

MÔ HÌNH HÓA VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHUN NHIÊN LIỆU TRONG ĐỘNG CƠ XĂNG

MODELING AND CONTROL OF THE FUEL INJECTION SYSTEM IN GASOLINE ENGINE

Lê Đức Hiếu^{1,*}, Nguyễn Trung Kiên¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.014>

TÓM TẮT

Bài báo này đề cập đến việc xây dựng mô hình mô phỏng điều khiển hệ thống phun xăng điện tử (EFI) trang bị trên động cơ xăng. Dựa trên các mô hình vật lý, mô hình toán học đã được đề xuất để xây dựng mô hình mô phỏng điều khiển hệ thống phun xăng EFI bằng phần mềm Matlab-Simulink. Kết quả mô phỏng đảm bảo tính tin cậy, chính xác, là cơ sở lý thuyết cho việc nghiên cứu thiết kế các hệ thống cơ điện tử trên động cơ đốt trong cũng như trên ô tô. Tiết kiệm được thời gian, chi phí trong thiết kế chế tạo các bộ điều khiển điện tử trang bị trên hệ thống cơ điện tử ô tô.

Từ khóa: Phun xăng, bộ điều khiển điện tử, cơ điện tử ô tô.

ABSTRACT

This paper refers to the construction of a simulation model to control the electronic fuel injection system (EFI) equipped with a gasoline engine. Based on physical models, mathematical models have been proposed to build a simulation model to control the EFI using Matlab-Simulink software. Simulation results ensure reliability and accuracy, which is the theoretical basis for the study and design of mechatronic systems on internal combustion engines as well as in automobiles. Saving time and costs in designing and manufacturing electronic controllers equipped with automotive mechatronic systems.

Keywords: Fuel injection, electric control unit, automotive mechatronic.

¹Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: hieuld@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/11/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 22/12/2022

Ngày chấp nhận đăng: 24/02/2023

1. TỔNG QUAN

Động cơ đốt trong sử dụng nhiên liệu xăng, đốt cháy hỗn hợp nhiên liệu không khí bằng tia lửa điện (Spark Ignition - SI) đang được dùng phổ biến trên các phương tiện vận tải ngày nay. Với tiến bộ của khoa học công nghệ, các hệ thống điều khiển điện-điện tử trên động cơ ô tô đang được cải tiến liên tục nhằm nâng cao hiệu suất động cơ, giảm thiểu phát thải các thành phần độc hại ra môi trường.

Để đạt được mục tiêu trên, đòi hỏi việc điều khiển hệ thống nhiên liệu động cơ sao cho tỷ lệ hòa trộn nhiên liệu, không khí phải tối ưu với từng chế độ làm việc của động cơ. Ban đầu, việc hòa trộn này nhờ bộ chế hòa khí nhưng có quá nhiều nhược điểm. Giải bài toán phức tạp này, hệ

thống phun xăng điện tử đã ra đời nhằm khắc phục nhược điểm của bộ chế hòa khí cũng như đạt được mục tiêu mong muốn.

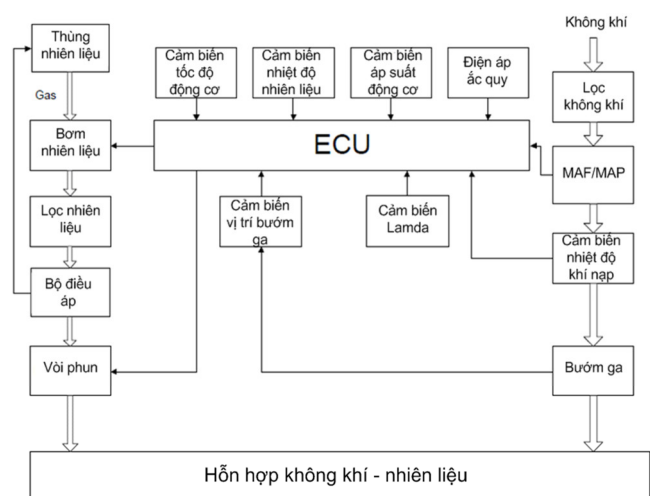
Trong hệ thống phun xăng điện tử, bộ điều khiển điện tử - ECU đóng vai trò bộ não của hệ thống, tiếp nhận thông tin từ các cảm biến, tính toán tối ưu các thông số để đưa ra quyết định lượng phun, thời điểm phun phù hợp với các chế độ làm việc của động cơ đốt trong.

