



# THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN HỌC TẬP CẢM XÚC NÃO CHO NHỮNG HỆ THỐNG PHI TUYẾN KHÔNG CHẮC CHẮN

## A BRAIN EMOTIONAL CONTROLLER DESIGN FOR UNCERTAIN NONLINEAR SYSTEMS

Huỳnh Tuấn Tú<sup>1\*</sup>, Ngô Kim Long<sup>1</sup> và Nguyễn Thanh Sơn<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Cơ Điện-Điện Tử, Trường Đại học Lạc Hồng, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam

<sup>2</sup> Trung tâm Nghiên cứu Khoa học và Ứng dụng, Trường Đại học Lạc Hồng, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam  
huyhntuantu@lhu.edu.vn; nguyenthanson@lhu.edu.vn

**TÓM TẮT.** Bộ điều khiển học tập cảm xúc não được xây dựng dựa trên mô hình hoạt động của bộ não con người; bộ điều khiển này sử dụng mạng lưới thần kinh để bắt chước các yếu tố phán đoán và cảm xúc của não. Trong sự phát triển của thuật toán thông minh, yếu tố cảm xúc luôn bị bỏ qua. Bài báo này đề xuất một thuật toán thông minh học tập cảm xúc não dựa trên sinh lý thần kinh; cùng với thuật toán học tập như mạng lưới thần kinh, nó cũng bao gồm thuật toán kèm theo yếu tố cảm xúc. Ngoài việc tự điều chỉnh việc học các trọng số, thuật toán đề xuất trong bài báo này có thể tự phán đoán yếu tố cảm xúc và đưa nó vào thuật toán tính toán để đạt được thuật toán thông minh hơn có thể gần đúng hơn với thuật toán tính toán của não. Hai ví dụ được sử dụng là hệ thống ba bể chứa thông nhau và hệ thống nâng từ trường được mô phỏng để minh họa tính hiệu quả của phương pháp điều khiển được đề xuất. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất có thể đạt được hiệu suất điều khiển cao và hiệu quả thỏa đáng cho điều khiển mức chất lỏng của hệ thống ba bể chứa thông nhau và hệ thống điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường.

**TỪ KHOÁ.** Bộ điều khiển cảm xúc đại não, hệ thống phi tuyến không chắc chắn, hệ thống điều khiển mức chất lỏng của ba bể chứa thông nhau, hệ thống nâng từ trường

**ABSTRACT.** In this paper, a brain emotional controller is designed based on the activity model of the human brain for uncertain nonlinear systems. The proposed controller uses a neural network to imitate the judgment and emotion factors of the brain. In the development of an intelligent algorithm, the emotional factor is always ignored. This study proposes a brain emotional learning intelligent algorithm; in addition to the learning algorithm like a neural network, it also included the calculation algorithm of emotional factor. Beside self-adjust the weight through learning, this algorithm can self-judge the emotion factor and included it into the calculation algorithm so as to achieve more intelligent algorithms that can more approximate to the calculation algorithm of the brain. Two examples that are the three-tank system and magnetic levitation system are used to illustrate the effectiveness of the proposed control method. Simulation results show that the proposed controller can achieve satisfactory control performance for the liquid level control of the three-tank system and for the trajectory of a metal ball of the magnetic levitation system.

**KEYWORDS.** Brain emotional learning controller, uncertain nonlinear systems, three-tank system, magnetic levitation system

## 1. GIỚI THIỆU

Những bộ điều khiển cổ điển đã giải quyết thành công hầu hết các vấn đề của hệ thống điều khiển, nhưng hiện nay các mô hình điều khiển đã trở nên cực kỳ phức tạp và phi tuyến tính, do đó nhiều nghiên cứu đã bắt đầu tìm cách giải quyết vấn đề này [1-3]. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất bộ điều khiển học tập cảm xúc não có thể được sử dụng để giải quyết rất nhiều vấn đề kiểm soát cho các mô hình khác nhau.

