

ĐIỀU KHIỂN HỆ PHI TUYẾN DỰA TRÊN GIẢI THUẬT FEEDFORWARD-FEEDBACK

Nguyễn Hoàng Dũng¹

ABSTRACT

The paper presents a novel algorithm basing on feedforward and feedback for controlling the nonlinear system. Feedback will generate transient command and feedforward with steady state command. Feedback is designed with PID (Proportional Integral Derivative) controller. Feedforward is trained basing on Gradient Descent Backpropagation neural network (NN) with adaptive learning rate. It is used to compensate for uncertain factors such as noise from the operation environment. The factors is usually not known before. Therefore the paper is proposed to use neural network for estimating the uncertain systems and maintaining the steadiness of the plant. The feedforward and feedback controllers are applied to control the direct current motor. The result from Simulink simulation software of MATLAB is demonstrated that the responde of the plant tracks the desired signal with overshoot is mearsed 2%, and steady state error is measured $\pm 3\%$, setting and steady-state time are negligible.

Keywords: Neural network, nonlinear system control, feedback, feedforward

Title: Feedforward-Feedback algorithm based nonlinear system control

TÓM TẮT

Bài báo trình bày giải thuật kết hợp giữa bộ điều khiển feedforward và feedback để điều khiển hệ phi tuyến. Feedback phát lệnh điều khiển tức thời và feedforward phát lệnh điều khiển xác lập. Feedback chính là bộ điều khiển PID (Proportional Integral Derivative). Feedforward được huấn luyện dựa trên mạng nơron lan truyền ngược Gradient Descent với tốc độ học thích nghi. Bộ điều khiển này có vai trò bù chính vào các thành phần không xác định có thể xảy ra lúc điều khiển đối tượng. Trong thực tế các đối tượng thường bị tác động bởi nhiều thành phần được cho là nhiễu. Các thành phần này thường không biết trước. Do đó bài báo này được đề nghị sử dụng mạng nơron để ước lượng các thành phần không biết trước nhằm duy trì tính ổn định cho đối tượng. Giải thuật dùng bộ điều khiển feedforward và bộ điều khiển feedback được áp dụng để điều khiển động cơ một chiều. Kết quả mô phỏng trên Simulink của MATLAB cho thấy, đáp ứng của đối tượng bám theo tín hiệu mong muốn với độ vọt lố 2%, sai số xác lập là $\pm 3\%$, thời gian tăng và thời gian xác lập không đáng kể.

Từ khóa: Mạng nơron, điều khiển hệ phi tuyến, feedback, feedforward

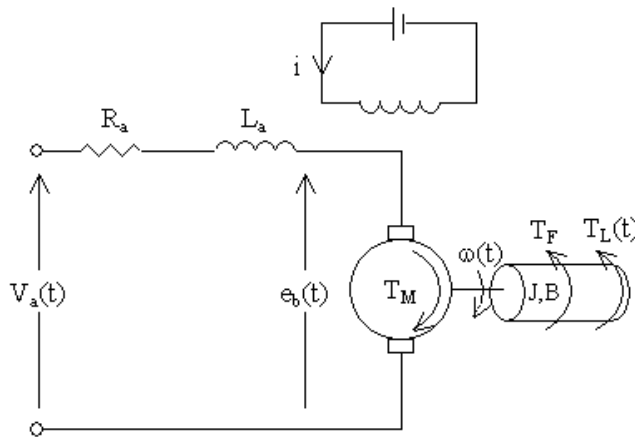
1 GIỚI THIỆU

Feedback là bộ điều khiển vòng kín. Nó có nhiệm vụ giữ cho hệ thống ổn định. Tuy nhiên nếu tín hiệu hồi tiếp về kém chính xác hoặc do nhiễu can thiệp làm bộ điều khiển đưa ra quyết định sai. Chính vì lý do đó, nhiều nhà khoa học đã sử dụng các bộ quan sát (observer) để đảm bảo tín hiệu hồi tiếp lúc nào cũng chính xác. Bên cạnh đó cũng có một số nhà khoa học sử dụng bộ điều khiển feedforward để khắc phục nhược điểm trên. Morteza Mohammadzaheri sử dụng bộ điều khiển