Có nhiều công trình nghiên cứu về mô phỏng và điều khiển hệ thống nhiên liệu động cơ đốt trong như Gogola [1] mô phỏng điều khiển hệ thống nhiên liệu cho động cơ một xi lanh, Mostafa Abdulrahman Kortam, cải tiến hệ thống nhiên liệu diesel truyền thống thành hệ thống nhiên liệu diesel có điều khiển điện tử cho động cơ 4 xi lanh [2-4]. Các nghiên cứu này cơ bản đã hoàn thành mục tiêu đề ra, bên cạnh đó còn hạn chế độ chính xác chưa cao.

Trong bài báo này, các tác giả trình bày về xây dựng mô hình, thuật toán điều khiển hệ thống nhiên liệu động cơ xăng cho động cơ 4 xi lanh bằng phần mềm Matlab-Simulink. Kết quả nghiên cứu là cơ sở lý thuyết cho việc nghiên cứu, thiết kế mô hình điều khiển hệ thống phun xăng điện tử EFI, phục vụ nghiên cứu và đào tạo ngành công nghệ kỹ thuật ô tô, cơ điện tử ô tô tại các cơ sở đào tạo.

2. MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHUN XĂNG EFI

2.1. Mô hình vật lý



Hình 1. Mô hình vật lý của hệ thống phun xăng điện tử EFI

Xuất phát từ cấu trúc và phân tích đặc điểm làm việc của hệ thống phun xăng EFI, làm cơ sở xây dựng mô hình vật lý của hệ thống, đảm bảo các tính năng làm việc của hệ thống. Các thành phần được tìm hiểu, phân tích và kết hợp với nhau thành mô hình vật lý như hình 1. Bao gồm các cảm biến giám sát các thông số của động cơ: tốc độ, nhiệt độ, áp suất, lưu lượng khí nạp... đây là các thông số cần thiết cho quá trình tính toán thời điểm phun nhiên liệu.

2.2. Tính toán thời gian phun

2.2.1. Thời gian phun cơ bản

Theo [5], thời gian phun cơ bản được tính theo phương pháp dòng khí hoặc theo mật độ không khí, cụ thể như sau:

Tính toán thời gian phun cơ bản theo phương pháp dòng khí nạp. Nếu như cảm biến lưu lượng khí nạp được lắp đặt trong hệ thống, thì lượng khí nạp A_m [kg] là xác định, từ đó xác định được lượng nhiên liệu M [kg] theo công thức (1):

$$M = \frac{A_m}{\lambda} [kg] \tag{1}$$

trong đó, λ là tỉ lệ không khí - nhiên liệu.

Khi xác định được lượng nhiên liệu M , ta có thể tính được độ rộng xung phun cơ bản t [s] theo công thức (2):

$$t = \frac{M}{R_f} [s] \tag{2}$$

trong đó, R_f [kg/s] là tỉ lệ phân phối nhiên liệu của kim phun.

Tính toán thời gian phun cơ bản bằng phương pháp đo mật độ không khí. Phương pháp này sử dụng khi cảm biến lưu lượng không khí chưa được tích hợp vào hệ thống. Khi đó tính toán thời gian phun cơ bản sẽ tính theo cảm biến nhiệt độ, cảm biến tốc độ và EGR tuần hoàn khí thải của động cơ, theo công thức (3):

$$A_v = \left[\left(\frac{n}{60} \frac{D}{2} \eta_v \right) - EGR_v \right] [m^3 \cdot s^{-1}] \tag{3}$$

trong đó, A_v [m³.s⁻¹] là lưu lượng thể tích không khí, η_v là hiệu suất thể tích, EGR [m³.s⁻¹] tuần hoàn khí thải và D [m³] dung tích động cơ.

