



SPEED CONTROL FOR THE TRAIN OF URBAN RAILWAY USING FUZZY-D CONTROLLER

Nguyen Van Tiem

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 19/2/2019

Revised: 13/8/2019

Accepted: 01/6/2020

Published online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.1>

* *Corresponding author*

Email: nguyenvantiem@utc.edu.vn; Tel: 0904226592

Abstract. Automatic train operation (ATO) system has two main functions including the speed control and stop control. This paper proposes a Fuzzy-Derivative controller (Fuzzy-D) for controlling the urban railway train speed. The structure of the proposed controller contains two components of proportion and derivation. The coefficient of the proportional component is calculated based on fuzzy logic with two inputs of the train speed error and the derivative of the train speed error. The effectiveness of the proposed Fuzzy-D controller is verified by simulating the urban train speed control system on Matlab. The proposed Fuzzy-D controller is improved the quality of train speed control and train stop control.

Keywords: PID – proportional integral derivative, ATO – automatic train operation, train speed system, fuzzy logic control.



ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ ĐOÀN TÀU ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ KẾT HỢP VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN VI PHÂN

Nguyễn Văn Tiêm

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 19/2/2019

Ngày nhận bài sửa: 13/8/2019

Ngày chấp nhận đăng: 01/6/2020

Ngày xuất bản Online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.1>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenvantiem@utc.edu.vn; Tel: 0904226592

Tóm tắt. Hệ thống vận hành tàu tự động (ATO) có hai chức năng chính đó là điều khiển tốc độ và điều khiển dừng tàu. Trong bài báo này thiết kế bộ điều khiển tốc độ đoàn tàu đường sắt đô thị trên cơ sở logic mờ và kết hợp với khâu vi phân (Fuzzy-D). Cấu trúc bộ điều khiển được thiết kế bao gồm hai thành phần tỷ lệ và vi phân. Hệ số của thành phần tỷ lệ được tính toán dựa trên cơ sở logic mờ với hai đầu vào là sai số tốc độ và vi phân sai số tốc độ của đoàn tàu. Hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất Fuzzy-D được đánh giá bằng mô phỏng hệ thống điều khiển tốc độ của đoàn tàu đường sắt đô thị trên Matlab. Bộ điều khiển đề xuất Fuzzy-D đã nâng cao được chất lượng điều khiển tốc độ chạy tàu và điều khiển dừng tàu.

Từ khóa: PID - bộ điều khiển tỷ lệ vi tích phân, hoạt động tàu tự động, hệ thống tốc độ tàu hỏa, điều khiển mờ.

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với sự phát triển của tàu điện ngầm, tàu điện metro đường sắt đô thị trên thế giới, tốc độ chạy và mật độ vận chuyển của tàu đang tăng dần, các yêu cầu thoải mái và đúng giờ ở mức cao hơn, do đó chế độ vận hành bằng tay không đáp ứng được nhu cầu thực tế. Nhiều công trình nghiên cứu tập trung vào việc sử dụng máy tính điều khiển để giúp điều khiển lái tàu an toàn, thoải mái, đúng lịch trình, vận hành tiết kiệm và dừng tàu chính xác [2]. Công nghệ

ATO (viết tắt của hoạt động tàu tự động) đó là sự tích hợp máy tính, truyền thông, tín hiệu và điều khiển, lý thuyết trí tuệ nhân tạo để tạo thành một hệ thống điều khiển tự động. Hệ thống cho phép tàu có thể tăng tốc, giảm tốc để chạy tàu tự động trong phạm vi cho phép. Các giải pháp không chỉ có thể đảm bảo an toàn của tàu và sự thoải mái của hành khách, mà còn tăng hiệu quả vận hành của tàu và tiết kiệm năng lượng. Chắc chắn rằng ATO sẽ thay thế hoạt động của con người trong tương lai gần. Các nghiên cứu gần đây về thiết kế các bộ điều khiển nhằm nâng cao chất lượng điều khiển tốc độ cũng như điều khiển dừng tàu và được tiến hành từ mức độ đơn giản đến phức tạp [4, 5, 6]. Trong [2], đưa ra hai phương án điều khiển tốc độ của tàu đó là bộ điều khiển PID và PID-nơ ron. Trong đó PID-nơ ron được thiết trên cơ sở một nơ ron nhân tạo. Trong [3] đưa ra bộ điều khiển tốc độ tàu dựa trên logic mờ, phương pháp mà [3] đưa ra đó là chỉ sử dụng bộ điều khiển mờ thuần túy. Tuy nhiên kết quả mô phỏng của [3] cho thấy chất lượng điều khiển tốc độ của tàu vẫn còn sai lệch tốc độ cũng như điều khiển dừng tàu. Việc ứng dụng logic mờ kết hợp với bộ điều khiển PD kinh điển [8, 9] đã đem lại tính tác động nhanh của hệ thống điều khiển.

Trong bài báo này thiết kế bộ điều khiển tốc độ đoàn tàu đường sắt đô thị bằng việc sử dụng bộ điều khiển mờ kết hợp với bộ điều khiển vi phân kinh điển nhằm nâng cao chất lượng điều khiển tốc độ cũng như điều khiển dừng tàu. Hiệu quả của bộ điều khiển mà bài báo đề xuất sẽ được đánh giá so sánh với bộ điều khiển mờ thuần túy [3] bằng phương pháp mô phỏng trên máy tính.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA TÀU

Khi tàu đang chuyển động, có ba lực tác động chủ yếu đến hoạt động của tàu, đó là lực kéo, lực cản chạy và lực phanh.

