

A Study on Establishing the Hardware in the Loop for Testing Electronic Throttle Control System

Quang Vu Le^{*}, Thanh Phuc Le

Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author. Email: vulq@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 10/03/2025
Revised: 10/04/2025
Accepted: 21/04/2025
Published: 28/08/2025

KEYWORDS

Electronic Throttle Control;
LabVIEW;
Electronic Control Unit;
Simulate Signal;
Chevrolet Captiva.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and real-time simulation of the Electronic Throttle Control System (ETCS) using LabVIEW software and data acquisition devices. Simulation parameters are established based on experimental data collected from the electronic throttle body of a Chevrolet Captiva. The control signal from the Electronic Control Unit (ECU) serves as the input for simulating system operation. The simulation results are then converted into physical signals via the Ni-6009 DAQ device, which provides feedback to the ECU, forming a Hardware-in-the-Loop (HIL) system for evaluating ECU control functions. Test results show a strong correlation between simulated and actual signals, confirming that the ECU effectively utilizes the simulated signals for throttle control. This helps to reduce errors during the testing of electronic throttle control algorithms. The successful implementation of the HIL for electronic throttle systems contributes to the development of HIL systems for automotive engines, streamlining research and validation before real-world deployment.

Nghiên cứu thử nghiệm vòng lặp cứng kiểm tra hệ thống điều khiển bướm ga điện tử

Lê Quang Vũ^{*}, Lê Thanh Phúc

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: vulq@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 10/03/2025
Ngày hoàn thiện: 10/04/2025
Ngày chấp nhận đăng: 21/04/2025
Ngày đăng: 28/08/2025

TỪ KHÓA

Bướm ga điện tử;
Phần mềm LabVIEW;
Hộp điều khiển điện tử;
Tín hiệu giả lập;
Xe Chevrolet Captiva.

TÓM TẮT

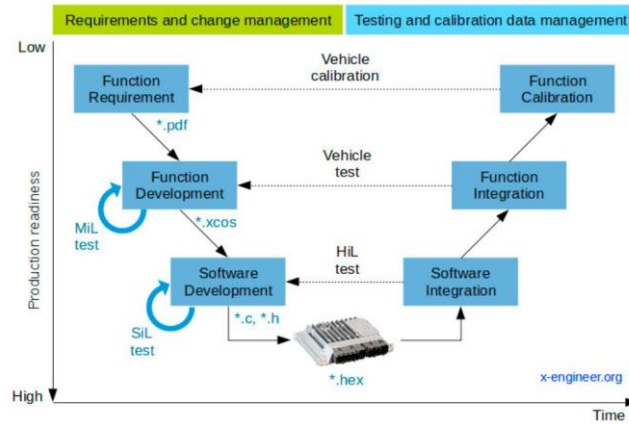
Bài báo này trình bày kết quả mô hình hóa và mô phỏng hệ thống bướm ga điện tử (ETCS – Electronic Throttle Control System) theo thời gian thực, sử dụng phần mềm LabVIEW và thiết bị thu thập dữ liệu. Các thông số mô phỏng được thiết lập dựa trên dữ liệu thí nghiệm thu thập từ bộ bướm ga điện tử trang bị trên xe Chevrolet Captiva. Tín hiệu điều khiển từ ECU (Electronic Control Unit) được nhận diện làm đầu vào để mô phỏng quá trình hoạt động. Kết quả mô phỏng sau đó được chuyển đổi thành tín hiệu vật lý thông qua Card Ni-6009, phản hồi về ECU, tạo thành phần cứng trong vòng lặp (HIL – Hardware-in-the-loop) nhằm khảo sát và kiểm tra các khâu điều khiển của ECU. Kết quả thử nghiệm cho thấy tín hiệu mô phỏng có độ tương đồng cao với tín hiệu thực tế và được ECU chấp nhận để điều khiển bướm ga. Điều này giúp giảm thiểu sai sót trong quá trình thử nghiệm các thuật toán điều khiển bướm ga điện tử. Việc thử nghiệm thành công hệ thống mô phỏng trong vòng lặp phần cứng bướm ga điện tử góp phần xây dựng hệ thống HIL tổng thể cho động cơ ô tô, hỗ trợ quá trình nghiên cứu và kiểm tra các khâu điều khiển hiệu quả hơn trước khi triển khai trên động cơ thực tế.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1841>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Ngày nay, việc phát triển các hệ thống điều khiển trên ô tô sử dụng phổ biến chu trình thiết kế hai nhánh hội tụ dạng chữ V như **Hình 1**. [1], [3]