Mật độ không khí trong đường ống nạp được xác định theo công thức (4):

$$\rho_a = \rho_0 \frac{p_i}{p_0} \frac{T_0}{T_i} [kg \cdot m^{-3}] \tag{4}$$

trong đó p_i [Pa] là áp suất của khí nạp, T_i [K] là nhiệt độ của khí nạp, ρ_0 [kg.m⁻³], p_0 [Pa] và T_0 [K] mật độ, áp suất và nhiệt độ theo điều kiện tiêu chuẩn. Nếu tốc độ dòng khối lượng của không khí A_r [kg.s⁻¹] được xác định bởi công thức (5):

$$A_r = \rho_a \cdot A_v [kg \cdot s^{-1}] \tag{5}$$

Và tốc độ khối lượng nhiên liệu được xác định theo công thức (6):

$$M_r = \frac{A_r}{\lambda} [kg \cdot s^{-1}] \tag{6}$$

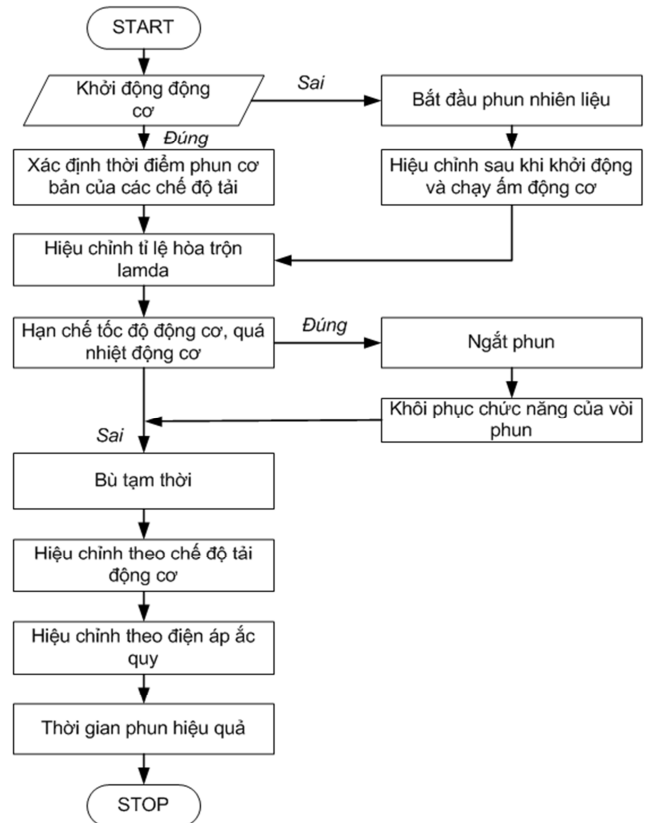
Khi đó thời gian phun được tính bằng công thức (7):

$$t = \frac{M_r}{R_f} t_{ref} [s] \tag{7}$$

trong đó, t_{ref} [s] là thời gian phun tham chiếu được tính trên cơ sở tốc độ động cơ (RPM).

2.2.2. Thời gian phun hiệu quả

Khoảng thời gian hiệu quả của phun nhiên liệu được xác định sau khi các giá trị hiệu chỉnh bổ sung được tính toán lại. Các giá trị hiệu chỉnh được tính toán từ các chức năng đặc biệt, trong đó các điều kiện vận hành động cơ khác nhau được tính đến. Thuật toán tính toán thời gian phun hiệu quả được thể hiện trong sơ đồ hình 2. Điều quan trọng cần lưu ý là trong trường hợp lượng nhiên liệu phun thấp, một hỗn hợp không cháy được chuẩn bị, do đó giới hạn thời gian phun nhiên liệu tối thiểu phải được xác định để ngăn ngừa sự hình thành các hydrocarbon chưa cháy trong khí thải. Trong quá trình khởi động động cơ, một tính toán riêng về thời gian phun nhiên liệu diễn ra không phụ thuộc vào tải và tốc độ động cơ. Hình 2 cho thấy sơ đồ của mô hình toán học phun nhiên liệu, được đề xuất theo nghiên cứu của nhiều tài liệu khác nhau. Lưu đồ chứa tất cả các chức năng xử lý cần thiết, cho quá trình chuẩn bị hỗn hợp nhiên liệu của động cơ ô tô và các hiệu chỉnh thông số về thời gian phun và điều chỉnh hệ số λ . Đầu ra của thuật toán là tính toán thời gian phun hiệu quả đã được đề cập ở trên.