Bộ điều khiển học tập cảm xúc não (BEC) là một mô hình toán học gần đúng với sự phán đoán và cảm xúc của một bộ não. Bộ điều khiển BEC có hệ thống võ não trước trán và hệ thống hạch hạnh nhân. Hệ thống võ não trước trán là một mạng lưới thần kinh cảm giác và hệ thống hạch hạnh nhân là một mạng lưới thần kinh cảm xúc cho phép học nhanh cho bộ điều khiển BEC [4]. Một mạng lưới thần kinh cảm xúc trải qua sự kích thích bởi các yếu tố bên ngoài và có tác động gián tiếp đến mạng lưới thần kinh cảm giác. Hai hệ thống võ não trước trán và hệ thống hạch hạnh nhân có ảnh hưởng lẫn nhau và làm cho đầu ra của bộ điều khiển học tập cảm xúc não có thể đạt được khả năng xử lý như mong muốn. Năm 2002, Balkenius và Moren đề xuất bộ điều khiển học tập cảm xúc não [5]. Bộ điều khiển có mạng lưới thần

kinh và hệ thống cảm xúc, vì vậy mà mạng nơ-ron có thể giảm lỗi theo dõi một cách hiệu quả và hệ thống cảm xúc có thể điều chỉnh lỗi học nhanh chóng. Trong những nghiên cứu trước đây, yếu tố cảm xúc đã bị bỏ qua trong thiết kế bộ điều khiển thông minh; tuy nhiên, trong những năm gần đây, bộ điều khiển BEC đã được sử dụng cho các hệ thống điều khiển khác nhau trong nhiều lĩnh vực [6-8].

Trong nghiên cứu này, bằng cách kết hợp hệ thống cập nhật tham số vào BEC, sau đó hệ thống điều khiển được đề xuất được áp dụng cho hai hệ thống phi tuyến bao gồm một hệ thống điều khiển mức chất lỏng của ba bể chứa thông nhau và hệ thống điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường. Các mô phỏng cho hai hệ thống này sẽ minh họa cho sự ưu việt và sự hiệu quả của bộ điều khiển BEC được đề xuất.

## 2. NỘI DUNG

### 2.1 Vấn đề lý luận

Một hệ thống phi tuyến nhiều ngõ vào và nhiều ngõ ra cấp thứ  $n$  được mô tả theo phương trình sau:

Received: April, 13<sup>th</sup> 2020;

Accepted: May, 25<sup>th</sup> 2020

\*Corresponding Author

Email: huyhntuantu@lhu.edu.vn; nguyenthanson@lhu.edu.vn

$$\mathbf{x}^{(n)}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{G}(\mathbf{x}(t))\mathbf{u}(t) + \mathbf{d}(t) \quad (1)$$

Trong đó  $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T \in \mathfrak{R}^m$  là vector tín hiệu điều khiển của hệ thống và  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T \in \mathfrak{R}^m$  là vector trạng thái của hệ thống.  $\mathbf{d}(t) = [d_1(t), d_2(t), \dots, d_m(t)]^T \in \mathfrak{R}^m$  là nhiễu ngoài chưa biết được giới hạn và  $m$  là số ngõ vào và số ngõ ra của hệ thống.

$\underline{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{x}^T(t), \dot{\mathbf{x}}^T(t), \dots, \mathbf{x}^{(n-1)T}(t)]^T \in \mathfrak{R}^{nm}$  là vector trạng thái hệ thống và nó được coi là có thể đo lường được. Ngoài ra,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) \in \mathfrak{R}^m$  và  $\mathbf{G}(\mathbf{x}(t)) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$  là các hàm không chắc chắn phi tuyến, được giả định là bị chặn nhưng không được biết chính xác. Trong trường hợp bỏ qua sự không chắc chắn mô hình hóa và nhiễu loạn bên ngoài, hệ thống danh nghĩa (1) được viết thành:

$$\mathbf{x}^{(n)}(t) = \mathbf{f}_0(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{G}_0 \mathbf{u}(t) \quad (2)$$

Trong đó  $\mathbf{f}_0(\mathbf{x}(t)) \in \mathfrak{R}^m$  và ma trận hằng số  $\mathbf{G}_0 = \text{diag}(g_{01}, g_{02}, \dots, g_{0m}) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$  là những phần danh nghĩa của  $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$  và  $\mathbf{G}(\mathbf{x}(t))$ . Trong đó  $g_{0i} \geq 0$  với  $i = 1, \dots, m$ . Giả định rằng hệ thống phi tuyến (2) có thể điều khiển được và  $\mathbf{G}_0^{-1}$  khả nghịch. Nếu có sự không chắc chắn về mô hình và nhiễu loạn bên ngoài, hệ thống phi tuyến (1) có thể được viết lại thành

$$\mathbf{x}^{(n)}(t) = \mathbf{f}_0(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{G}_0 \mathbf{u}(t) + \mathbf{I}(\mathbf{x}(t), t) \quad (3)$$