¹ BM Tự động hóa, Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

feedback kết hợp với feedforward để điều khiển đối tượng. Trong đó, feedforward có nhiệm vụ tinh chỉnh đáp ứng như giảm độ vọt lố hoặc bỏ chính vào các thành phần không xác định trong các môi trường khác nhau. Xuemei Ren sử dụng giải thuật feedforward để điều khiển động cơ làm giảm độ rung của đĩa cứng. Richard L. Welch đã kiểm chứng nhiều mạng nơron khác nhau đối với giải thuật feedforward trên cùng tập dữ liệu từ trung tâm khí tượng để dự đoán tốc độ của gió. Richard L. Welch đã kiểm chứng rằng, mạng nơron hồi qui dùng trong giải thuật feedforward sẽ cho kết quả tốt hơn. Dựa trên các kết quả nghiên cứu trên, bài báo này đề nghị giải thuật điều khiển feedforward kết hợp feedback để điều khiển đối tượng phi tuyến. Feedback được thiết kế dựa trên bộ điều khiển PID và Feedforward được huấn luyện dựa trên mạng nơron lan truyền ngược Gradient Descent với tốc độ học thích nghi.

2 MÔ HÌNH ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU



Hình 1: Mô hình động cơ một chiều

Từ Hình 1, phương trình động học của động cơ được xác định:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \tag{1}$$

$$e_b(t) = K_b \omega(t) \tag{2}$$

$$T_M(t) = K_T i_a(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_L(t) + T_F \tag{3}$$

trong đó, các thông số của động cơ được mô tả trong bảng 1 và $V_a(t)$ là tín hiệu ngõ vào, $\omega(t)$ là tín hiệu ngõ ra,

$T_M(t)$: moment quay của motor,

$T_L(t)$: moment tải,

Hầu hết các moment tải phụ thuộc vào vận tốc góc của động cơ

$$T_L(t) = \mu \omega^2(t) (\text{sign}(\omega(t))) \tag{4}$$

Thay biểu thức (1) vào biểu thức (3), suy ra:

$$L_a J \frac{d^2 \omega(t)}{dt^2} + (R_a J + L_a B) \frac{d\omega(t)}{dt} + (R_a B + K_b K_T) \omega(t) + L_a \frac{dT_L(t)}{dt} + R_a [T_L(t) + T_F] + K_T V_a(t) \tag{5}$$

Rời rạc hóa biểu thức (5) trở thành:

$$L_a J \left[\frac{\omega(k+1) - 2\omega(k) + \omega(k-1)}{T^2} \right] + (R_a J + L_a B) \left[\frac{\omega(k+1) - \omega(k)}{T} \right] + (R_a B + K_b K_T) \omega(k) + L_a \left[\frac{T_L(k) - T_L(k-1)}{T} \right] + R_a T_L(k) + R_a T_F + K_T V_a(k) \tag{6}$$

Từ biểu thức (4), suy ra:

$$T_L(k) = \mu \omega^2(k) [\text{sign}(\omega(k))] \tag{7}$$

$$\text{và } T_L(k-1) = \mu \omega^2(k-1) [\text{sign}(\omega(k))] \tag{8}$$

trong đó, T là chu kỳ lấy mẫu

$$\omega(k) = \omega(kT); k = 0,1,2,\dots$$

Từ biểu thức (6) và (8), phương trình điều khiển tốc độ động cơ một chiều được xác định:

$$\omega(k+1) = K_1 \omega(k) + k_2 \omega(k-1) + k_3 [\text{sign}(\omega(k))] \omega^2(k) + k_4 [\text{sign}(\omega(k))] \omega^2(k-1) + k_5 V_a(k) + k_6 \tag{9}$$

trong đó,

$$k_1 = \frac{2L_a J + T(R_a J + L_a B) - T^2(R_a B + K_b K_T)}{L_a J + T(R_a J + L_a B)}$$

