

# NHẬN DẠNG VÀ ĐIỀU KHIỂN CON LẮC NGƯỢC BẰNG MẠNG NƠON TRUYỀN THẮNG

## IDENTIFICATION AND CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM SYSTEM USING FEED-FORWARD NEURAL NETWORK

Trương Tấn, Ngô Văn Thuyền

Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. HCM

### TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp nhận dạng và điều khiển hệ thống con lắc ngược bằng mạng nơon truyền thẳng nhiều lớp. Mạng nơon truyền thẳng nhiều lớp được huấn luyện theo luật học có giám sát. Mô phỏng được tiến hành trong môi trường Simulink/Matlab cho thấy rằng việc nhận dạng hệ thống khá tốt và bộ điều khiển dùng nơon truyền thẳng có khả năng điều khiển hệ thống con lắc ngược thành công. Kết quả thực nghiệm cho thấy việc nhận dạng hệ thống thực bằng mạng nơon truyền thẳng cho sai số khá nhỏ và mạng nơon truyền thẳng điều khiển ổn định hệ thống con lắc. Khi thông số của hệ thống thay đổi thì bộ điều khiển mạng nơon cho ra đáp ứng tốt hơn bộ điều khiển PID hai biến.

### ABSTRACT

This paper presents methods to identify and control the inverted pendulum system by using multi-layer linear network. Multi-layer linear network is trained by supervised learning rule. Simulation using Matlab shows that system identification is quite good and the feed-forward network controller is capable of controlling an inverted pendulum system successfully. The result shows that the real system identification using multi-layer linear network gives good result and a multi-layer linear network can stably control the inverted pendulum system. When system parameters change, the multi-layer linear network controller produces better response compared to a two PID loop controller.

### I. GIỚI THIỆU

Hệ thống con lắc ngược là hệ thống phức tạp, không ổn định có tính phi tuyến cao việc điều khiển giữ cho con lắc cân bằng hay thiết kế bộ điều khiển Swing-up là những vấn đề rất được quan tâm trong lĩnh vực điều khiển tự động.

Các thuật toán điều khiển hệ thống con lắc ngược dùng PID, điều khiển trượt, điều khiển mạng nơon (ANN) và điều khiển Logic mờ (Fuzzy) đã thu được một số thành công đáng kể [1-16]. Bộ điều khiển con lắc ngược dùng logic mờ [3] cho kết quả tốt hơn bộ điều khiển PID. Tuy nhiên bộ điều khiển mờ hoạt động chủ yếu phụ thuộc vào kinh nghiệm và phương pháp rút ra kết luận theo tư duy con người, sau đó được cài đặt vào máy tính dựa trên cơ sở logic mờ. Ở bộ điều khiển trượt [4], hai mặt trượt được

xây dựng theo lý thuyết ổn định Lyapunov để điều khiển con lắc ổn định. Tuy nhiên trong phương pháp điều khiển trượt việc tìm kiếm bề mặt trượt của hệ thống là không dễ dàng. Tác giả A.N.K.Nasir và cộng sự đã thiết kế bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển PID để điều khiển cho con lắc ngược [5]. Các tác giả so sánh chất lượng đáp ứng của hệ thống khi sử dụng hai bộ điều khiển này để điều khiển ổn định cho con lắc ngược. Kết quả mô phỏng cho thấy khi bộ điều khiển trượt cho đáp ứng tốt hơn so với bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, khi hai bộ điều khiển này được sử dụng để điều khiển con lắc thì vị trí góc lệch con lắc tương đối lớn.

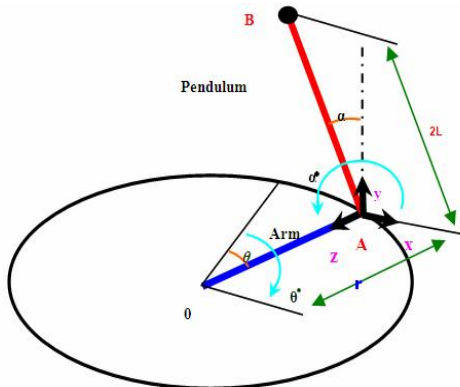
Hầu hết các bộ điều khiển ở trên đều dựa trên hoạt động xung quanh điểm cân bằng. Các bộ điều khiển này sẽ thất bại nếu có bất kỳ sự thay đổi nào xảy ra. Bộ điều

kiểm dùng mạng nơron có thể thích nghi với các thông số của nó và duy trì kiểm soát các quá trình đó mà các bộ điều khiển khác không làm được.