Trong đó  $\mathbf{I}(\mathbf{x}(t), t)$  được gọi là sự không chắc chắn tổng hợp, bao gồm sự không chắc chắn của hệ thống và các nhiễu loạn bên ngoài. Vấn đề kiểm soát là thiết kế một hệ thống điều khiển thích hợp trong đó đầu ra của hệ thống vector trạng thái  $\mathbf{x}(t)$  có thể theo dõi một vector quỹ đạo mong muốn

$$\mathbf{x}_r(t) = [x_{r1}(t), x_{r2}(t), \dots, x_{rm}(t)]^T \in \mathfrak{R}^m.$$

Lỗi theo dõi được xác định là:

$$\mathbf{e}(t) \triangleq \mathbf{x}_r(t) - \mathbf{x}(t) \in \mathfrak{R}^m \quad (4)$$

và vector lỗi theo dõi hệ thống được định nghĩa là:

$$\underline{\mathbf{e}}(t) \triangleq [\mathbf{e}^T(t), \dot{\mathbf{e}}^T(t), \dots, \mathbf{e}^{(n-1)T}(t)]^T \in \mathfrak{R}^{nm} \quad (5)$$

Trong trường hợp các chức năng danh nghĩa  $\mathbf{f}_0(\mathbf{x}(t))$ ,  $\mathbf{G}_0$  và sự không chắc chắn tổng hợp  $\mathbf{I}(\mathbf{x}(t), t)$  được biết chính xác, một bộ điều khiển lý tưởng có thể được thiết kế như sau:

$$\mathbf{u}_l = \mathbf{G}_0^{-1} [\mathbf{x}_d^{(n)} - \mathbf{f}_0(\mathbf{x}) - \mathbf{I}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{K}^T \underline{\mathbf{e}}] \quad (6)$$

Trong đó  $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_n, \dots, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_1]^T \in \mathfrak{R}^{nm \times m}$  là ma trận khuếch đại phản hồi chứa các số thực, và  $\mathbf{K}_i = \text{diag}(k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{im}) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$  là một ma trận đường chéo hằng số dương.

Thay thế bộ điều khiển lý tưởng (6) vào (3), cho ta phương trình động lỗi sau:

$$\mathbf{e}^{(n)} + \mathbf{K}^T \underline{\mathbf{e}} = \mathbf{0} \quad (7)$$

Từ phương trình (7), nếu  $\mathbf{K}$  được chọn để thỏa mãn các hệ số của ma trận Hurwitz, khi đó ta có  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\underline{\mathbf{e}}\| = 0$ . Tuy

niên, sự không chắc chắn tổng hợp  $\mathbf{I}(\mathbf{x}(t), t)$  thường không thể thu được cho các ứng dụng thực tế, do đó bộ điều khiển lý tưởng  $\mathbf{u}_l$  ở phương trình (6) không thể có được. Do đó, bộ điều khiển học tập cảm xúc não BEC được thiết kế trong phần tiếp theo để xấp xỉ bộ điều khiển lý tưởng.

## 2.2 Thiết kế bộ điều khiển học tập cảm xúc não

Bộ điều khiển học tập cảm xúc não BEC được đề xuất có cấu trúc gồm hai mạng riêng biệt tác động ảnh hưởng qua lại lẫn nhau và có tốc độ hội tụ nhanh, do đó, nó có thể áp dụng cho nhiều hệ thống điều khiển phi tuyến khác nhau. Bộ điều khiển học tập cảm xúc não đầu ra đơn được thiết kế với hình thức sau [9]:

$$u_{BEC} = a - o = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s_{ij} v_{ij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s_{ij} w_{ij} \quad (8)$$

$$s_{ij} = I_i \times \lambda_{ij} \quad (9)$$

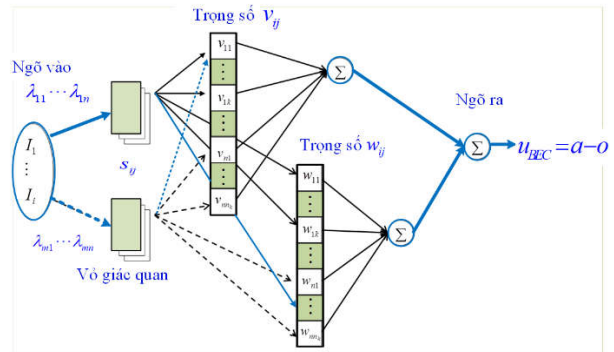
Trong đó  $s_{ij}$  là đầu vào hệ thống vô não trước trán và đầu vào hệ thống hạch hạnh nhân cho đầu ra vô giác quan. Thông thường giá trị của  $s_{ij}$  được xác định dựa vào một hàm thành

viên Gaussian  $s_{ij} = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-(I_i - m)^2}{v^2}\right)$  hoặc một hàm wavelet