Hình 2. Lưu đồ tính toán thời gian phun hiệu quả

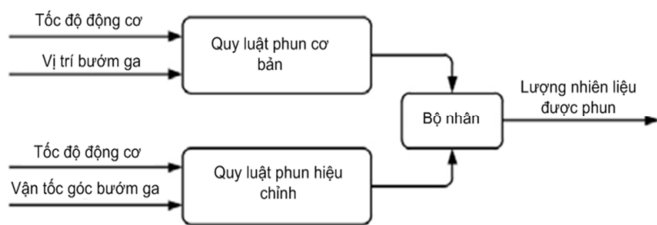
3. MÔ PHỎNG VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG EFI

Các mô hình số và giải pháp phần mềm của hệ thống điều khiển phun nhiên liệu là những công cụ hữu ích để nghiên cứu các thông số vận hành và cải tiến của động cơ. Đó là một phương pháp hiệu quả để xác định và có được các đặc tính phun nhiên liệu mong muốn. Hơn nữa, việc sử dụng phần mềm mô phỏng không chỉ đảm bảo các điều kiện vận hành và giải pháp thiết kế tối ưu, mà còn đảm bảo việc thực hiện thiết kế hiệu quả về mặt chi phí và thời gian. Ưu điểm chính của phần mềm mô phỏng là khả năng kiểm tra một số biến hoặc thuộc tính sử dụng các công cụ tối ưu hóa cho các tham số đã chọn.

Trong bài báo này, sử dụng phần mềm Matlab-Simulink để mô phỏng và điều khiển hệ thống phun xăng điện tử EFI.

3.1. Bộ điều khiển điện tử

Về mặt lý thuyết, lượng và chất lượng nhiên liệu phun vào lý tưởng của động cơ phải được điều chỉnh theo tỷ lệ cân bằng, tương ứng với hỗn hợp nhiên liệu được sử dụng trong mọi điều kiện vận hành và cho mỗi lần phun nhiên liệu. Không phải lúc nào cũng có thể đạt được lượng nhiên liệu được phun vào lý tưởng, vì việc theo dõi thời gian thực của tỷ lệ cân bằng lý tưởng là khó có thể thực hiện được. Do đó, việc kiểm soát nhiên liệu phun vào được điều chỉnh bởi ECU động cơ. ECU động cơ lưu trữ tất cả các quy luật phun cơ bản, quy luật phun hiệu chỉnh để xác định và kiểm soát lượng nhiên liệu phun vào trước khi các van nạp được kích hoạt. Quy luật phun chứa tất cả các giá trị của lượng nhiên liệu phun vào cho một tốc độ động cơ cụ thể và tại một tải động cơ cụ thể. Các thông số khác đang điều chỉnh lượng nhiên liệu phun vào thực tế, chẳng hạn như tốc độ quay của bướm ga, nhiệt độ động cơ, nhiệt độ khí nạp, nhiệt độ nhiên liệu,... được xác định trong bản đồ hiệu chỉnh được gọi là. Mô hình tổng hợp và mô phỏng của bộ điều khiển động cơ như Hình 3 bao gồm các quy luật phun cơ bản và quy luật phun hiệu chỉnh được để cập, trong đó các thông số hiệu chỉnh, nhiên liệu phun vào được điều chỉnh bởi vận tốc góc của bướm ga vì giá trị không đổi của thông số nhiệt độ môi trường xung quanh.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý bộ điều khiển điện tử ECU động cơ

Bảng 1. Quy luật phun của ECU động cơ (cho biết lượng nhiên liệu phun vào tính bằng mm³)

n [vòng/phút]	Góc mở bướm ga [°]								
	5	10	20	30	45	60	70	80	90
1000	1	8,62	26,91	29,83	30,1	30,45	30,75	30,78	30,79
1500	1	5,75	24,22	29,02	30,98	30,92	30,65	30,57	30,58

2000	1	4,45	21,15	27,54	30,82	32,45	33,32	33,40	33,4
2500	1	3,66	19,26	27,03	31,06	32,36	32,58	32,51	32,53
3000	1	3,25	17,32	25,78	31,05	32,35	32,6	32,46	32,48
3500	1	2,52	15,65	25,12	28,62	30,02	30,15	30,11	30,15
4000	1	2,02	15,15	23,06	29,86	31,3	31,33	31,1	31,36
4500	1	2,04	14,66	22,54	29,99	31,75	31,98	32,02	32,04
5000	1	2,04	13,77	22,16	30,6	33,08	33,55	33,62	33,64
5500	1	1,88	12,87	20,96	30,2	33,72	34,60	34,27	34,31