Lực kéo: Đầu ra của motor điện là lực kéo, giá trị của nó được xác định bằng phương pháp nội suy tuyến tính từ đường cong tốc độ. Nếu biết lực kéo w_1 ở tốc độ v_1 và lực kéo w_2 ở tốc độ v_2 thì ta tính được lực kéo bất kỳ w_x ở tốc độ v_x [2]:

$$w_x = w_1 + \frac{(v_x - v_1)(v_2 - v_1)}{v_2 - v_1} \quad (1)$$

Lực cản chạy: Khi tàu đang chạy thì có 2 lực cản, đó là lực cản cơ bản và lực cản phụ. Biểu thức tính lực cản cơ bản [2] được tính theo công thức:

$$w_0 = a + bv + cv^2 \quad (2)$$

trong đó a, b và c là hằng số thực nghiệm phụ thuộc vào loại tàu.

Lực cản phụ là lực cản do đường dốc, đường cong và đường hầm trên đường ray (trong hệ thống tàu điện ngầm, đường hầm có thể bị bỏ qua, vì đây là một phần của lực cản cơ bản). Lực cản phụ được tính toán [2, 3] như sau:

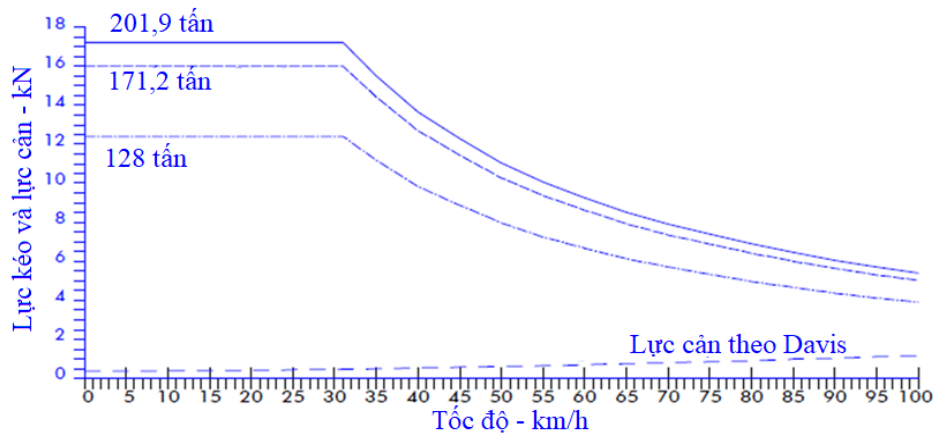
$$w_j = w_i + w_r + w_s = \begin{cases} i + \frac{600}{R} + 0,00013L, & \text{khi } (R > L_c) \\ i + \frac{600}{R} \frac{L_r}{L_c} + 0,00013L_s, & \text{khi } (R \leq L_c) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: w_i, w_r, w_s lần lượt là lực cản dốc, lực cản cong và lực cản đường hầm; i là độ dốc của đoạn đường ray; R là bán kính đường cong; L_c là chiều dài của đoàn tàu; L_r là chiều

dài của đường cong; L_s là chiều dài của hầm.

Lực phanh: Khi phanh, lực phanh bao gồm lực phanh điện động và lực phanh bằng khí [1] được sử dụng để giúp dừng tàu. Phanh điện động là lực phanh chính để điều khiển tốc độ của tàu. Phương pháp để đạt được giá trị của phanh điện động giống như lực kéo, phụ thuộc vào đường đặc tính lực hãm của hệ truyền động [2]. Trong quá trình tàu đang hoạt động, các lực tác động lên tàu là rất phức tạp, khi ở chế độ vận hành khác nhau, tàu chịu ảnh hưởng của các lực khác nhau. Vì vậy, thật khó để có được mô tả hàm truyền của tàu bằng cách tính toán lực.

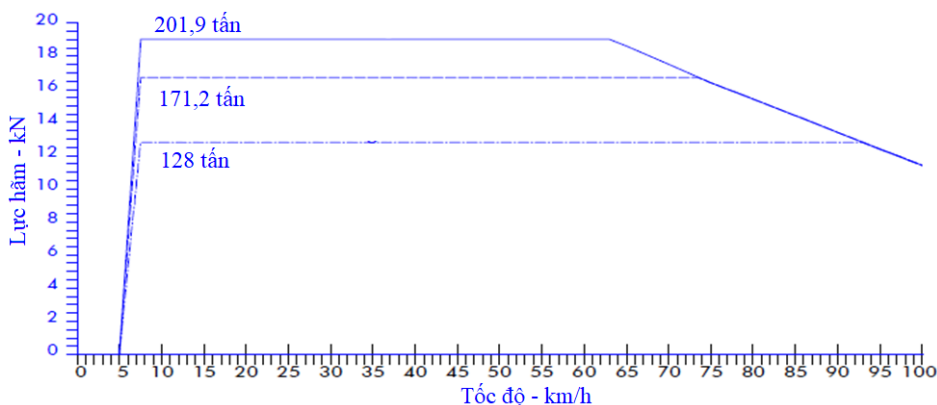
Đoàn tàu xem xét trong bài báo này với mô hình toán của đoàn tàu gồm 4 toa dùng cho đường sắt đô thị [2], có hai toa chủ động với 04 động cơ điện kéo. Thông số của 1 động cơ điện kéo: Công suất 190 kW, đặc tính sức kéo như Hình 1.