$$k_2 = \frac{L_a J}{L_a J + T(R_a J + L_a B)}$$

$$k_3 = \frac{T(\mu L_a + \mu R_a T)}{L_a J + T(R_a J + L_a B)}$$

$$k_4 = \frac{T \mu L_a}{L_a J + T(R_a J + L_a B)}$$

$$k_5 = \frac{K_T T^2}{L_a J + T(R_a J + L_a B)}$$

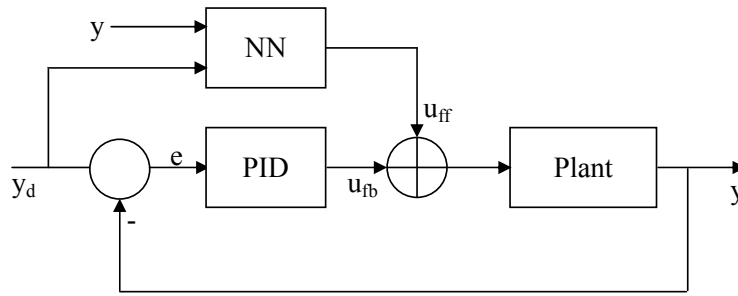
$$k_6 = -\frac{T_F R_a T^2}{L_a J + T(R_a J + L_a B)} \tag{10}$$

Bảng 1: Các thông số sử dụng trong mô hình động cơ một chiều (M Gopal, 2003)

Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
J	Moment quán tính của rotor	0.068	Kg.m ²
B	Hệ số ma sát	0.03475	N.m/(rad/s)
R_a	Điện trở phần ứng	7.56	Ω
L_a	Cảm kháng phần ứng	0.055	H
K_T	Hằng số moment	3.475	N.m/A
K_b	Hằng số suất điện động	3.475	Volts/(rad/s)
μ	Hằng số	0.0039	N.m/(rad/s)
T_F	Moment ma sát	0.212	N.m

3 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN FEEDFORWARD-FEEDBACK

Sơ đồ điều khiển feedforward và feedback được mô tả trong Hình 2.



Hình 2: Sơ đồ điều khiển feedforward-feedback

3.1 Điều khiển Feedback

Luật điều khiển feedback u_{fb} được thiết kế dựa trên bộ điều khiển PID,

$$u_{fb}(k+1) = u_{fb}(k) + k_p * (e(k+1) - e(k)) + T * k_i * e(k) + k_d * \left(\frac{e(k+1) - 2 * e(k) + e(k-1))}{T} \right) \quad (12)$$

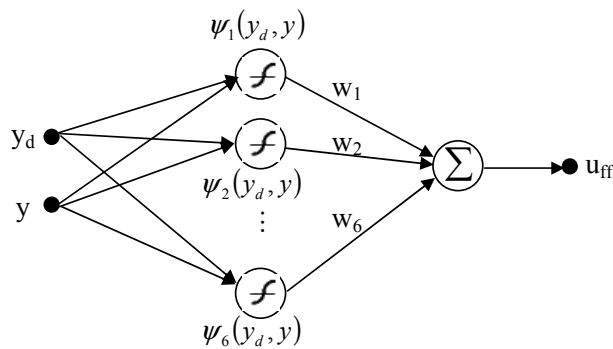
trong đó, $e(k) = y_d(k) - y(k)$, với y là đáp ứng của đối tượng, y_d là tín hiệu mong muốn, k_p là hằng số tỷ lệ, k_i là hằng số tích phân và k_d là hằng số vi phân.

Các hằng số k_p, k_i, k_d được chọn theo phương pháp thử sai.

3.2 Điều khiển feedforward

Do bộ điều khiển feedback được thiết kế bằng bộ điều khiển PID với các hằng số k_p, k_i, k_d được chọn theo phương pháp thử sai nên không thể lường trước được tất cả các thành phần không biết tác động vào hệ thống. Việc tác động này có thể làm cho độ vọt lố và sai số xác lập tăng. Do đó bộ điều khiển feedforward có nhiệm vụ tinh chỉnh đáp ứng của đối tượng bằng cách ước lượng các thành phần không biết trước. Bộ điều khiển này sẽ bù vào các thành phần mà bộ điều khiển feedback không thể kiểm soát được nhằm giảm thiểu vọt lố và sai số xác lập.