Bảng 2. Quy luật phun hiệu chỉnh của ECU động cơ

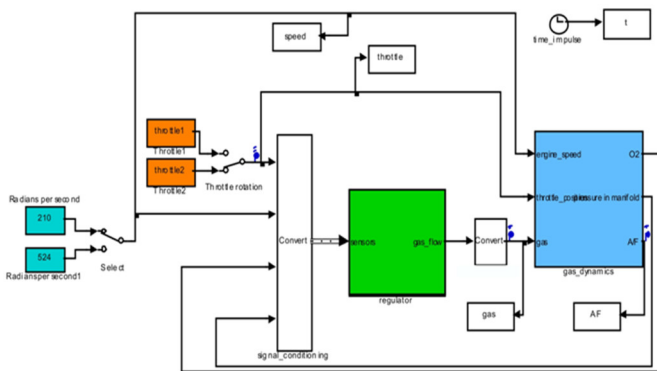
n [vòng/phút]	Vận tốc góc mở bướm ga [°/s]		
	(-20000, -350)	(-350, 350)	(350, 20000)
1000	0,8	1	1,2
1500	0,8	1	1,2
2000	0,8	1	1,2
2500	0,8	1	1,2
3000	0,8	1	1,2
3500	0,8	1	1,2
4000	0,8	1	1,2
4500	0,8	1	1,2
5000	0,8	1	1,2
5500	0,8	1	1,2

Quy luật phun của động cơ được chỉ ra ở Bảng 1, xác định lượng nhiên liệu được phun (mm³), tại một giá trị tốc độ động cơ (vòng/phút) với các góc mở bướm ga khác nhau. Quy luật phun hiệu chỉnh của ECU động cơ được sử dụng để tính toán, điều chỉnh lượng nhiên liệu phun vào, tùy thuộc vào vận tốc góc mở bướm ga. Các giá trị hiệu chỉnh độ đậm, nhạt của hỗn hợp nhiên liệu-không khí được thể hiện trong bảng 2.

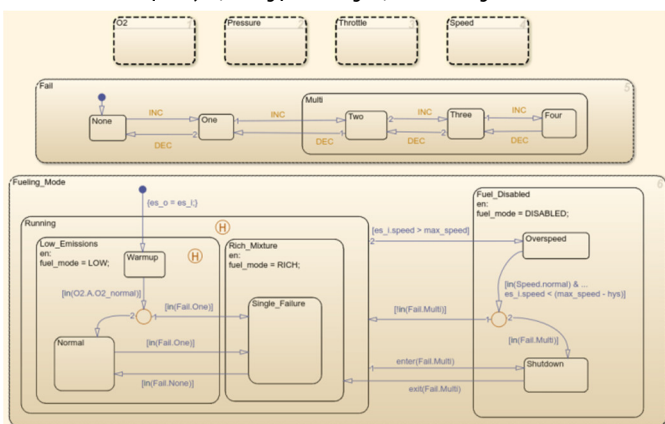
3.2. Mô hình quản lý hệ thống phun xăng EFI

Ứng dụng Matlab-Simulink trong xây dựng mô hình quản lý hệ thống phun xăng điện tử EFI. Trong mô hình này, gồm có các mối quan hệ vật lý và thực nghiệm trên cơ sở tính toán động lực học đường ống nạp. Tỷ lệ không khí-nhiên liệu được tính toán phụ thuộc sự điều tiết lưu lượng khí nạp và lượng nhiên liệu được phun, sao cho đạt tỷ lệ 14.7:1. Cảm biến lambda định lượng ô-xy còn lại trong khí thải, cung cấp thông tin cho bộ điều khiển ECU để quyết định lượng nhiên liệu được phun vào tăng hay giảm theo lượng ô-xy đo được cao hay thấp. Mô hình hệ thống phun xăng điện tử EFI được thể hiện như hình 4.

Theo hình 5, là mô hình bộ điều khiển điện tử ECU của động cơ, gồm có 6 khối chức năng song song. Các khối trên cùng thể hiện cho các khối cảm biến: ô-xy, áp suất, vị trí bướm ga, tốc độ động cơ. Hai khối chức năng còn lại là bộ chuyển đổi tín hiệu từ cảm biến, thiết lập chế độ hoạt động của hệ thống và thực hiện các lệnh điều khiển cơ cấu chấp hành tương ứng. Mô hình ECU trong bài báo này đang được vận hành với thời gian lấy mẫu trung bình 0,01 giây. Điều này cho phép đảm bảo các điều kiện làm việc cũng như đảm bảo độ chính xác khi thay đổi trạng thái làm việc.