Hình 1. Đặc tính sức kéo.

Lực cản cơ bản được sử dụng với các tham số cho đoàn tàu điện đô thị [7] như sau: $a = 2,965 \text{ N}$; $b = 0,23 \text{ Ns/m}$; $c = 0,005 \text{ Ns}^2/\text{m}^2$.

Đặc tính của lực hãm điện của hệ truyền động như Hình 2.

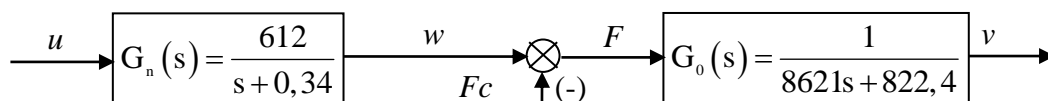


Hình 2. Đặc tính của lực hãm điện của hệ truyền động.

Nhận dạng mô hình đoàn tàu, trong [2] sử dụng phương pháp tối thiểu bình phương sai số tốc độ: chọn trước mô hình toán của đoàn tàu, kích thích tín hiệu vào đoàn tàu và mô hình đoàn tàu, tính sai số giữa tốc độ thực với tốc độ của mô hình $e = v_{\text{tàu}} - v_{\text{mô_hình}}$; tối thiểu phiếm hàm e^2 sẽ hiệu chỉnh lại tham số mô hình sao cho mô hình toán nhận dạng được gần với mô hình thực tế đoàn tàu. Theo đó [2] đã nhận dạng được hàm tuyến của đoàn tàu:

$$G(s) = G_n(s)G_0(s) = \frac{612}{s + 0,34} \frac{1}{8621s + 822,4} \quad (4)$$

trong đó $G_n(s)$ là hàm truyền của tàu, với đầu vào là nguồn điện và đầu ra là lực kéo của tàu; $G_0(s)$ là phần biến thiên của tàu, với đầu vào là lực kéo trừ lực cản, đầu ra là tốc độ của đoàn tàu. Mô hình được thể hiện trong Hình 3 như sau [3].



Hình 3. Sơ đồ khối của hàm truyền hệ thống.

Trong đó u, w, F_c, v lần lượt là tín hiệu điều khiển, lực kéo, lực cản, tốc độ của tàu; $F = w - F_c$. Mô hình này sẽ được sử dụng để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển thiết kế.

3. TỔNG HỢP CÁC BỘ ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ CỦA TÀU

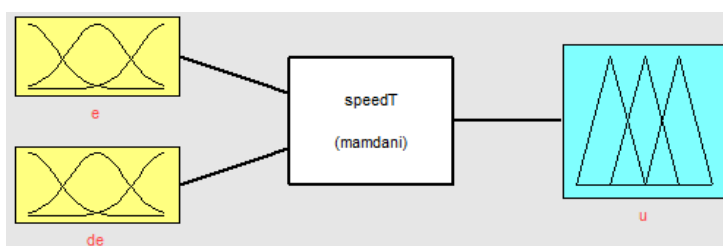
3.1. Tổng hợp bộ điều khiển PID cho điều khiển tốc độ tàu

Bộ điều khiển PID sẽ tính toán điện áp để điều khiển tốc độ của tàu khi tàu chuyển động trên đường ray có những độ dốc lên, dốc xuống, đường cong và đường bằng. Với mô hình điều khiển tốc độ tàu ở trên, có nhiều phương pháp để tổng hợp bộ PID [10]. Theo [2] sử dụng công cụ PID tự chỉnh trong matlab và đã xác định được tham số của bộ PID là:

$$k_p = 2,774; k_i = 0,214; k_d = 4,088 \quad (5)$$

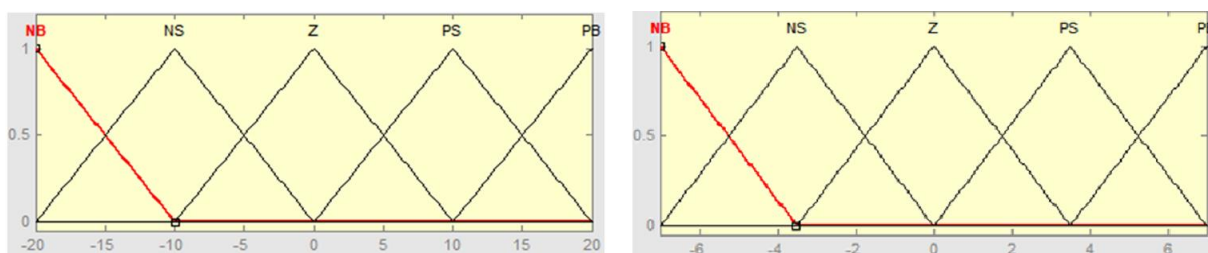
3.2. Tổng hợp bộ điều mờ cho điều khiển tốc độ tàu

Với bài toán này, công trình [3] đã đưa ra bộ điều khiển mờ như sau:



Hình 4. Bộ điều khiển mờ SpeedT.

