, hiện tượng chattering đối với SMHAC giảm hơn so với SMFC.

Khi thiết kế các hệ suy luận mờ, việc lựa chọn hình dáng, vị trí hàm thuộc và các phép toán của logic mờ phụ thuộc rất nhiều vào kinh nghiệm của người thiết kế. Đôi khi, nó làm cho mối quan hệ giữa các tập mờ biểu diễn cho các giá trị ngôn ngữ là không hợp lý, không nhất quán. Theo tiếp cận đại số gia tử, với cùng một mô hình điều khiển mờ, dựa trên hàm định lượng ngữ nghĩa ta có thể mô phỏng phương pháp suy luận xấp xỉ của con người với sự đảm bảo thứ tự ngữ nghĩa của ngôn ngữ và mối quan hệ tương tự giữa chúng. Vì thế bộ điều khiển theo tiếp cận đại số gia tử mô tả hệ luật điều khiển mờ “hợp lý hơn” hơn so với logic mờ. Điều đó làm cho chất lượng điều khiển của bộ điều khiển SMHAC tốt hơn so với SMFC như trong phần đặt vấn đề đã nêu. Với đại số gia tử, khi một mô hình điều khiển đã được xây dựng, độ chính xác của suy luận xấp xỉ chỉ phụ thuộc vào bộ tham số mờ và phương pháp nội suy. Do số lượng các tham số mờ là rất ít nên có thể dễ dàng áp dụng các phương pháp tối ưu tham số.

Việc áp dụng phương pháp điều khiển mờ trượt cho kết quả tốt hơn điều khiển mờ thông thường so với [1], [2]. Đối với các đối tượng phi tuyến, việc áp dụng các bộ điều khiển mờ thường cho kết quả tốt hơn [3], [4] vì các hệ mờ có thể xấp xỉ hoá các hệ phi tuyến rất tốt. Điều khiển mờ trượt cho phép mờ hoá mặt trượt và  $u$  điều khiển nên hệ thống nhanh tiến tới giá trị ổn định, đồng thời giảm được hiện tượng chattering trên mặt trượt. Khi điều khiển mờ trượt sử dụng đại số gia tử với phương pháp suy luận bằng nội suy thì giá trị của  $u$  biến đổi “mịn” hơn, vì thế mà hiện tượng chattering giảm hẳn (0 (a)); Cùng với việc sử dụng GA để tối ưu tham số mờ, bộ điều khiển theo tiếp cận đại số gia tử với các tham số tối ưu cho chất lượng điều khiển vượt trội. Như trên 0 (a), đại lượng sai lệch góc  $x_1$  đối với SMHAC tiến nhanh tới giá trị 0 hơn so với SMFC. Cuối cùng trên 0 (b), tốc độ góc  $x_2$  đối với SMHAC có biên độ tương đối lớn nhưng biến thiên nhanh về 0 hơn so với SMFC.

## VII. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, các bộ điều khiển mờ trượt sử dụng logic mờ và đại số gia tử đã được thiết kế để điều khiển đối tượng con lắc ngược có liên kết đàn hồi – cần nhốt chịu tải chu kỳ  $F$ . Những kết quả mô phỏng trong nghiên cứu về bộ điều khiển mờ trượt sử dụng đại số gia tử cho thấy đó là sự lựa chọn tốt. Bộ điều khiển SMHAC và OP-SMHAC cho chất lượng điều khiển nhìn chung tốt hơn so với SMFC cả về thời gian xác lập, độ chính xác và độ ổn định của con lắc.

Đại số gia tử có cấu trúc thứ tự chặt chẽ về ngữ nghĩa để có thể diễn tả đúng đắn các giá trị ngôn ngữ và từ đó có khả năng thực hiện phép suy luận xấp xỉ hợp lý. Một ưu điểm nữa là bộ điều khiển sử dụng đại số gia tử có ít tham số nên có thể dễ dàng tối ưu hóa các tham số này trong bài toán điều khiển tối ưu.

Việc phát triển bộ điều khiển SMHAC đã cho thấy đây là một nghiên cứu có ý nghĩa khoa học tốt và có khả năng thay thế hiệu quả cho một số bộ điều khiển mờ hiện có. Qua nghiên cứu này, có thể thấy rằng đại số gia tử là một công cụ tính toán hữu hiệu, đầy hứa hẹn trong lĩnh vực kỹ thuật điều khiển.

**Lời cảm ơn:** Bài báo nghiên cứu được Quỹ phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) tài trợ theo Hợp đồng số 102.05-2013.34.

## VIII. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hai-Le Bui, Duc-Trung Tran and Nhu-Lan Vu, “Optimal fuzzy control of an inverted pendulum”, Journal of Vibration and Control 18(14) 2097 - 2110, 2011.
- [2] Bùi Hải Lê, Trần Đức Trung, Trần Minh Thúy, “Điều khiển con lắc ngược sử dụng lý thuyết mờ và đại số gia tử”, Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 9, Tập 1. Động lực học và Điều khiển, Hà Nội, 8-9/12/2012.
- [3] Dinko Vukadinović, Mateo Bašić, Cat Ho Nguyen, Nhu Lan Vu, Tien Duy Nguyen, “Hedge-Algebra-Based Voltage Controller for a Self-Excited Induction Generator”, Control Engineering Practice 30 (2014) 78 - 90.