Hình 4. Sơ đồ quản lý hệ thống phun xăng điện tử EFI bằng Matlab-Simulink [6]

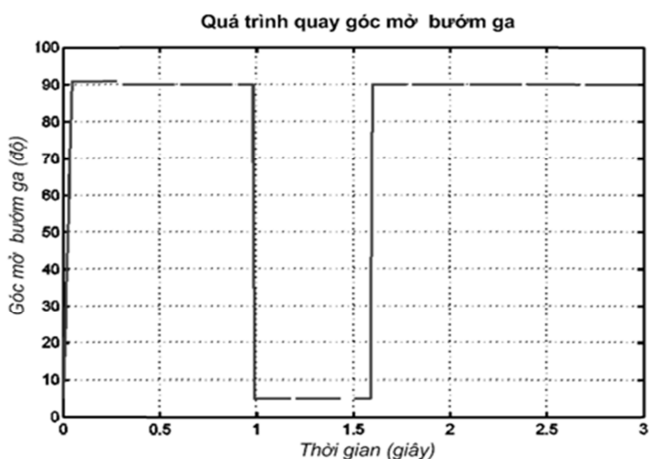


Hình 5. Mô hình ECU động cơ trong stateflow của Matlab-Simulink [6]

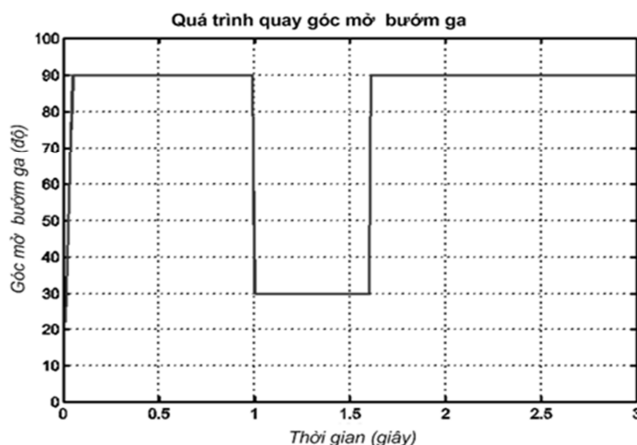
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để xác minh được tính chính xác của mô hình mô phỏng, đầu tiên, chúng tôi đã sử dụng một mô hình hiện có, nhưng đã được sửa đổi để mô phỏng quá trình phun nhiên liệu trong động cơ đốt trong bằng phần mềm Matlab-Simulink. Quá trình thay đổi góc đóng mở bướm ga được thực hiện như trong mô hình điều khiển động cơ một xi lanh. Các giá trị góc mở bướm ga được cho vào mô hình thông qua tệp dữ liệu bên ngoài.

Kết quả mô phỏng đầu tiên như hình 6 thể hiện quá trình đóng mở bướm ga hoàn toàn, hình 7 mô tả quá trình mở bướm ga hoàn toàn và đóng một phần.