Trong bài báo này, mô hình con lắc ngược được dùng để kiểm chứng lại các thuật toán điều khiển như điều khiển PID, mạng nơron đồng thời các lý thuyết nhận dạng được dùng để ước lượng lại mô hình toán học của hệ thống.

## II. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA HỆ THỐNG CON LẮC NGƯỢC QUAY

Hệ thống con lắc ngược quay như Hình 1 bao gồm một con lắc có khối lượng  $m$ , chiều dài  $2L$  có thể quay tự do, góc của con lắc so với phương thẳng là  $\alpha$ , con lắc được gắn với một thanh nằm ngang có chiều dài  $r$ . Thanh nằm ngang được dùng để di chuyển theo cả hai hướng thuận và ngược với một góc là  $\theta$ .



Hình 1. Mô hình con lắc ngược quay

Hệ phương trình mô tả hệ thống con lắc:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{1}{a} \cdot [b \cdot \cos(\alpha) \cdot \ddot{\alpha} - b \cdot \sin(\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2 - e \cdot \dot{\theta} + f \cdot V_m] \\ \ddot{\alpha} = \frac{1}{c} \cdot [d \cdot \sin(\alpha) + b \cdot \cos(\alpha) \cdot \ddot{\theta}] \end{cases} \quad (1)$$

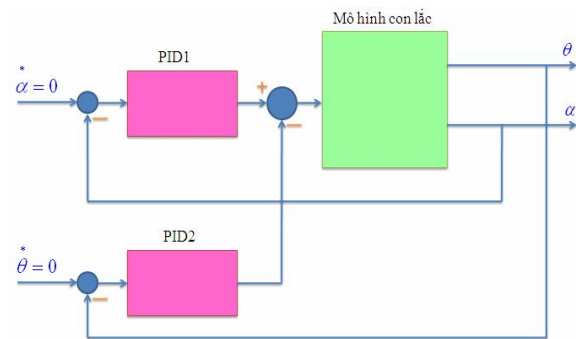
Với

$$\begin{aligned} a &= J_{eq} + mr^2 + J_m & c &= \frac{4 \cdot m \cdot L^2}{3} \\ b &= m \cdot L \cdot r & d &= m \cdot g \cdot l \\ e &= (B_{eq} + \mu_m \cdot K_M \cdot \frac{K_E}{R_m}) & f &= \mu_m \cdot \frac{K_M}{R_m} \end{aligned}$$

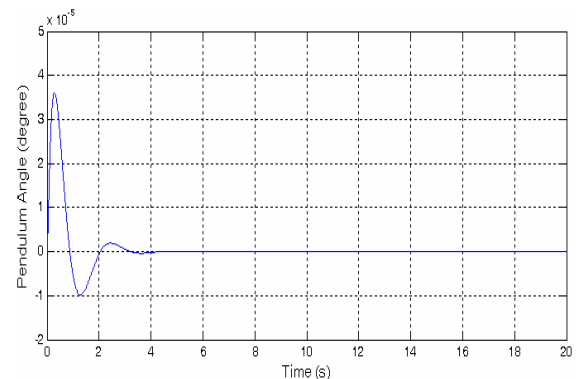
Với góc  $\alpha$  nhỏ, hệ phương trình (1) được tuyến tính hóa thành:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{1}{a} \cdot (b \cdot \ddot{\alpha} - e \cdot \dot{\theta} + f \cdot V_m) \\ \ddot{\alpha} = \frac{1}{c} \cdot (d \cdot \alpha + b \cdot \ddot{\theta}) \end{cases} \quad (2)$$