$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_i - m}{v}\right) \exp\left(\frac{-(I_i - m)^2}{v^2}\right)$  (trong đó  $m$  là giá trị trung

bình và  $v$  là độ lệch chuẩn) [9]. Bài báo này sử dụng công thức (9) để tính toán  $s_{ij}$  trong đó  $I_i$  là đầu vào bộ điều khiển và  $\lambda_{ij}$  là các hệ số độ lợi. Các hệ số độ lợi  $\lambda_{ij}$  được xác định

theo phương pháp thử sai, nếu có sự tác động của nhiễu ngoài hoặc sự không chắc chắn của các tham số hệ thống làm cho ngõ vào điều khiển thay đổi, khi đó các giá trị  $\lambda_{ij}$  cần được thay đổi cho phù hợp. Bộ điều khiển học tập cảm xúc não được đề xuất như trong Hình 1.



Hình 1. Bộ điều khiển học tập cảm xúc não

Trọng số cập nhật cho  $\Delta v_{ij}$  và  $\Delta w_{ij}$  được tính toán như sau [9]:

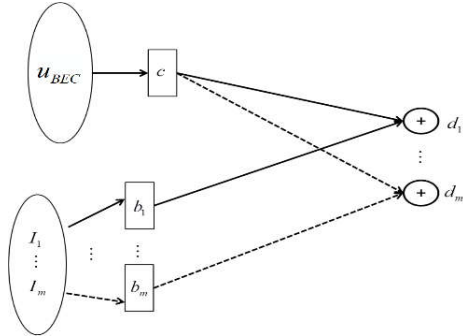
$$\Delta v_{ij} = \alpha \times [s_{ij} \times (\max(0, d_i - a))] \quad (10)$$

$$\Delta w_{ij} = \beta \times [s_{ij} \times (u_{BEC} - d_i)] \quad (11)$$

Trong đó  $\alpha$  và  $\beta$  là hệ số học tập. Theo công thức (10) và (11),  $d_i$  là tham số điều chỉnh được tính như sau:

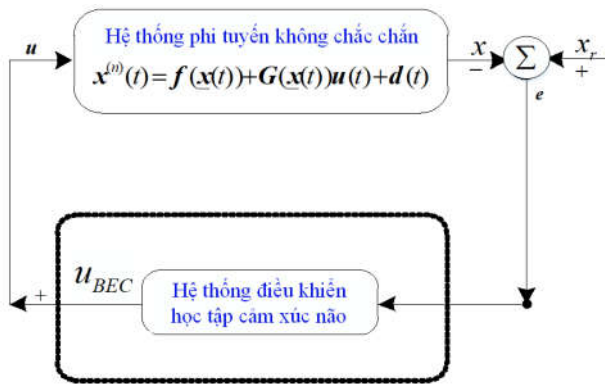
$$d_i = b_i \times I_i + c \times u_{BEC} \quad (12)$$

Thuật toán điều chỉnh tham số được hiển thị trong Hình 2, trong đó các giá trị  $b_i$  và  $c$  là các độ lợi.



Hình 2. Thuật toán điều chỉnh tham số của điều khiển học tập cảm xúc não

Hệ thống điều khiển thông minh dựa trên học tập cảm xúc não được trình bày trong Hình 3.

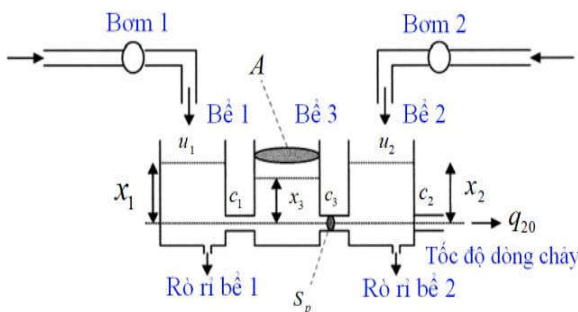


Hình 3. Hệ thống điều khiển học tập cảm xúc não cho các hệ thống phi tuyến

### 3 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Hệ thống điều khiển mức chất lỏng của ba bể chứa thông nhau và hệ thống nâng quả cầu sắt trong từ trường được nghiên cứu để minh họa tính hiệu quả và ưu việt của phương pháp thiết kế được đề xuất.