Sơ đồ mạng nơron của bộ điều khiển feedforward được trình bày như sau:



Hình 3: Sơ đồ mạng nơron sử dụng giải thuật gradient descent

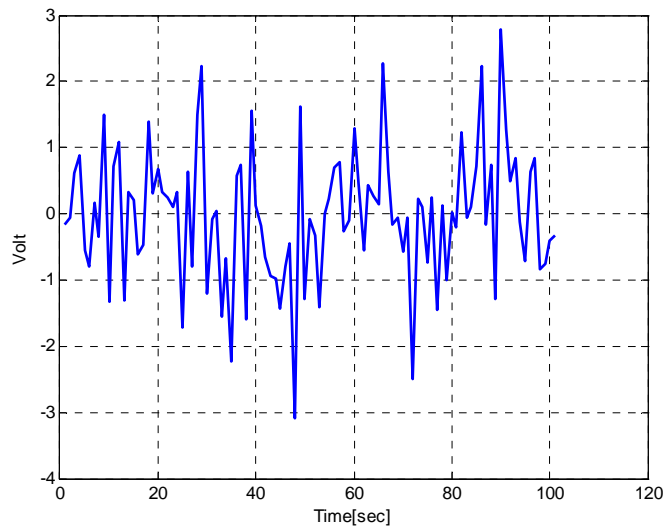
$\psi(y_d, y)$ là hàm tansig

Giải thuật học là gradient descent với luật cập nhật trọng số như sau:

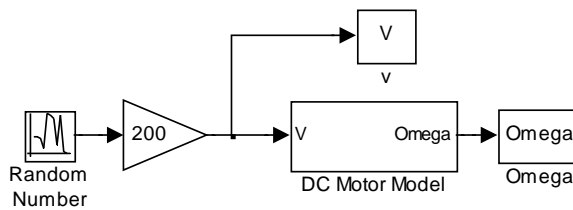
$$w^{k+1} = w^k - \eta \nabla E(w^k)$$

trong đó, η là tốc độ học, w là trọng số cập nhật, E là hàm sai số, $k=0,1,2,\dots$

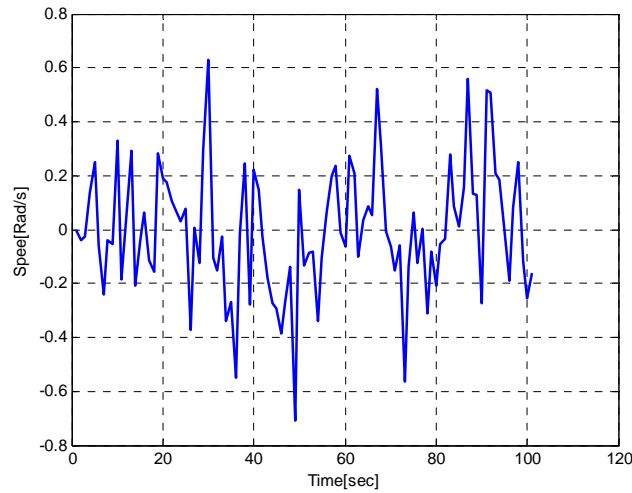
Hình 4 trình bày dữ liệu ngõ vào dùng để huấn luyện mạng. Tập dữ liệu ngõ vào là tín hiệu ngẫu nhiên. Hình 6 thể hiện dữ liệu ngõ ra được dùng để huấn luyện mạng. Sơ đồ lấy mẫu dữ liệu huấn luyện được trình bày ở Hình 5 với V là tín hiệu ngõ vào, Ω là tín hiệu ngõ ra và “DC Motor Model” là mô hình động cơ một chiều. Tập dữ liệu vào ra được lấy trực tiếp trên mô hình này. Tập dữ liệu sau khi lấy mẫu sẽ được huấn luyện offline bằng mạng nơron lan truyền ngược với tốc độ học thích nghi. Nếu độ phù hợp giữa tín hiệu ngõ vào và tín hiệu ngõ ra được huấn luyện đạt 100%, lúc bấy giờ tập dữ liệu vào ra vừa được đưa vào huấn luyện là tập dữ liệu chuẩn cho mô hình.