Hình 1. Chu trình thiết kế chữ V trong phát triển hệ thống điều khiển

Trong đó khâu mô phỏng trong vòng lặp cứng – HIL đóng vai trò then chốt khi kiểm tra và thử nghiệm hệ thống điều khiển [1]. Bằng cách giả lập các tín hiệu vật lý ở trong phòng thí nghiệm để cung cấp một môi trường làm việc gần giống với thực tế, HIL cho phép các nhà phát triển kiểm tra các thuật toán điều khiển và tính tương thích giữa phần mềm và phần cứng. Việc kiểm tra hệ thống điều khiển trên HIL giúp phát hiện và khắc phục lỗi trước khi thử nghiệm trong điều kiện thực tế vốn rất phức tạp [2]. Ngoài ra, HIL còn được ứng dụng rộng rãi trong giảng dạy về hệ thống điện tử và điều khiển ô tô [1], [3]. HIL giúp người học tiếp cận với các hệ thống điều khiển trên ô tô ngay trong phòng thí nghiệm mà không cần thử nghiệm, khảo sát trực tiếp trên xe thật. Từ đó giảm thiểu rủi ro về an toàn và chi phí trang thiết bị cho các khóa học. HIL tái hiện các bước của quy trình phát triển hệ thống điều khiển từ khâu thiết kế đến thử nghiệm và kiểm tra, giúp sinh viên hiểu rõ hơn về quy trình phát triển thực tế trong ngành ô tô. Một trong những bộ phận chịu sự điều khiển phức tạp từ nhiều hệ thống khác nhau trên ô tô đó là bướm ga điện tử - ETC (Electronic Throttle Control). Về mặt chức năng, ETC chỉ điều khiển lượng gió vào động cơ nhưng nó ảnh hưởng đến nhiều hệ thống khác như chạy tự động, tốc độ cầm chừng, khả năng tăng tốc, điều hòa mô-men xoắn, điều khiển lực bám đồng thời ảnh hưởng trực tiếp đến tiêu hao nhiên liệu. Vì thế nên đã có nhiều công trình nghiên cứu các thuật toán và phương pháp điều khiển khác nhau về ETC [4] – [11]. Trong đó, các công trình đã mô hình hóa và mô phỏng hệ thống ETC, sử dụng các thuật toán như bộ quan sát ESO [7], ETB [8], bộ lọc Kalman và bộ điều khiển bù trượt hay cả bộ lùi bước SBCKLF [10] cũng đã được áp dụng trong nghiên cứu. Các phần mềm và ngôn ngữ hỗ trợ mô phỏng như Matlab, TASM hay các phần cứng D-Space [5], [10], [11] được sử dụng nhằm thu thập thông số bướm ga. Tuy nhiên các công trình đó chủ yếu tập trung vào thử nghiệm thuật toán điều khiển nhằm điều khiển chính xác bướm ga điện tử và nó thuộc nhánh thứ nhất của chu trình chữ V [1]. Từ đó cho thấy việc mô phỏng ETC trong vòng lặp cứng là cần thiết để sử dụng kiểm tra quá trình điều khiển từ ECU hỗ trợ quá trình phát triển các phần mềm điều khiển phức tạp trên xe.