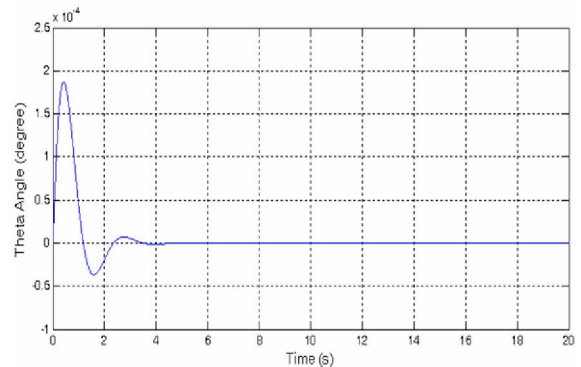
Sơ đồ khối điều khiển con lắc ổn định với bộ điều khiển PID hai biến hồi tiếp cả hai góc  $\alpha$  và  $\theta$  được hiển thị trên Hình 2. Bộ điều khiển PID hai biến cho phép thỏa hiệp của hai bộ điều khiển PID một biến để quyết định giá trị điện áp đặt lên động cơ quay cánh tay. Kết quả mô phỏng trên Hình 3 và Hình 4 cho thấy bộ điều khiển PID hai biến có thể điều khiển ổn định cả hai góc  $\alpha$  và  $\theta$  của con lắc.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển PID 2 biến



Hình 3. Đáp ứng góc  $\alpha$  dùng PID 2 biến

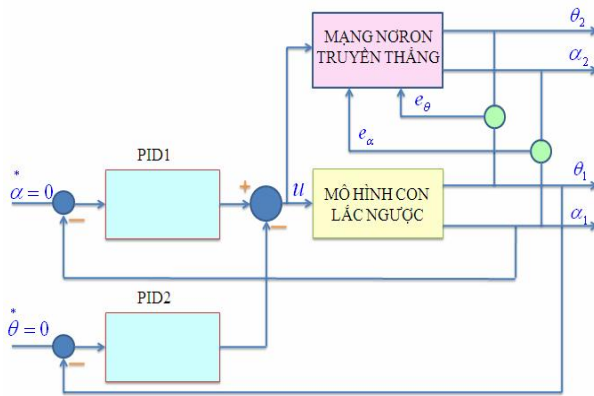


Hình 4. Đáp ứng góc  $\theta$  khi hồi tiếp cả hai góc  $\alpha$  và  $\theta$

Hầu hết các hệ thống ngày nay là phi tuyến và không ổn định do đó mô hình toán không phải luôn luôn tìm được để mô hình hóa. Trong các trường hợp này, mô hình của hệ thống có thể được ước lượng dùng các phương pháp nhận dạng.

### III. NHẬN DẠNG VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG CON LẮC BẰNG MẠNG NƠON TRUYỀN THẰNG

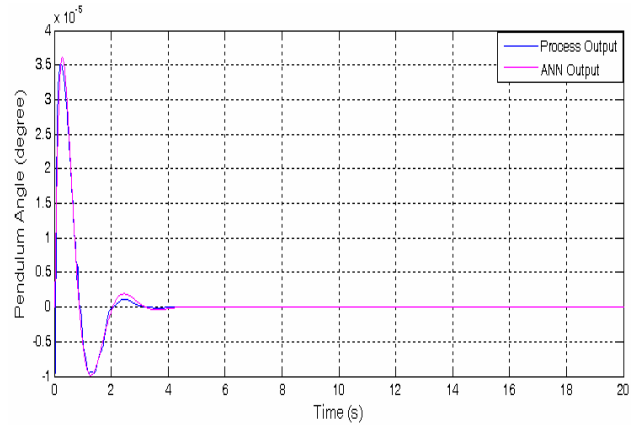
Mạng nơon truyền thẳng (Feed-forward) được huấn luyện để nhận dạng hệ thống con lắc 1 ngõ vào và 2 ngõ ra. Với luật học giám sát việc thu thập dữ liệu vào và ra để huấn luyện mạng được lấy từ mô hình hệ thống con lắc với bộ điều khiển PID hai biến để giữ cho con lắc ổn định. Ngõ vào là tín hiệu điện áp và ngõ ra là góc lệch  $\alpha$  và  $\theta$  của con lắc. Mô hình mạng nơon sau khi huấn luyện được kiểm tra chất lượng bằng cách tính MSE (sai số bình phương trung bình) được trình bày trên Hình 5. MSE là phép đo tốt để xác định độ chính xác của mô hình. MSE giữa mô hình mạng nơon truyền thẳng và mô hình con lắc càng nhỏ càng tốt