#### 3.1 Hệ thống điều khiển mức chất lỏng của ba bể chứa thông nhau



Hình 4. Hệ thống điều khiển mức chất lỏng của ba bể chứa thông nhau

Xem xét một hệ thống điều khiển mức chất lỏng của ba bể chứa thông nhau như trong Hình 4, các phương trình động lực học của nó được cho trong [10] như sau:

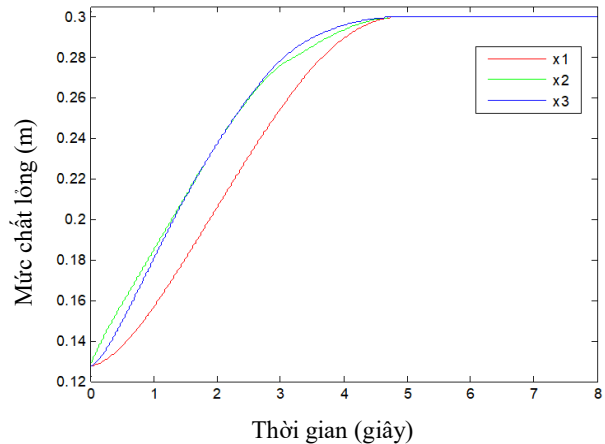
$$\dot{x}_1 = \frac{(-z_1 S_p \operatorname{sgn}(x_1 - x_3) \sqrt{2g|x_1 - x_3|} + u_1)}{A} + \eta_1(x, u) \quad (13)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{(-z_2 S_p \operatorname{sgn}(x_2 - x_3) \sqrt{2g|x_2 - x_3|} - z_2 S_p \sqrt{2gx_2} + u_2)}{A} - q_{20} + \eta_2(x, u) \quad (14)$$

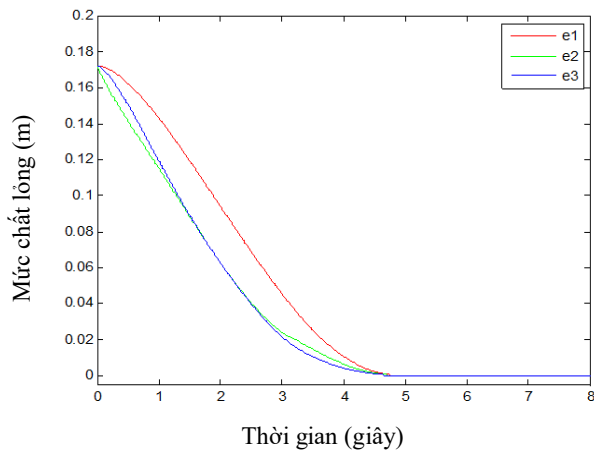
$$\dot{x}_3 = \frac{(-z_3 S_p \operatorname{sgn}(x_1 - x_3) \sqrt{2g|x_1 - x_3|} - z_3 S_p \operatorname{sgn}(x_3 - x_2) \sqrt{2g|x_3 - x_2|})}{A} + \eta_3(x, u) \quad (15)$$

Trong đó  $x = [x_1, x_2, x_3]^T$  là vector biểu thị mức chất lỏng cho các bể,  $u = [u_1, u_2]^T$  là vector điều khiển lưu lượng chất lỏng,  $g$  là gia tốc trọng trường,  $\eta_i$ , với  $i = 1, 2, 3$  đại diện cho sự không chắc chắn của mô hình do tính không chính xác trên mặt cắt ngang của các ống kết nối.  $q_{20} = z_1 S_p \sqrt{2gx_2}$  là tốc độ dòng chảy từ bể 2. Mặt cắt ngang  $A = 0.0154 \text{ m}^2$  và tiết diện của các ống kết nối là  $S_p = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ .  $z_1 = 1$ ,  $z_2 = 0.8$  và  $z_3 = 1$  biểu thị các hệ số dòng chảy không có chiều. Các tham số được chọn cho bộ điều khiển là  $\alpha = 0.04$ ,  $\beta = 0.1$  và  $c = 0.8$  cho tất cả các giá trị  $i$ . Điều kiện ban đầu được đặt là mức chất lỏng  $x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0.13 \text{ m}$ , và mục tiêu kiểm soát là giữ tất cả các mức chất lỏng ở mức  $0.3 \text{ m}$ .