Hình 4: Dữ liệu huấn luyện ngõ vào là tín hiệu ngẫu nhiên

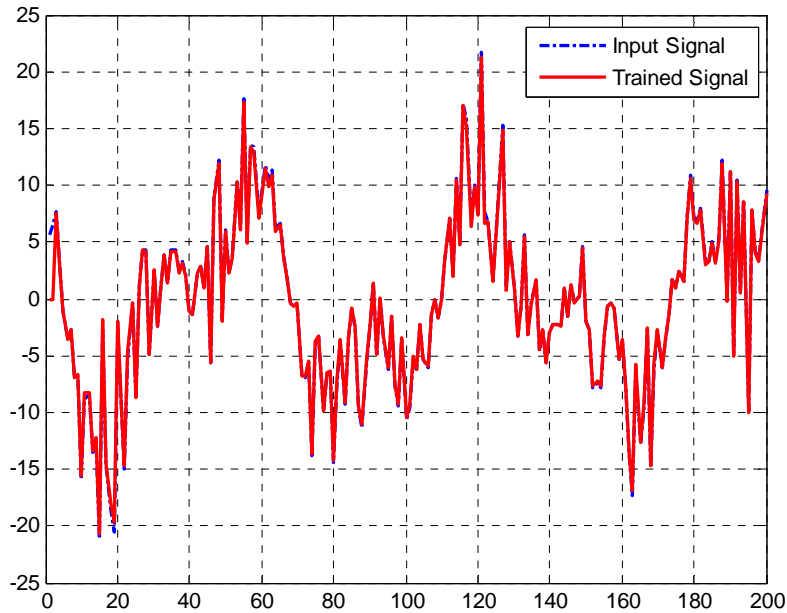


Hình 5: Sơ đồ thu thập dữ liệu ngõ vào và ngõ ra



Hình 6: Tập dữ liệu ngõ ra

Kết quả huấn luyện mạng sử dụng giải thuật lan truyền ngược Gradient Descent với tốc độ học thích nghi cho thấy độ phù hợp giữa tín hiệu vào và tín hiệu được huấn luyện là 100% (xem Hình 7). Kết quả này đã minh chứng cho tập dữ liệu vào ở Hình 4 và tập dữ liệu ra ở Hình 6 là tập dữ liệu chuẩn cho mô hình động cơ một chiều.



Hình 7: Kết quả nhận dạng với tín hiệu vào là ngẫu nhiên kết hợp với tín hiệu hình sin

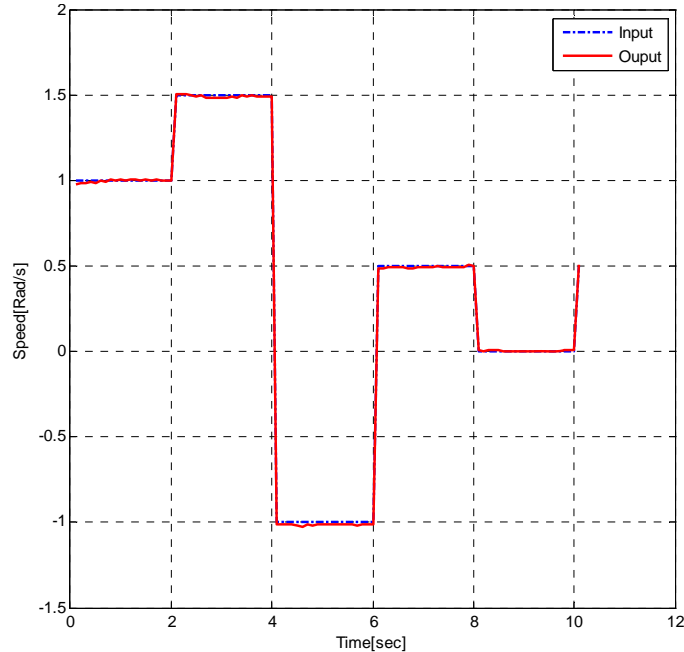
4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Giải thuật điều khiển feedforward-feedback được áp dụng để điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều. Tốc độ đặt là hàm nấc và thay đổi một cách đột ngột. Tuy