Hình 5. Nhận dạng mô hình hệ thống con lắc bằng mạng nơon nhân tạo

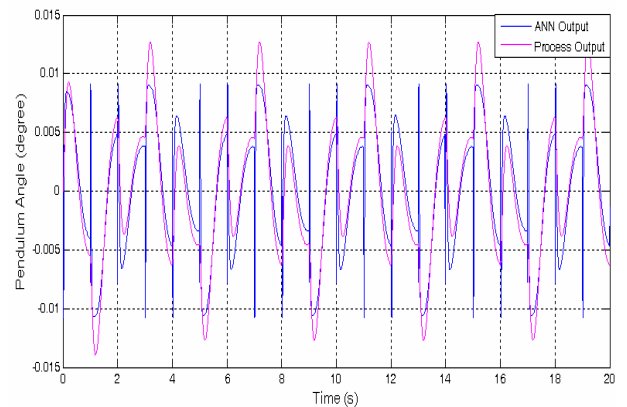
Mạng nơon truyền thẳng có khả năng mô hình hóa con lắc khá tốt. Sai số trung bình bình phương (MSE) nhỏ và mô hình mạng nơon có thể dự đoán được góc lệch của con lắc. Khi thay đổi số nơon của lớp ẩn, giá trị MSE thay đổi. Khi thực hiện nhận dạng với số nơon lớp ẩn khác nhau, trường hợp số nơon lớp ẩn là 40 cho kết

quả nhận dạng tốt nhất về phương diện sai số và thời gian huấn luyện. Đáp ứng thực của góc  $\alpha$  của con lắc và đáp ứng của mô hình nhận dạng bằng mạng nơon truyền thẳng được trình bày trong Hình 6. Kết quả cho thấy mô hình nhận dạng cho kết quả khá tốt.



Hình 6. Kết quả so sánh góc  $\alpha$  giữa mô hình nhận dạng dùng ANN và hệ thống

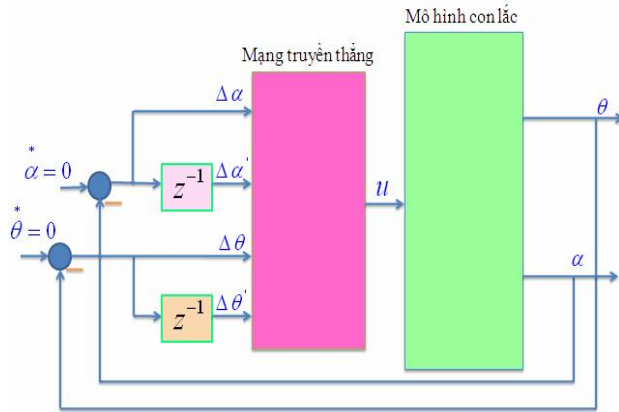
Chất lượng của mô hình nhận dạng mạng truyền thẳng được kiểm tra thêm bằng cách đưa nguồn nhiễu ngẫu nhiên vào hệ thống với biên độ 0.01. Kết quả đáp ứng thể hiện trên Hình 7 cho thấy mạng nơon truyền thẳng cũng thích nghi và nhận dạng khá tốt với sai số khá nhỏ.



Hình 7. Kết quả so sánh góc  $\alpha$  giữa mô hình nhận dạng dùng ANN với hệ thống

Mô hình con lắc được điều khiển bởi bộ điều khiển PID hai biến để ổn định cho con lắc. Một mạng nơon truyền thẳng được huấn luyện để mô phỏng theo bộ điều khiển này. Bộ điều khiển nơon của mạng truyền thẳng sẽ được thiết lập giống như phương pháp nhận dạng mô hình, tức là cũng lấy tín hiệu vào và ra từ bộ điều khiển PID hai biến

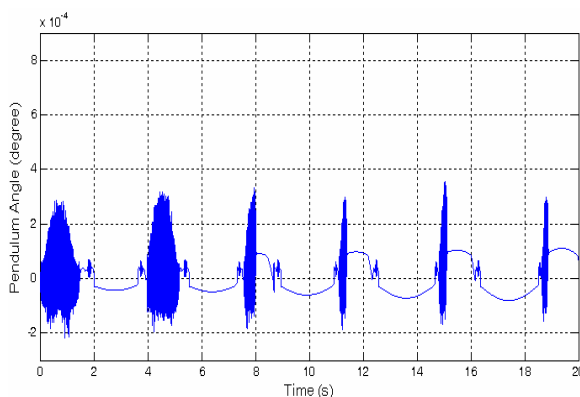
để huấn luyện mạng. Sơ đồ khối điều khiển con lắc bằng mạng nơron truyền thẳng được thể hiện ở Hình 8. Kết quả điều khiển khi sử dụng bộ điều khiển nơron của mạng truyền thẳng được trình bày ở Bảng 1.