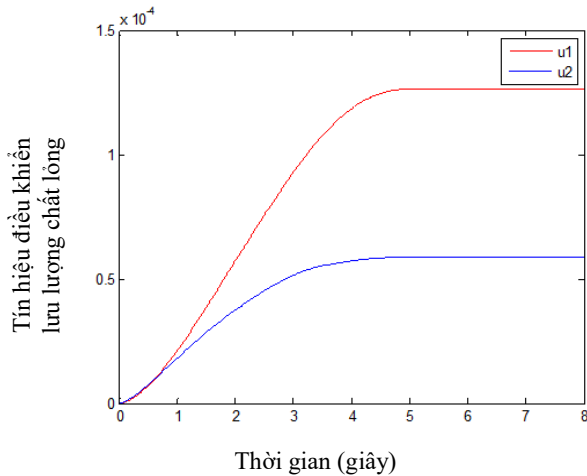
Các kết quả mô phỏng được hiển thị trong Hình 5-7. Hình 5 biểu thị mức chất lỏng của hệ thống ba bể chứa thông nhau, có thể thấy rằng hệ thống đạt được mức chất lỏng mong muốn  $0.3 \text{ m}$  tại thời điểm khoảng  $4,5$  giây; Hình 6 biểu thị các lỗi theo dõi của hệ thống này, các lỗi của ba bể chứa đều xấp xỉ bằng không sau khoảng  $4,5$  giây; và Hình 7 biểu thị đầu ra điều khiển của hệ thống này. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng bộ điều khiển BEC được đề xuất có thể đạt được hiệu quả kiểm soát mức chất lỏng của hệ thống ba bể thông nhau khá tốt.



Hình 5. Mức chất lỏng của hệ thống ba bể chứa thông nhau

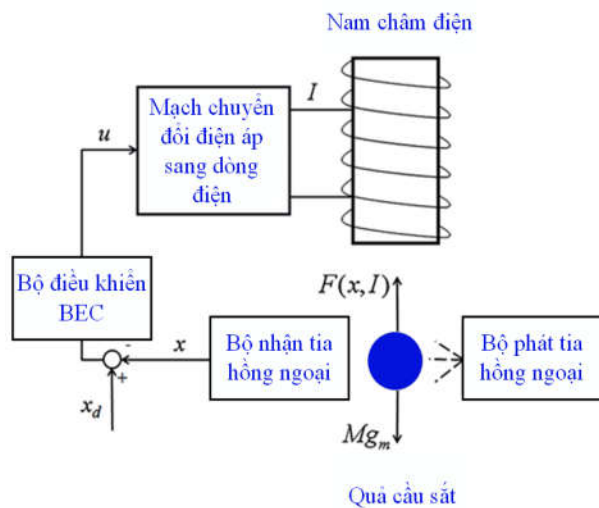


Hình 6. Lỗi theo dõi của hệ thống ba bể chứa thông nhau



Hình 7. Đầu ra bộ điều khiển của hệ thống ba bể chứa thông nhau

### 3.2 Hệ thống điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường



Hình 8. Hệ thống điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường

Hình 8 là hệ thống điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường. Đầu vào điều khiển là một điện áp, được chuyển đổi thành dòng điện thông qua mạch chuyển đổi. Khi dòng

điện chạy qua, nam châm điện tạo ra một từ trường tương ứng trong môi trường xung quanh nó. Quả cầu sắt di chuyển dọc theo trục dọc của nam châm điện. Vị trí của quả cầu sắt được đo bằng cảm biến hồng ngoại.

Theo định luật hai của Newton, phương trình động lực học của quả cầu sắt được xác định theo phương trình sau [11]:

$$Ma = F(x, I) - Mg_m \quad (16)$$

Trong đó  $M$  (kg) là khối lượng của quả cầu sắt,  $g_m$  ( $m/s^2$ ) là gia tốc trọng trường,  $a$  ( $m/s^2$ ) là gia tốc,  $x$  (m) là khoảng cách giữa quả cầu sắt và nam châm điện,  $I$  (A) là dòng điện và  $F(x, I)$  (N) là lực từ điều khiển. Lực từ điều khiển được tính theo công thức sau [10]:

$$F(x, I) = \frac{\mu_0 N^4 I^2 S}{8} \left[ (x+l) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (x+h)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x+h)^2}} + x \ln \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + x^2}}{R_2 + \sqrt{R_2^2 + x^2}} \right]^2 \quad (17)$$

$\mu_0$  (Wb/Am) là độ từ thẩm,  $h$  (m) là chiều dài cuộn dây,  $N$  là số vòng dây quấn,  $S$  ( $m^2$ ) là tiết diện mà từ thông đi qua,  $R_1$  (m) là bán kính tối thiểu của cuộn dây và  $R_2$  (m) là bán kính tối đa của cuộn dây.