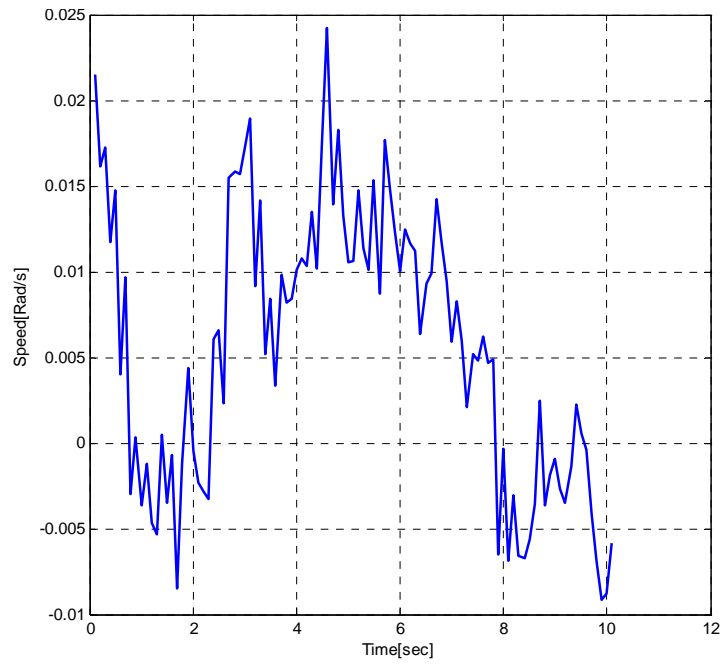
nhiên vấn đề này không làm khó khăn cho giải thuật điều khiển bởi vì bộ điều khiển feedback (sử dụng PID) có đáp ứng khá nhanh và bộ điều khiển feedforward có nhiệm vụ tinh chỉnh sao cho đáp ứng là tốt nhất (với sai số bé nhất). Chẳng hạn như tại thời điểm $t=4s$, tín hiệu đặt thay đổi đột ngột từ $1.5rad/s$ xuống $-1rad/s$ (xem Hình 8). Tại thời điểm này, bộ điều khiển feedback-feedforward (xem Hình 12) đã thể hiện tốt vai trò bằng cách đưa tốc độ động cơ bám sát tốc độ đặt trước. Hơn thế nữa, tín hiệu nhiễu được thêm vào hệ thống để đảm bảo tính ổn định cho hệ thống. Tín hiệu nhiễu là tín hiệu ngẫu nhiên với trung bình bằng không và phương sai là 0.8. Kết quả mô phỏng cho thấy độ vọt lố là 2%, sai số xác lập đạt $\pm 3\%$ (xem Hình 9), thời gian tăng và thời gian xác lập không đáng kể.

Luật điều khiển feedback (xem Hình 10) giữ vai trò chính để đảm bảo tốc độ động cơ luôn luôn bằng với tốc độ mong muốn tại những thời điểm khác nhau. Luật điều khiển feedforward (Hình 11) có nhiệm vụ dời tọa độ của luật điều khiển feedback để đảm bảo tốc độ động cơ luôn bám theo tốc độ đặt khi có nhiễu hoặc các thành phần khác tác động vào hệ thống. Luật điều khiển feedback-feedforward (xem Hình 12) là tổng của luật điều khiển feedback và luật điều khiển feedforward.

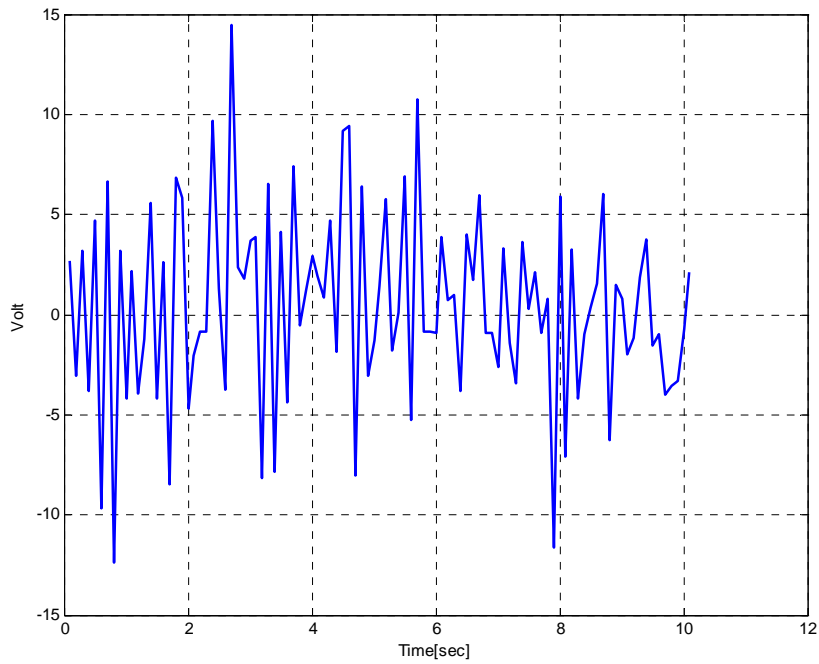
Nếu giữ cùng điều kiện (không đổi tín hiệu vào, tín hiệu nhiễu) và không sử dụng bộ điều khiển feedforward thì đáp ứng của động cơ có độ vọt lố tăng lên gần gấp đôi 3.36% và sai số xác lập tăng lên $\pm 5\%$ (xem Hình 13)