Hình 8. Sơ đồ khối điều khiển con lắc bằng mạng nơron truyền thẳng

Bảng 1. Kết quả điều khiển khi sử dụng mạng nơron truyền thẳng

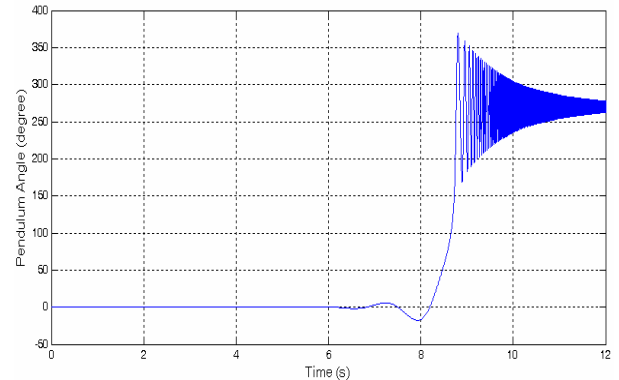
Số nơron lớp ẩn	Số lần huấn luyện	Tốc độ học	Góc $\alpha$ (độ)
4	500	0.0001	-6e-3 đến 6e-3
7	500	0.0001	-1.2e-4 đến 2.5e-4
16	500	0.0001	-1.1e-4 đến 2.5e-4
20	500	0.0001	Quá lớn
50	500	0.0001	Quá lớn



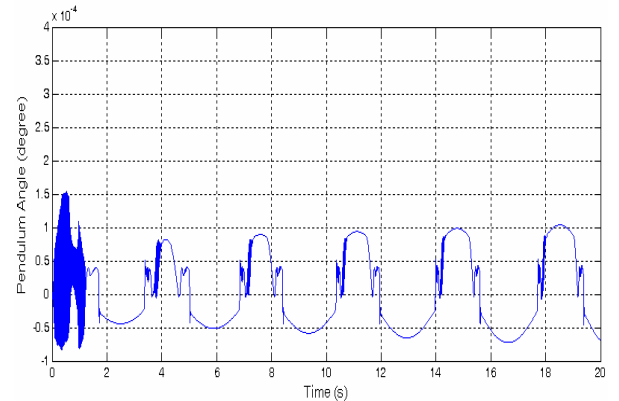
Hình 9. Tín hiệu ngõ ra góc lệch  $\alpha$  với mạng truyền thẳng

Khi khối lượng của con lắc được thay đổi từ 0.125kg đến 1kg thì bộ điều khiển PID hai biến không thể điều chỉnh thích

ngghi cho con lắc ổn định được. Điều này được thể hiện trên Hình 10, kết quả cho thấy bộ điều khiển PID hai biến chỉ giữ con lắc ổn định trong khoảng 7s sau đó con lắc rơi xuống. Nhưng đối với bộ điều khiển nơron của mạng truyền thẳng là nếu những thông số của hệ thống thay đổi thì bộ điều khiển nơron của mạng truyền thẳng sẽ thích nghi để điều khiển cho con lắc ổn định được thể hiện trong Hình 11.



Hình 10. Đáp ứng góc  $\alpha$  của con lắc khi thay đổi m với bộ PID 2 biến



Hình 11. Góc góc  $\alpha$  của lắc khi thay đổi m với mạng truyền thẳng

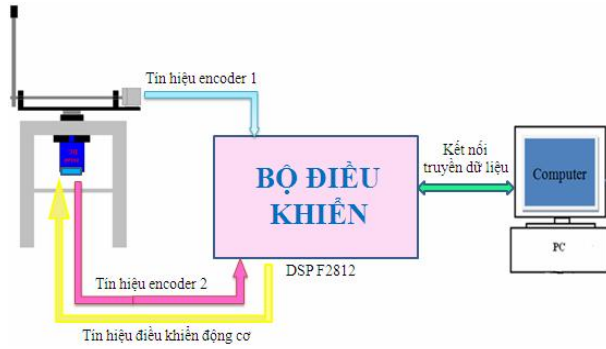
#### IV. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