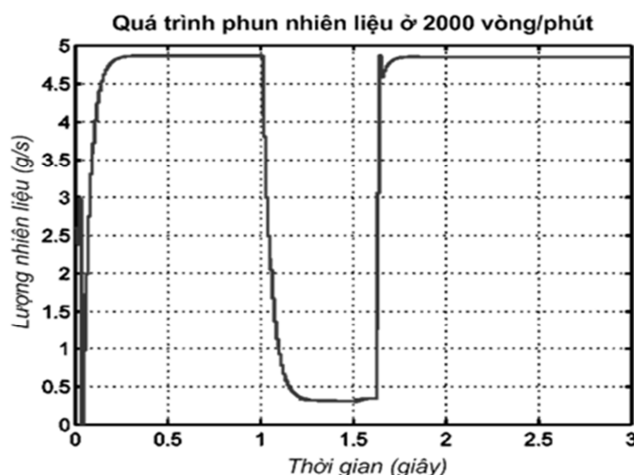


Hình 6. Đặc tính thời gian góc đóng, mở hoàn toàn của bướm ga

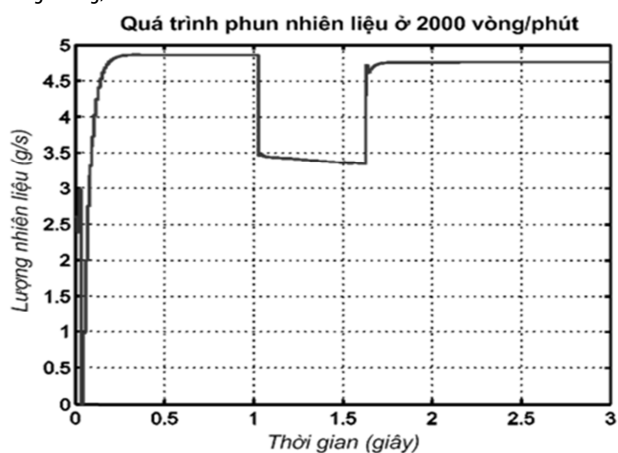


Hình 7. Đặc tính thời gian góc mở bướm ga hoàn toàn và đóng ở 30°

Bộ điều khiển điện tử ECU trong Matlab-Simulink điều chỉnh lượng nhiên liệu được bơm vào theo quy luật phun hiệu chỉnh được thể hiện như hình 8 và 9.



Hình 8. Đặc tính thời gian quá trình phun tại tốc độ 2000 vòng/phút khi bướm ga đóng, mở hoàn toàn



Hình 9. Đặc tính thời gian quá trình phun tại tốc độ 2000 vòng/phút khi bướm ga mở hoàn toàn, đóng góc 30°

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp mô hình hóa hệ thống nhiên liệu động cơ xăng bằng Matlab-Simulink để

điều khiển quá trình phun và tỷ lệ hòa trộn hỗn hợp không khí nhiên liệu phù hợp với các chế độ làm việc của động cơ đốt trong.

Kết quả mô phỏng, phản ánh đúng đặc tính làm việc của hệ thống phun xăng EFI trang bị trên động cơ ô tô hiện đại, làm cơ sở lý thuyết cho những nghiên cứu chuyên sâu về điều khiển hệ cơ điện tử ô tô.

Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu là xây dựng mô hình điều khiển hệ thống phun xăng EFI đầy đủ các thông số trong Matlab-Simulink và so sánh kết quả mô phỏng bằng các phần mềm chuyên dụng khác như Lotus Engine Simulation.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội cho đề tài nghiên cứu cấp trường, mã số: 08-2021-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. R. Gogola, A. Kósa, 2014. *Electronic Control of Fuel Mixture Preparation and Injection in Internal Combustion Engines*. American Journal of Mechanical Engineering, 2, 231-238.

[2]. M.A. Kortam, F.A. Tolba, A.M. Abdelkader Hassen, 2018. *Development of a Mechatronic Control System for a Mechanical Fuel Injection System of a Four Cylinder Automotive Diesel Engine By using Matlab and Simulink*. Journal of Mechatronics and Robotics, 2.

[3]. U. Projahn, H. Randoll, E. Biermann, J. Brückner, K. Funk, T. Küttner, W. Lehle, J. Zuern, 2010. *Fuel Injection System Control Systems*, in: K. Mollenhauer, H. Tschöke (Eds.) *Handbook of Diesel Engines*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 175-191.

[4]. Asme Retracted, 2012. *Development of an Electronic Fuel Injection System for a 4-Stroke Locomotive Diesel Engine*. ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference, Torino, Piemonte, Italy, May 6–9, 2012, Conference Sponsors: Internal Combustion Engine Division, ISBN: 978-0-7918-4466-3, Copyright © 2012 by ASME. Paper No. ICES2012-81163, pp. 93-99; 7 pages; doi: 10.1115/ICES2012-81163], 93.

[5]. S. Myoungcho, S. Hansub, L. Kangyune, 1999. *Design and development of an ECU anti its air-fuel ratio control scheme for an LPG engine with a bypass injector*. in: Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference (IVEC'99) (Cat. No.99EX257), pp. 508-513 Suppl.

[6]. Matlab/Simulink, 2022. *Modeling a Fault-Tolerant Fuel Control System*. in, <https://www.mathworks.com>.

AUTHORS INFORMATION

Le Duc Hieu, Nguyen Trung Kien

Faculty of Automobile Technology, Hanoi University of Industry