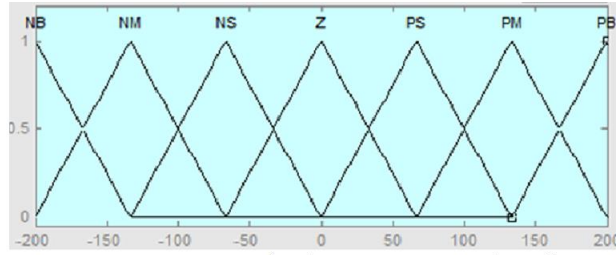
Mờ hóa các đầu vào ra cho bộ điều khiển mờ như Hình 5 và Hình 6. Luật mờ cho bộ SpeedT như Bảng 1. Giải mờ theo phương pháp điểm trọng tâm. Theo [3] bộ điều khiển mờ hình 4 cho chất lượng điều khiển tốc độ tàu tốt hơn bộ PID (5).



Hàm liên thuộc của biến đầu vào "e" - sai số tốc độ.

Hàm liên thuộc của biến đầu vào "de"- tốc độ thay đổi của sai số.

Hình 5. Mờ hóa sai số tốc độ e và de của bộ điều khiển mờ điều khiển tốc độ tàu - SpeedT.



Hàm liên thuộc của biến đầu ra "u" - tín hiệu điều khiển.

Hình 6. Mờ hóa tín hiệu điều khiển u.

Bảng 1. Bảng luật cho bộ điều khiển mờ SpeedT [3].

<i>de</i>	<i>e</i>				
	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>
<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
<i>Z</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>PS</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
<i>PB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>

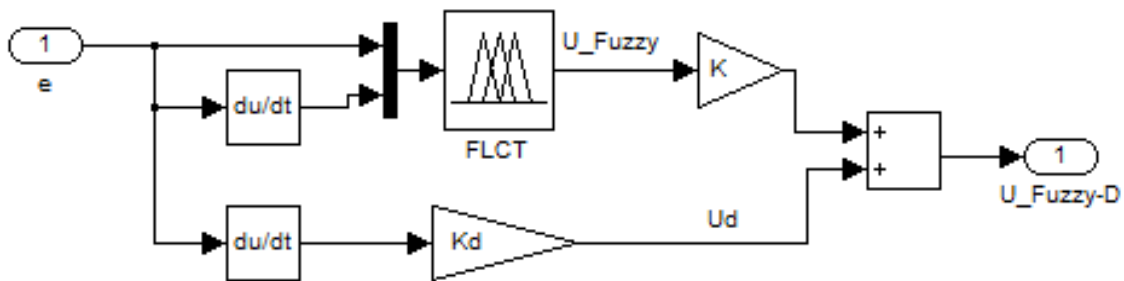
3.3. Tổng hợp bộ điều khiển mờ kết hợp với khâu vi phân điều khiển tốc độ tàu

Bộ điều khiển mờ kết hợp với khâu vi phân mà bài báo thiết kế như sau:

$$U_{Fuzzy-D} = K.U_{Fuzzy} + U_D; U_D = K_D \dot{e}(t). \quad (6)$$

U_{Fuzzy} được tính toán bằng bộ điều khiển mờ với 2 đầu vào là sai số tốc độ của tàu và đạo hàm của sai số tốc độ tàu. Một đầu ra U_{Fuzzy} là một phần của tính toán nguồn tín hiệu điều khiển, điều khiển lực kéo của tàu.

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển Fuzzy-D như Hình 7.

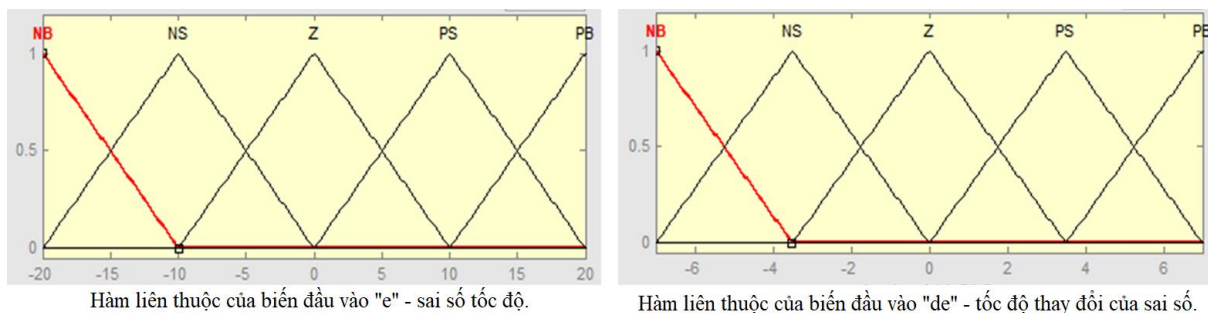


Hình 7. Cấu trúc bộ điều khiển Fuzzy-D cho điều khiển tốc độ của tàu.