##### 1. Điều khiển con lắc ngược bằng bộ điều khiển PID hai biến

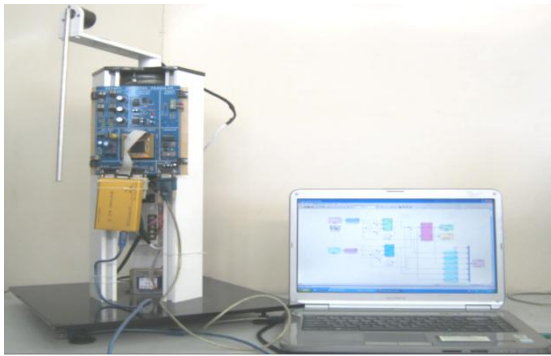
Hệ thống con lắc ngược được điều khiển giao tiếp với máy tính thông qua card DSP-F2812 với sơ đồ điều khiển hệ thống con lắc được thể hiện trên Hình 12 và Hình 13.

Bộ điều khiển PID hai biến sẽ tính toán giá trị ngõ ra dựa trên giá trị sai lệch giữa góc con lắc và góc cánh tay để từ đó quyết định giá trị điện áp đặt lên động cơ

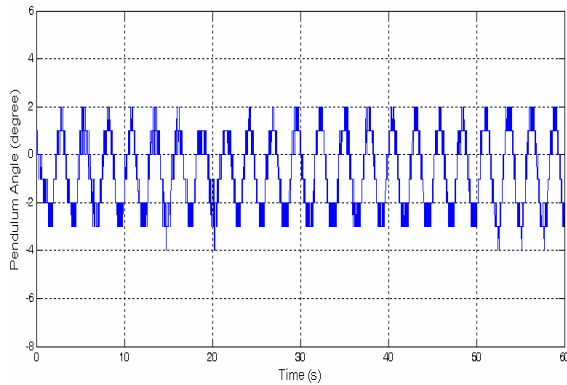
quay cánh tay để điều khiển giữ cho con lắc ổn định. Kết quả đáp ứng góc của con lắc được thể hiện trên Hình 14.



Hình 12. Sơ đồ hệ thống điều khiển con lắc ngược quay



Hình 13. Hệ thống thực nghiệm

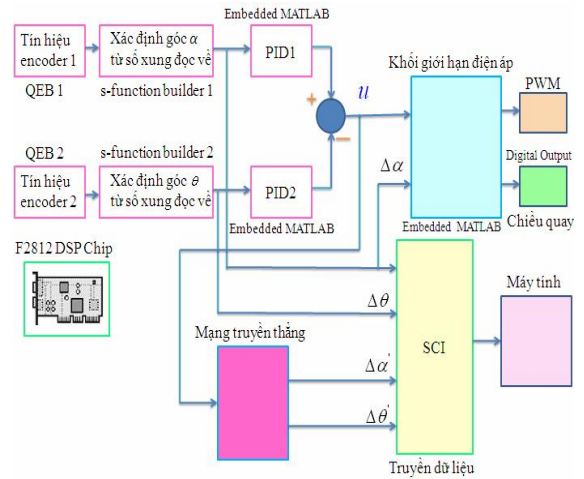


Hình 14. Góc  $\alpha$  của lắc khi điều khiển PID 2 biến

## 2. Nhận dạng hệ thống thực

Mạng truyền thẳng nhiều lớp được sử dụng để nhận dạng mô hình con lắc như Hình 15. Bộ điều khiển PID hai biến dùng để điều khiển giữ cho con lắc ổn định quanh vị trí cân bằng. Tín hiệu điều khiển ngõ vào của hệ thống được đưa vào ngõ vào của mạng truyền thẳng. Tín hiệu sai số giữa ngõ ra mô hình và ngõ ra mạng truyền

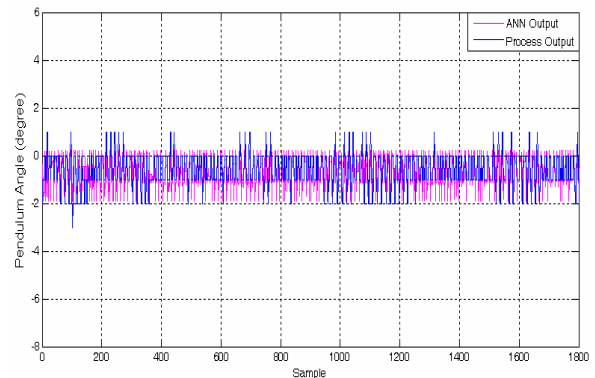
thẳng được dùng để hiệu chỉnh trọng số mạng. Kết quả cho thấy việc nhận dạng hệ thống thực nếu cho số nơron trong lớp ẩn càng tăng thì độ chính xác của mô hình càng giảm sai số càng lớn được thể hiện trong Bảng 2. Kết quả đáp ứng ngõ ra góc con lắc của mạng truyền thẳng so với ngõ ra của mô hình thực được thể hiện trên Hình 16.