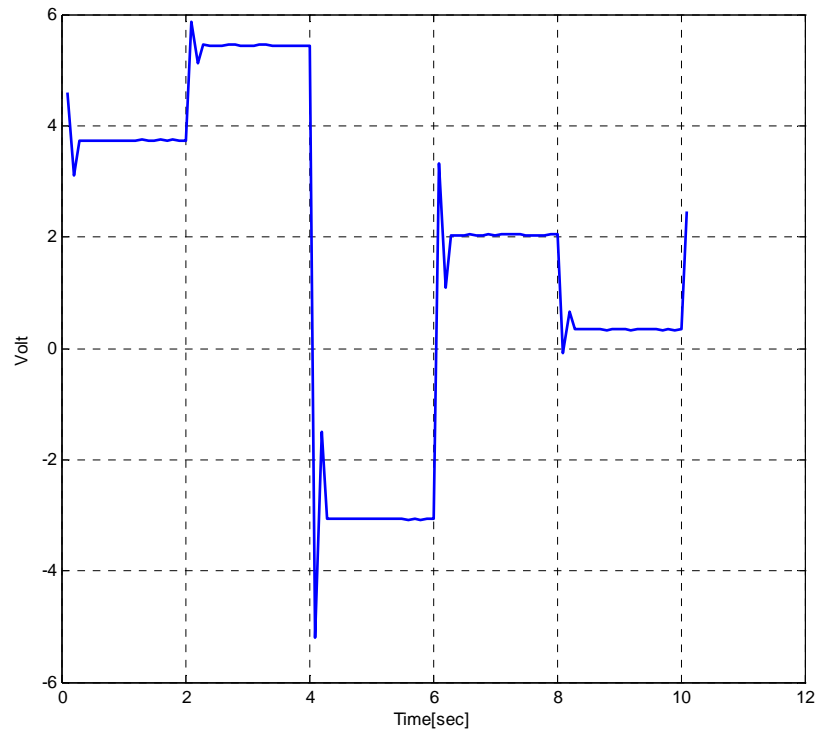
Hình 8: Đáp ứng tốc độ của động cơ điện một chiều