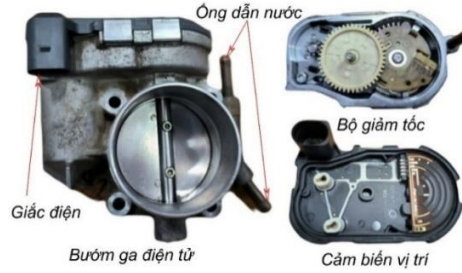
Bài báo này trình bày quá trình thu thập dữ liệu, mô hình hóa và mô phỏng bướm ga điện tử theo thời gian thực bằng phần mềm LabVIEW sử dụng Card NI 6009 giả lập tín hiệu vật lý. Hệ thống được thực nghiệm trên ECU của xe Chevrolet Captiva kết hợp bộ giả lập tín hiệu động cơ để kích hoạt các chế độ điều khiển.

2. Nội dung nghiên cứu

2.1. Mô hình hóa bướm ga điện tử

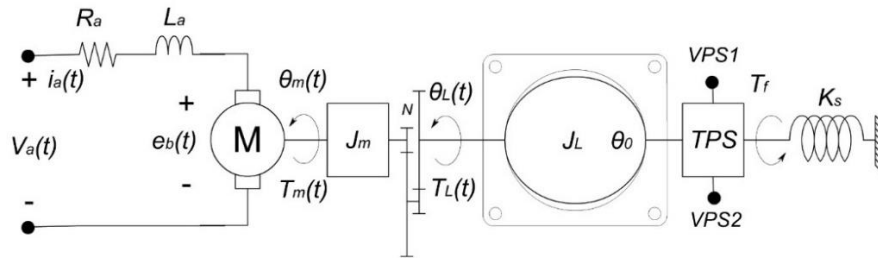
Bướm ga điện tử sử dụng trên ô tô có các bộ phận chính bao gồm động cơ điện hay còn gọi là mô-tơ, bộ truyền động bánh răng, cánh bướm ga, lò xo hồi vị và cảm biến vị trí cánh bướm ga. Ngoài ra để hệ thống hoạt động ổn định thân bướm ga điện tử thường trang bị đường ống dẫn nước làm mát động

cơ để sưởi ấm. Hệ thống bướm ga điện tử sử dụng trong nghiên cứu này trang bị trên xe *Chevrolet Captiva* là bộ bướm ga của hãng *BOSCH* có hình ảnh nhận dạng như **Hình 2**.



Hình 2. Bướm ga điện tử của BOSCH

Một đặc điểm cơ bản đặc trưng nhất của bướm ga thể hệ này là cánh bướm ga ở trạng thái bình thường không được đóng kín hoàn toàn, tại vị trí đó lò xo hồi vị ở trạng thái tự do. Từ đó nghiên cứu chọn mô hình bướm ga điện tử gồm các yếu tố như **Hình 3**.



Hình 3. Mô hình bướm ga điện tử

Trong đó: $V_a(t)$ [V] – điện áp điều khiển bướm ga, $i_a(t)$ [A] – dòng điện đi qua mô-tơ, L_a [H] – độ tự cảm của cuộn dây mô-tơ, R_a [Ω] – điện trở của mô-tơ, $e_b(t)$ [V] – suất điện động tự cảm, $\theta_m(t)$ [rad] – góc quay mô-tơ, $T_m(t)$ [N.m] – mô-men trục mô-tơ, J_m [Kg.m²] – mô-men quán tính mô-tơ, N – tỷ số truyền bộ giảm tốc, $\theta_L(t)$ [rad] – góc quay bướm ga, $T_L(t)$ [N.m] – mô-men trục bướm ga, J_L [Kg.m²] – mô-men quán tính bướm ga, θ_0 [rad] – góc tự do của bướm ga, T_f [N.m] – mô-men ma sát hệ truyền động, K_s [N.m/rad] – độ cứng lò xo hồi vị. TPS – cảm biến vị trí bướm ga có giá trị trả về là $VPS1$ [V] và $VPS2$ [V]. Với tỷ số truyền bộ bánh răng giảm tốc hai cấp là $N = 20,24$ được xác định thông qua số lượng răng của các cặp bánh răng ăn khớp ngoài. Bướm ga thường được điều khiển vị trí ít di chuyển nên xem như hệ số cản gió của cánh bướm ga và mô-tơ không đáng kể.