Hình 15. Sơ đồ khối nhận dạng hệ thống thực trong Simulink Matlab

Bảng 2. Kết quả khi thay đổi số nơron trong lớp ẩn của mạng truyền thẳng

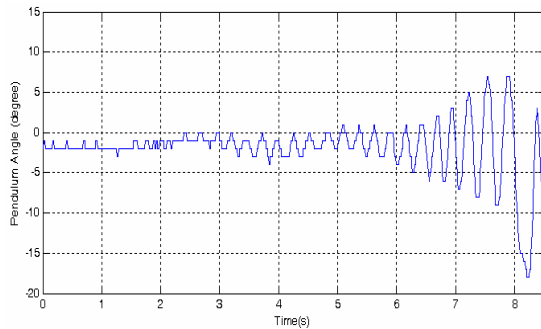
Dạng nơron	Số nơron lớp ẩn	Số lần huấn luyện	Tốc độ học	Sai số
FF	4	1000	0.01	0.0139
FF	10	1000	0.01	0.0141
FF	20	1000	0.01	0.0165
FF	50	1000	0.01	0.0218



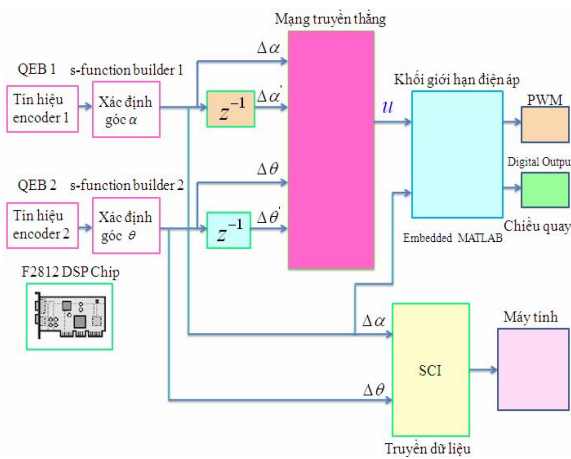
Hình 16. Đáp ứng góc  $\alpha$  ngõ ra của mạng so với ngõ ra của mô hình thực

### 3. Điều khiển con lắc ngược bằng mạng nơ-ron truyền thẳng

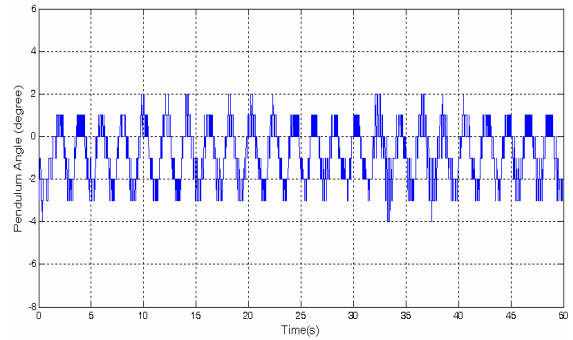
Mạng nơ-ron truyền thẳng được huấn luyện để mô phỏng theo bộ điều khiển PID hai biến để điều khiển giữ ổn định con lắc. Sau khi huấn luyện mạng nơ-ron truyền thẳng mô phỏng theo bộ điều khiển PID hai biến. Bộ điều khiển nơ-ron của mạng truyền thẳng thay thế bộ PID hai biến để điều khiển giữ cho con lắc ổn định như Hình 17. Hình 18 trình bày đáp ứng của góc con lắc khi sử dụng bộ điều khiển của mạng nơ-ron.