Mờ hóa các đầu vào ra của bộ FLCT như sau: $e = \{NB, NS, Z, PS, PB\}$;

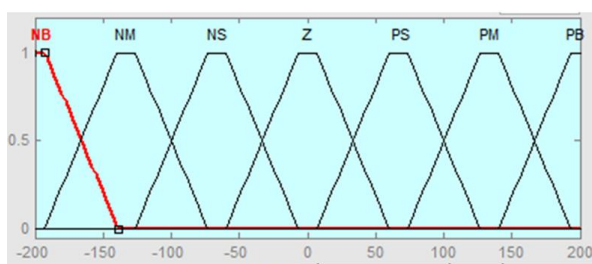
$\dot{e} = \{NB, NS, Z, PS, PB\}$; $U_{Fuzzy} = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$.

Giá trị của các tập mờ vào/ ra của bộ FLCT như trên Hình 8 và Hình 9.



Hình 8. Mờ hóa đầu vào e và de cho bộ FLCT.

Luật mờ cho bộ điều khiển mờ FLCT như Bảng 2, phương pháp giải mờ được chọn là phương pháp điểm trọng tâm. Sau khi thiết kế xong bộ FLCT, với hệ số $K = 10$; $K_D = 0,05$. Bộ điều khiển Fuzzy-D điều khiển tốc độ tàu được hoàn chỉnh như Hình 10.

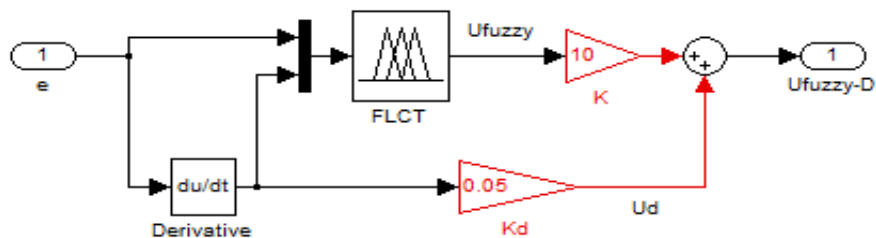


Hàm liên thuộc của biến đầu ra "Ufuzzy" - tín hiệu điều khiển.

Hình 9. Mờ hóa đầu ra cho bộ FLCT.

Bảng 2. Bảng luật cho bộ điều khiển mờ FLCT.

<i>de</i>	<i>e</i>				
	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>
<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
<i>Z</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>PS</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
<i>PB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>



Hình 10. Bộ điều khiển Fuzzy-D điều khiển tốc độ tàu.

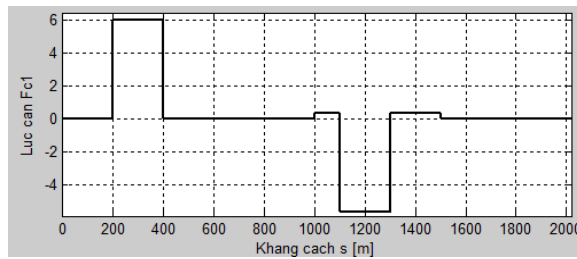
Bộ điều khiển (6) lúc này được cụ thể hóa như biểu thức (7)

$$U_{Fuzzy-D} = 10U_{Fuzzy} + 0,05\dot{e}(t) \tag{7}$$

Bộ điều khiển Fuzzy-D (7) có cấu trúc đơn giản và hiệu quả trong điều khiển tốc độ tàu khi tàu di chuyển trên đường ray có các đoạn dốc lên, dốc xuống, đường cong và điều khiển dừng tàu.

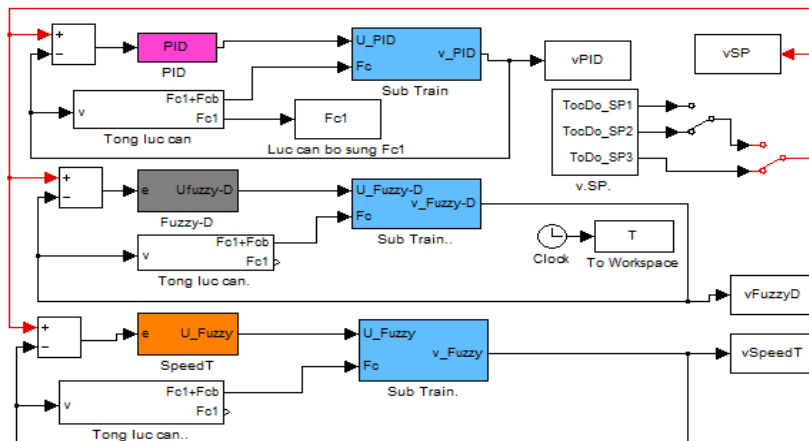
4. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ TÀU

Tham số mô phỏng như sau: Chiều dài của đoàn tàu là 80 m; tàu di chuyển trên đường ray và giới hạn tốc độ chung là 15 m/s. Tàu phải dừng (tốc độ 0 m/s) sau khoảng cách 2 Km. Bán kính đường cong được giả định là 500 m, bỏ qua lực cản của đường hầm. Từ 1000 m đến 1500 m là đường cong, trong đó giới hạn tốc độ là 10,5 m/s. Từ 200 m đến 400 m là đường dốc lên có giá trị độ dốc là $+6\%$. Từ 1100 m đến 1300 m là đường dốc xuống, có giá trị độ dốc là -6% . Khoảng cách còn lại là đường bằng và thẳng. Khoảng 100 m trước khi tàu hướng về đường cong hoặc dừng lại, tốc độ tàu phải được thay đổi để điều chỉnh giới hạn tốc độ quy định. Từ các thông số trên, theo (3) ta xác định được tổng lực cản bổ sung như Hình 11.