Các thông số kỹ thuật của hệ thống nâng quả cầu sắt trong từ trường như sau:

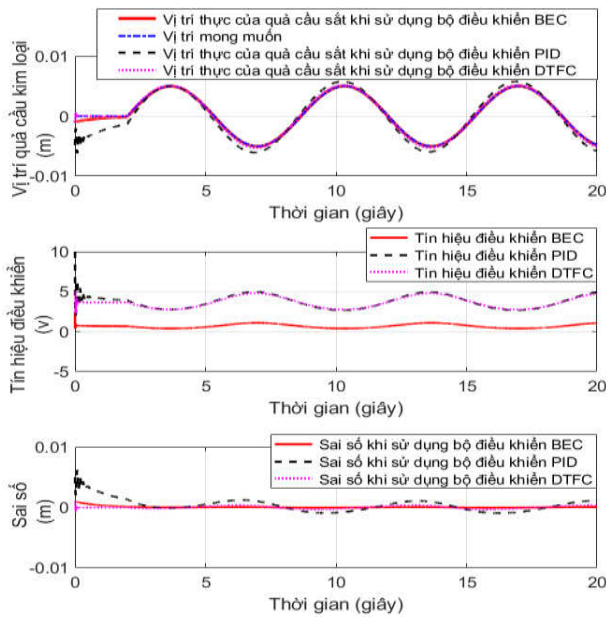
$N = 2850$ ,  $r_1 = 0.012$ (m),  $r_2 = 0.038$ (m),  $A = 0.005515$ ( $m^2$ ),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Wb / Am),  $M = 0.0216$ (kg), and  $g_m = 9.8$ ( $m / s^2$ ).

Các tham số được chọn cho bộ điều khiển là  $\alpha = 0.04$ ,  $\beta = 0.1$  và  $c = 0.8$  cho tất cả các giá trị  $i$ . Để chứng minh sự hiệu quả của phương pháp đề xuất, bộ điều khiển PID, bộ điều khiển tiêu nã mờ dùng phương pháp đa tiêu chí TOPSIS (DTFC) [11] và bộ điều khiển đề xuất BEC được sử dụng cho hệ thống điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường. Trong ví dụ này, hai trường hợp mô phỏng được thực hiện để khảo sát đáp ứng và hiệu suất của bộ điều khiển đề xuất so với hai bộ điều khiển PID và DTFC.

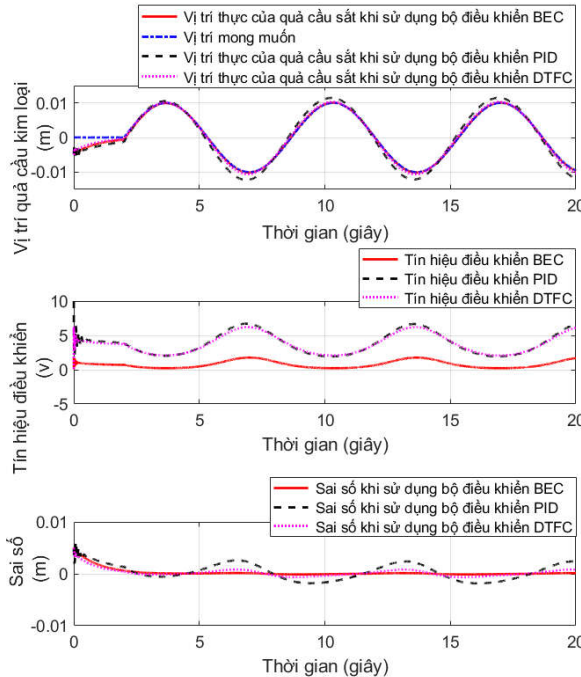
**Trường hợp 1:** Quả cầu sắt được điều khiển bám theo quỹ đạo hình sin cho trước là  $0,005 \times \sin(2\pi ft)$ (m), với tần số  $f=0,15$  Hz; vị trí ban đầu của quả cầu sắt là -1mm.

**Trường hợp 2:** Quả cầu sắt được điều khiển bám theo quỹ đạo hình sin cho trước là  $0,01 \times \sin(2\pi ft)$ (m), với tần số  $f=0,15$  Hz; vị trí ban đầu của quả cầu sắt là -5mm.