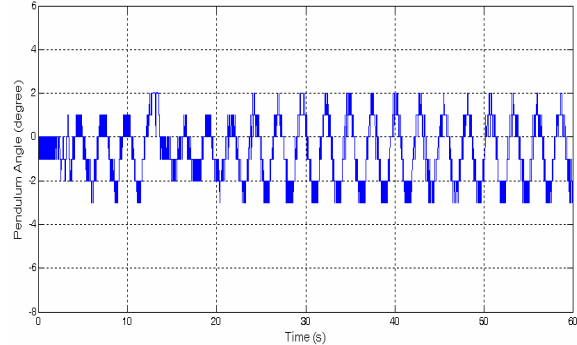
Hình 17. Sơ đồ khối điều khiển con lắc dùng mạng truyền thẳng



Hình 18. Góc  $\alpha$  của con lắc ổn định khi điều khiển dùng mạng truyền thẳng



Hình 19. Thay đổi  $m$  trên con lắc



Hình 20. Đáp ứng góc  $\alpha$  với bộ PID hai biến khi  $m=0.25kg$  đặt ở  $L=32cm$

Khi khối lượng  $m$  của con lắc thay đổi ở vị trí  $L=2cm$  và  $L=16cm$  thì cả hai bộ điều khiển đều điều khiển ổn định hệ thống. Khi khối lượng  $m$  của con lắc thay đổi tới vị trí  $L=32cm$  (Hình 19) thì bộ điều khiển PID không thể điều khiển con lắc ổn định còn bộ điều khiển mạng nơ-ron truyền thẳng thích nghi khá tốt được thể hiện lần lượt ở Hình 20 và Hình 21.



Hình 21. Đáp ứng góc  $\alpha$  với mạng truyền thẳng khi  $m=0.25kg$  đặt ở  $L=32cm$

## V. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày phương pháp nhận dạng hệ thống bằng mạng nơron truyền thẳng nhiều lớp và bộ điều khiển mạng nơron truyền thẳng trong nhận dạng và điều khiển ổn định hệ thống con lắc ngược. Kết quả mô phỏng cho thấy việc nhận dạng hệ thống bằng mạng nơron truyền thẳng nhiều lớp cho kết quả nhận dạng khá tốt. Bộ điều khiển dùng mạng nơron truyền thẳng có khả năng điều khiển thành công hệ thống con lắc. Khi thông số của con lắc như khối lượng và chiều dài cánh tay đòn thay đổi, bộ điều khiển ổn định dùng mạng nơron truyền thẳng có khả năng thích nghi tốt so với việc sử dụng bộ điều khiển PID kinh điển.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Paritala, M.K.a.S., “Simulink of inverted pendulum using neural networks for identification.”
- [2]. Callinan, T., “Artificial Neural Network Identification and control of the inverted pendulum.” August 2003.
- [3]. Tyaki, M.A.a.B., “Design of Fuzzy logic controller for nonlinear model of inverted pendulum-cart system.” December 17-19,2008.
- [4]. Khanesar, M.A., “Sliding Mode Control of Rotary Inverted Pendulum.” Tehran, Iran, July 27-29,2007.
- [5]. A.N.K Nasir, R.M.T Raja, M.A. Ahmad, “Performance Comparison between Sliding Mode Control and PD-PID Controllers for a Nonlinear Inverted Pendulum System.”
- [6]. Johansson, R., *System modelling and identification*. Prentice Hall.
- [7]. Ljung, L., *System Identification-Theory for the User*. Prentice Hall.
- [8]. Billings, S.A., *Introduction to nonlinear system analysis and identification*. Springer-Verlag, Berlin.
- [9]. Nechyba and Xu, (1994), “Neural network approach to control system identification with variable activation functions.” Robotics Institute, Carnegie-Mellon University
- [10]. Guez, A., Selinsky, J., “A trainable neuromorphic controller,” *Journal of robotic systems*, Vol 5, No.4, pp 363-388, 1988.
- [11]. Davalo, *Naim Neural Networks*, Macmillan.
- [12]. Hunt and Sbarbaro, “Neural Networks for Control System—A Survey”, *Automatica*, Vol. 28, 1992, pp. 1083-1112.
- [13]. Neural Network Toolbox Users Guide, October 1998, The Mathworks Inc.
- [14]. Pham and Liu, *Neural Networks for Identification, Prediction and Control*, Springer
- [15]. Narendra K.S., Parthasarathy K., “Identification and control of dynamical systems using neural networks”, *IEEE transactions on neural networks*, Vol.1, No.1, pp 4-27.
- [16]. Billings, S.A., “Introduction to nonlinear system analysis and identification”, in K. Godfrey and P. Jones, *Signal Processing for Control*, Springer-Verlag, Berlin.