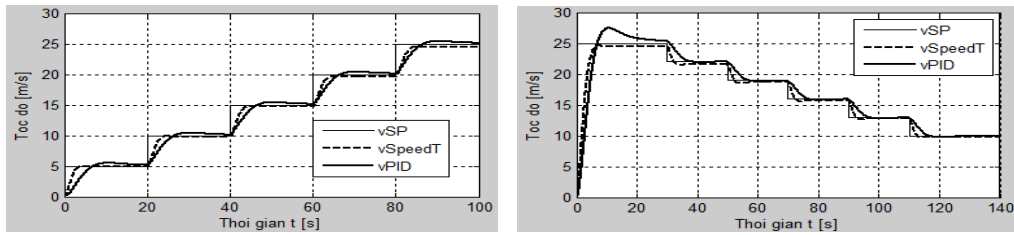
Hình 11. Lực cản bổ sung Fc1.

Để đánh giá hiệu quả của các bộ điều khiển tốc độ tàu, bài báo mô phỏng đồng thời 3 hệ thống điều khiển tương ứng với 3 bộ điều khiển PID, SpeedT và Fuzzy-D.

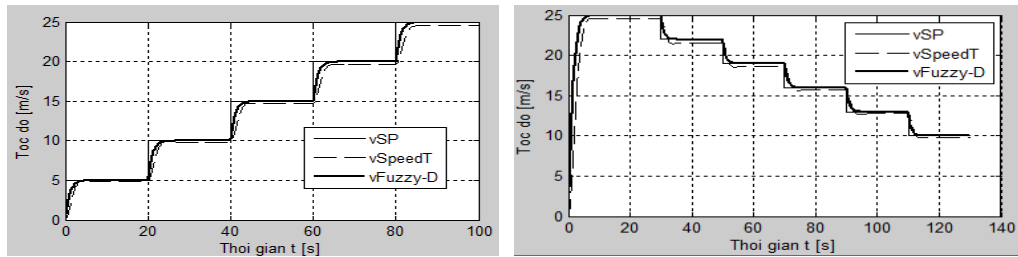


Hình 12. Hệ thống điều khiển tốc độ tàu với bộ điều khiển PID, mờ và Fuzzy-D.

Chương trình mô phỏng như Hình 12. Kết quả mô phỏng đáp ứng tốc độ tàu theo thời gian như các Hình 13 và Hình 14. Từ Hình 13 và Hình 14 ta thấy đáp ứng tốc độ của tàu với bộ điều khiển Fuzzy-D có chất lượng điều khiển tốt hơn so với bộ mờ SpeedT và tốt hơn nhiều so với bộ PID, ở mỗi đoạn tăng/giảm tốc độ, bộ Fuzzy-D cho thời gian quá độ nhanh nhất.



Hình 13. Đáp ứng tốc độ của tàu khi tăng và giảm tốc độ với PID và SpeedT.

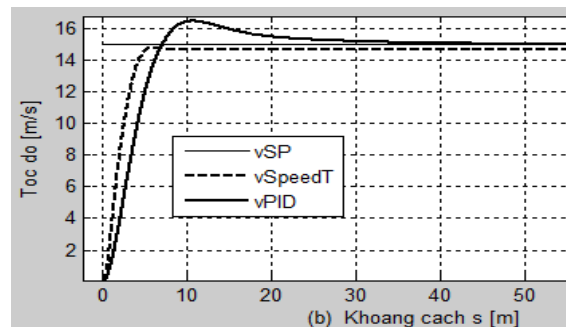
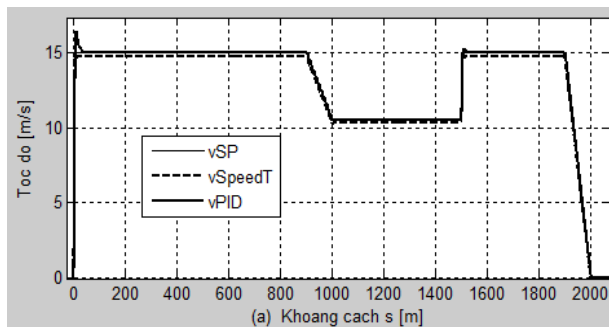