- [4] Cat Ho Nguyen, Nhu Lan Vu, Tien Duy Nguyen, Thiem Pham Van, “Study the ability of replacing fuzzy and PI controllers with the Hedge - Algebras - Based controller for DC motor”, Journal of science and technology, Vol 52, N.1, 35 - 48, 2014.
- [5] Hai-Le Bui , Cat-Ho Nguyen, Nhu-Lan Vu, Cong-Hung Nguyen, “General design method of hedge-algebras-based fuzzy controllers and an application for structural active control”, Applied Intelligence. DOI 10.1007/s10489-014-0638-6. © Springer Science+Business Media New York 2015.
- [6] Nguyễn Doãn Phước, Phan Xuân Minh, Hán Thành Trung, Lý thuyết điều khiển phi tuyến, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2008.
- [7] Wu Wang, “Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Inverted Pendulum”, Proceedings of the Second Symposium International Computer Science and Computational Technology (ISCST'09) Huangshan, P. R. China, 26 - 28, Dec. 2009, pp. 231 - 234.
- [8] A. N. K. Nasir, R. M. T. Raja Ismail, M. A. Ahmad, “Performance Comparison between Sliding Mode Control (SMC) and PD-PID Controllers for a Nonlinear Inverted Pendulum System”, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 4 2010-10-27.
- [9] Anirban BANREJEE, M J NIGAM, “DESIGNING OF PROPORTIONAL SLIDING MODE CONTROLLER FOR LINEAR ONE STAGE INVERTED PENDULUM”, POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING, VOLUME: 9, NUMBER: 2, JUNE, 2011.
- [10] Mohamad Reza Dastranj, Mahbubeh Moghaddas, Younes Ghezi, and Modjtaba Rouhani, “Robust Control of Inverted Pendulum Using Fuzzy Sliding Mode Control and Genetic Algorithm”, International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 2, No. 5, September 2012.
- [11] A. Tahir and J. Yasin, “Implementation of Inverted Pendulum Control”, Plunks on Miscellaneous Tactics, International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol. 12 No. 04, 2012.
- [12] Nguyen Thanh Phuong, Ho Dac Loc, Tran Quang Thuan, “Control of Two Wheeled Inverted Pendulum Using Silding Mode Technique”, International Journal of Engineering, Vol. 3, Issue 3, May - Jun 2013, pp.1276 - 1282.
- [13] Goldberg D.E, “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”, Addison-Wesley, 1989.
- [14] Kamel Ben Saad, Abdelaziz Sahbani and Mohamed Benrejeb, “Sliding Mode Control and Fuzzy Sliding Mode Control for DC-DC Converters”, Sliding Mode Control, ISBN 978-953-307-162-6, April, 2011.
- [15] Ho N.C., Wechler W. Hedge algebras, “An algebraic approach to structure of sets linguistic truth values”, Fuzzy set and system, 35, 218 - 293, 1990.
- [16] Ho N.C., Wechler, “Extended hedge algebras and their application to fuzzy logic”, Fuzzy set and system, 52, 259 - 281, 1992.
- [17] Assef Zare, Toktam Lotfi, Hodeiseh Gordan, Mohamad Reza Dastranj, “Robust Control of Inverted Pendulum Using Fuzzy Sliding Mode Control and Particle Swarm Optimization “PSO” Algorithm”, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 10, October-2012.

## CONTROL IN SLIDING MODE FOR INVERTED PENDULUM SYSTEM USING HEDGE ALGEBRAS

Vu Nhu Lan, Nguyen Tien Duy

*ABSTRACT - In reality, inverted pendulum is supposed to have a great deal of application. Inverted pendulum control problem has been studied by many scientists with different control methods such as using PI controller, controller in sliding mode, controller using neural networks or the fuzzy logic one, ... In this paper, therefore, we study the two controllers for the object “the damped-elastic-jointed inverted pendulum”. It is the Sliding Mode Fuzzy Controller – SMFC and Sliding Mode Hedge-Algebras Controller – SMHAC. Moreover, we combined the application of genetic algorithm to optimize the fuzzy parameters of the SMHAC so that the quality control could be improved. The primary objective of this study was to compare, evaluate the quality control and the ability to apply the hedge algebra in fuzzy sliding mode controller; as a result, the SMHAC could control and take the pendulum to the equilibrium position and faster than the one in the field of the time set, the accuracy and stability of the pendulum compared with SMFC. Hence, it can be seen that hedge algebra brings lots of effectiveness in the problem of fuzzy sliding mode control based on a linguistic rule set.*

**Keywords** - Fuzzy, Genetic Algorithm, Hedge Algebras, Inverted Pendulum, Sliding Mode Control.