Hai kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 9 và 10 cho thấy vị trí của quả cầu sắt được điều khiển khá chính xác khi sử dụng ba bộ điều khiển nêu trên. Khi sử dụng bộ điều khiển đề xuất BEC quả cầu sắt có thể bám theo tín hiệu mong muốn sau khoảng 1 giây mô phỏng cho trường hợp 1 và khoảng 2 giây cho trường hợp 2. Sai số giảm về không nhanh chóng và duy trì trạng thái ổn định theo tín hiệu điều khiển đề xuất BEC. Tín hiệu điều khiển và sai số có giá trị nhỏ hơn so với các bộ điều khiển PID và DTFC. Bảng 1 liệt kê lỗi bình phương gốc (Root mean square error) cho cả ba bộ điều khiển. Kết quả so sánh ở Bảng 1 cho thấy hiệu quả của hệ thống điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường được cải thiện khi sử dụng phương pháp đề xuất BEC.



Hình 9. Kết quả mô phỏng điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường trường hợp 1



Hình 10. Kết quả mô phỏng điều khiển quỹ đạo quả cầu sắt bằng từ trường trường hợp 2

Bảng 1. So sánh kết quả lỗi bình phương gốc của bộ điều khiển PID, DTFC và BEC

Bộ điều khiển	Trường hợp 1	Trường hợp 2
PID	0,00083	0,00086
DTFC	0,00024	0,00073
BEC	0,00007	0,00026

#### 4 KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất thành công một bộ điều khiển thông minh dựa trên cảm xúc não BEC cho các hệ thống phi tuyến. Bộ điều khiển BEC được đề xuất có thể giảm sai số một cách hiệu quả và điều chỉnh lỗi học nhanh chóng. Bộ điều khiển BEC được đề xuất được áp dụng cho hai mô hình cụ thể là hệ thống điều khiển mức chất lỏng cho ba bể thông nhau và hệ thống nâng quả cầu sắt trong từ trường đã chứng minh tính hiệu quả của phương pháp kiểm soát được đề xuất. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất có thể đạt được điều khiển chính xác và hiệu quả cho mức chất lỏng của hệ thống ba bể thông nhau và vị trí của quả cầu sắt.

#### 5 TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Huynh, T. T.; Le, T. L.; Lin, C. M. A TOPSIS Multi-Criteria Decision Method-Based Intelligent Recurrent Wavelet CMAC Control System Design for MIMO Uncertain Nonlinear Systems. *Neural Computing and Applications*. **2018**, Article in Press, <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3795-4>
- [2] Lin, C. M.; Le, T. L.; Huynh, T. T. Self-Evolving Function-Link Interval Type-2 Fuzzy Neural Network for Nonlinear System Identification and Control. *Neurocomputing*. **2018**, *275*, 2239 - 2250.
- [3] Le, T. L.; Lin, C. M.; Huynh, T. T. Self-Evolving Type-2 Fuzzy Brain Emotional Learning Control Design for Chaotic Systems Using PSO. *Applied Soft Computing*. **2018**, *73*, 418-433.
- [4] LeDoux, J. E. *The Amygdala: Neurobiological Aspects of Emotion*, Wiley-Liss, New York, **1992**.
- [5] Balkenius, C.; Moren, J. Emotional Learning: A Computational Model of the Amygdala. *Cybernetics and Systems*. **2001**, *32*(6), 611 - 636.
- [6] Lucas, C.; Shahmirzadi, D.; Sheikholeslami, N. Introducing BELBIC: Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller. *International Journal of Intelligent Automation and Soft Computing*. **2004**, *10*(1), 11 - 22.
- [7] Yang, G.; Cao, Y.; Zhang, L. Design of Brain Emotional Learning Model Based Hydraulic Servo System. *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*. **2011**, 4874 - 4876.
- [8] Huynh, T. T.; Lin, C. M. Wavelet Dual Function-Link Fuzzy Brain Emotional Learning System Design for System Identification and Trajectory Tracking of Nonlinear Systems. *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*. **2019**, 1653 - 1657.
- [9] Zhao, J.; Lin, C. M.; Chao, F. Wavelet Fuzzy Brain Emotional Learning Control System Design for MIMO Uncertain Nonlinear Systems. *Frontiers in Neuroscience*. **2019**, <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00918>
- [10] Polycarpou, M. M. Fault Accommodation of a Class of Multivariable Nonlinear Dynamical Systems Using a Learning Approach. *IEEE Transactions Automatic Control*. **2001**, *46*, 736 - 742.
- [11] Lin, C. M.; Huynh, T. T. Dynamic TOPSIS Fuzzy Cerebellar Model Articulation Controller for Magnetic Levitation System. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. **2019**, *36*(3), 2465 - 2480.