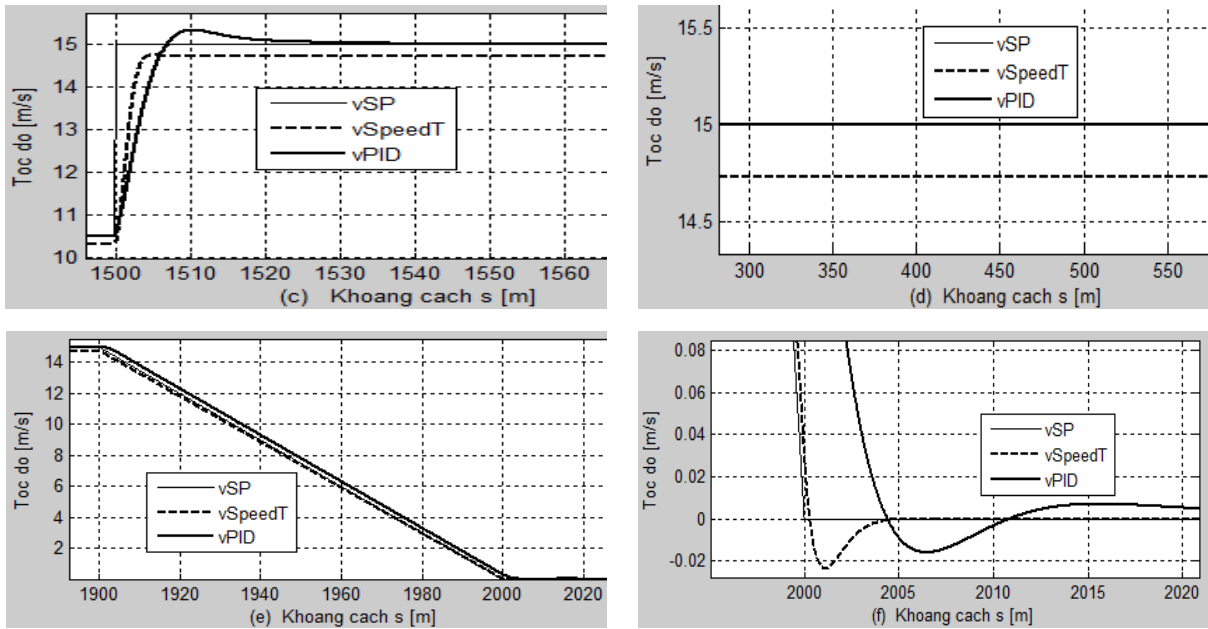
Hình 14. Đáp ứng tốc độ của tàu khi tăng và giảm tốc độ với SpeedT và Fuzzy-D.

Kết quả mô phỏng điều khiển tốc độ tàu và dừng tàu như các Hình 15 và Hình 16. Từ Hình 15 cho thấy, đáp ứng tốc độ của bộ PID ở giai đoạn đầu (Hình 15 b) có độ quá điều chỉnh 9,7%; sau khoảng 30 m tàu mới đạt được tốc độ 15 m/s; không có sai lệch tĩnh. Bộ điều khiển mờ SpeedT có độ quá điều chỉnh 0,2%, sau khoảng 12 m tàu bám được tốc độ đặt, tuy nhiên gặp phải sai lệch tĩnh 0,272 m/s (Hình 15 d). Từ Hình 16 b cho thấy, đáp ứng tốc độ của bộ Fuzzy-D ở giai đoạn đầu có độ quá điều chỉnh xấp xỉ 0%, sai số xác lập 0,028 m/s; sau khoảng 4,5 m tàu đạt được tốc độ 15 m/s.

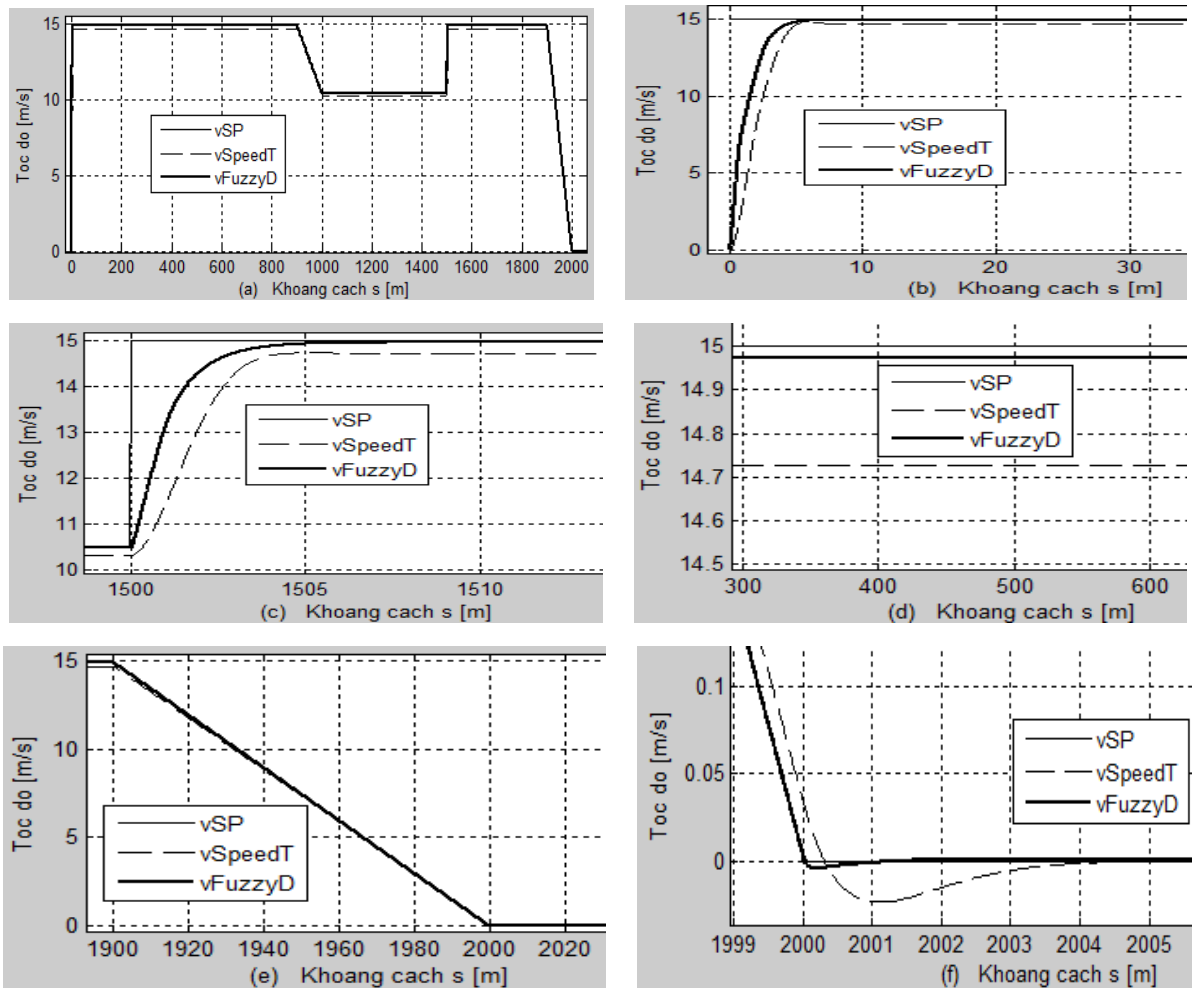
Quan sát đoạn cuối điều khiển dừng tàu trên Hình 15 f và Hình 16 f cho thấy: sai số khoảng cách dừng tàu với bộ điều khiển PID là 30 m; với bộ điều khiển mờ SpeedT là 4,5 m; với bộ điều khiển Fuzzy-D là 1 m.