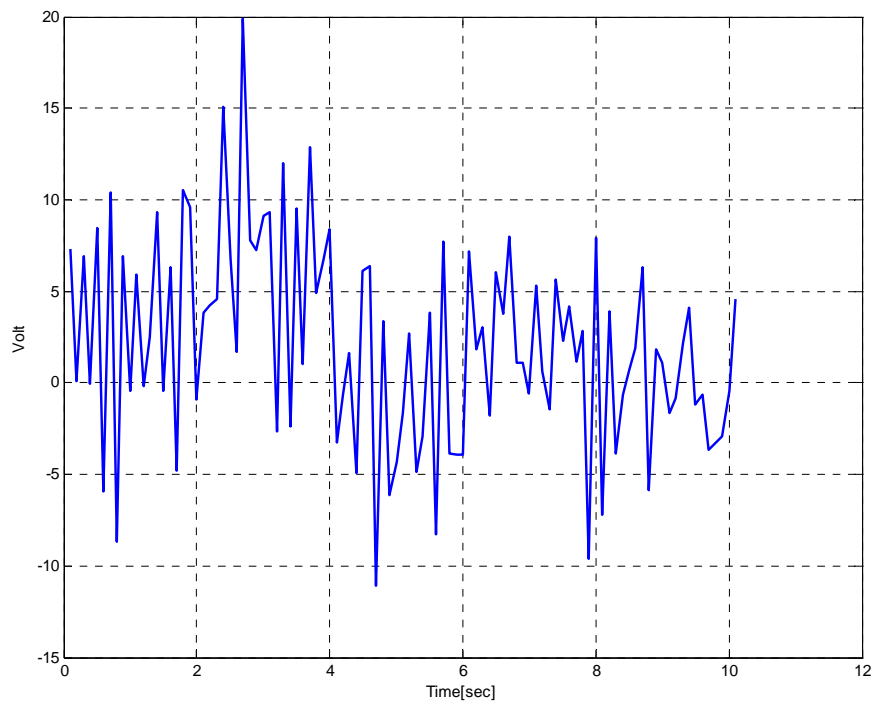
Hình 9: Tín hiệu nhiễu



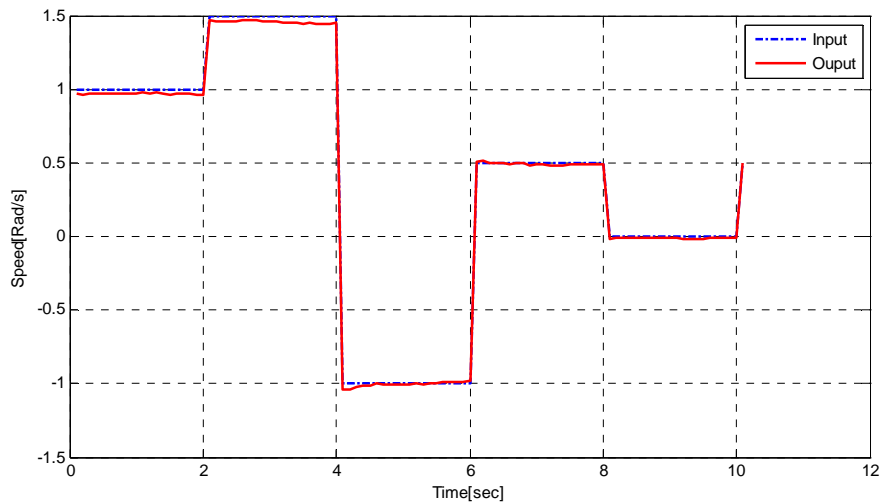
Hình 10: Luật điều khiển feedback



Hình 11: Luật điều khiển feedforward



Hình 12: Luật điều khiển feedback-feedforward



Hình 13: Đáp ứng tốc độ động cơ một chiều không sử dụng bộ điều khiển feedforward

5 KẾT LUẬN

Bằng cách kết hợp giữa giải thuật điều khiển feedback (bộ điều khiển PID) với bộ điều khiển feedforward (được huấn luyện dựa trên mạng nơron lan truyền ngược Gradient Descent với tốc độ học thích nghi), luật điều khiển feedforward-feedback đã khắc phục được nhược điểm của bộ điều khiển feedback (nhiều hoặc các thành phần khác không biết tác động vào trong khi các tham số k_p , k_i , k_d được chọn bằng phương pháp thử sai). Giải thuật điều khiển feedback-feedforward được áp dụng để điều khiển tốc độ động cơ một chiều. Với giải thuật này, kết quả mô phỏng điều khiển trên MATLAB cho thấy, tốc độ động cơ bám theo tốc độ đặt với độ vọt lố 2%, sai số xác lập $\pm 3\%$, thời gian tăng và thời gian xác lập không đáng kể. So với bộ điều khiển PID kinh điển, bộ điều khiển sử dụng mạng nơron (bộ điều khiển feedforward) kết hợp với PID (bộ điều khiển feedback) sẽ làm giảm độ vọt lố và sai số xác lập.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

M Gopal, 2003. *Digital control & state variable methods-conventional & neural-fuzzy control system*; 2nd edition, Tata MacGraw-Hill, p765-776

Morteza Mohammadzaheri and Lei Chen, 2009. *A design approach for feedback-feedforward control systems*, 2009 IEEE international conference in control and automation, New Zealand December 9-11, 2009, pp2266-2271

Richard L. Welch, Stephen M. Ruffing, and Ganesh K. Venayagamoorthy, 2009. *Comparison of feedback and feedforward neural network architecture for short term wind speed prediction*; Proceeding of international joint conference on neural network, USA, June 14-19, 2009, pp3335-3340

Xuemei Ren, Frank L. Lewis, Jingliang Zhang, and Shuzhi Sam Ge, 2009. *Feedforward Control Based on Neural Networks for Hard Disk Drives*; IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 45, No. 7, pp3025-3030