Nhận xét: Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ Fuzzy-D (7) khi áp dụng cho điều khiển tốc độ đoàn tàu đường sắt đô thị đã nâng cao được chất lượng điều khiển. Điều khiển được tốc độ tàu theo tốc độ đặt điều khiển trong khi tàu di chuyển trên đường ray có các đoạn dốc lên, dốc xuống, đường bằng và đường cong. Quan sát tốc độ của tàu trong quá trình điều khiển ta thấy là đường trơn, không có dao động, do đó gia tốc của tàu là trơn, không có dao động. Có được hiệu quả điều khiển tốc độ tàu và dừng tàu trên là do bộ Fuzzy-D mà bài báo đã thiết kế tận dụng được tính tác động nhanh của khâu vi phân kinh điển kết hợp với tính phi tuyến linh động của logic mờ.





Hình 15. Đáp ứng điều khiển tốc độ tàu và dừng tàu với bộ PID và bộ mờ SpeedT.



Hình 16. Đáp ứng điều khiển tốc độ tàu và dừng tàu với bộ mờ SpeedT và bộ Fuzzy-D.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã thiết kế được bộ điều khiển mờ kết hợp với khâu vi phân (Fuzzy-D) cho điều khiển tốc độ đoàn tàu đường sắt đô thị. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển Fuzzy-D mà bài báo đưa ra đã nâng cao được chất lượng điều khiển tốc độ tàu và điều khiển dừng tàu, khi tàu chuyển động trên đường ray có những đoạn đường bằng, đường dốc lên, dốc xuống và đường cong. Bộ điều khiển Fuzzy-D đã điều khiển được tốc độ của tàu theo tốc độ đặt và điều khiển dừng tàu tốt hơn bộ điều khiển mờ SpeedT [3] và tốt hơn nhiều so với bộ điều khiển PID. Bộ điều khiển Fuzzy-D có khả năng áp dụng vào điều khiển tốc độ tàu đường sắt đô thị Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. C. Cruceanu, "Train Braking", Reliability and safety in railway, Intech, 2012, pp. 29-74.
- [2]. Chen Xiangxian, Zhang Yue, Huang Hai, Train speed control algorithm based on PID controller and single-neuron PID controller, IEEE computer society, 2010, pp. 107-110. <https://doi.org/10.1109/GCIS.2010.41>
- [3]. Reza Dwi Utomo, Sumardi, Eko Didik Widiyanto, Control system of Train Speed Based on Fuzzy Logic Controller, Int, Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), Indonesia, 2015, pp. 256-261. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2015.7437809>
- [4]. Yuan Cao, Lianchuan Ma, Yuhuo Zhang, Application of fuzzy predictive control technology in automatic train operation, Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2258-0>
- [5]. Jianzhi Yu, Yongsheng Chen, Automatic Speed Control Algorithm Study Based on Fuzzy-predictive Control Logic, Applied Mechanics and materials, Vols 195-196, 2012, pp. 1163-1168. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.195-196.1163>
- [6]. Gao Bing, Dong Hairong, Zhang Yanxin, Speed Adjustment Bracking of Automatic Train Operation System based on Fuzzy-PID Switching Control, Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009, pp. 577-580. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2009.735>
- [7]. Alnu Alnuman, Daniel Gladwin, Martin Foster, Electrical modelling of a DC railway system with multiple trains, Energies, 11 (2018) 3211. <https://doi:10.3390/en11113211>
- [8]. N.V. Tiêm, Thiết kế bộ điều khiển PD mờ bền vững cho điều khiển tốc độ của xe lai điện, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 55 (2016) 41-46.
- [9]. N.V. Tiêm, Thiết kế bộ điều khiển PF-D cho điều khiển tốc độ của xe ô tô, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, số đặc biệt (2015) 257-262.
- [10]. N.D. Phước, Lý thuyết điều khiển tuyến tính, NXB KHKT, 2009.