Từ mô hình bướm ga như **Hình 3**, ta có phương trình cân bằng mạch điện như sau:

$$v_a(t) = L_a \frac{d i_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_{bm} \omega_m(t) \quad (1)$$

Trong đó K_{bm} là hệ số suất phản điện động của mô-tơ. Nếu gọi K_{bL} là hệ số suất điện động ngược theo tốc độ cánh bướm ga ta có $K_{bL} = N \cdot K_{bm}$ Phương trình (1) được viết như sau:

$$v_a(t) = L_a \frac{d i(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_{bL} \omega_L(t) \quad (2)$$

$$L_a \frac{d i(t)}{dt} = v_a(t) - R_a i_a(t) - K_{bL} \omega_L(t) \quad (3)$$

Vì hệ số phản điện động và hệ số mô-men của mô-tơ là tương đương nhau nên ta có phương trình cân bằng mô-men trục mô-tơ như sau:

$$J_m \frac{d \omega_m(t)}{dt} + T_m(t) = K_{bm} i_a(t) \quad (4)$$

Tại trục cánh bướm ga, ta có phương trình cân bằng mô-men như sau:

$$T_L(t) = J_L \frac{d\omega_L(t)}{dt} + K_s(\theta_L(t) - \theta_0) + T_{PL} \text{sign}T_f = NT_m(t) \quad (5)$$

Trong công thức (4), hàm $\text{sign}()$ xác định chiều mô men ngược với chiều quay bướm ga, $\text{sign} = 1$ khi $\omega_L > 0$, $\text{sign} = -1$ khi $\omega_L < 0$ và $\text{sign} = 0$ khi $\omega_L = 0$.

Từ công thức (4) và (5) với $\omega_m = N\omega_L$, Đặt $J = N^2 \cdot J_m + J_L$ ta có:

$$J \frac{d\omega_L(t)}{dt} + K_s \theta_L(t) + T_{PL} + \text{sign}T_f = K_{bL} i_a(t) \quad (6)$$

2.2. Xác định thông số bướm ga điện tử

Để xác định các thông số của bướm ga, nghiên cứu sử dụng *NI myDAQ* kết hợp với phần mềm LabVIEW để cài đặt chế độ đo thu thập dữ liệu tự động có quy hoạch biến số nằm trong miền lấy mẫu. Giá trị thu thập được $y(x_j)$ theo đại lượng x_j tại vị trí j là giá trị trung bình của n phép đo mà ở phép đo thứ i_0 kết quả sẽ bị loại bỏ sau đó nếu $\Delta y_i(x_j)$ vượt ra ngoài giới hạn biên độ lệch trung bình của phép đo. Khi đó kết quả thực nghiệm của phép đo là:

$$y(x) = \{y(x_j) \mid y(x_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i(x_j)\} \quad (7)$$

Trong công thức (7), i, j là giá trị đặc trưng cho vị trí đo tương ứng với khoảng chia giá trị biến cần đo. Sau khi có kết quả các điểm giá trị từ thực nghiệm, nghiên cứu sử dụng hàm hồi quy trong LabVIEW để vẽ lại các đường đặc tuyến xấp xỉ sau đó xác định giá trị đo. Tất cả quy trình này được thực hiện tự động trên phần mềm LabVIEW, kết quả quan sát được hiển thị qua giao diện trên máy tính. Ngoài ra, để giữ trục mô-tơ ở các thí nghiệm đo thông số tĩnh và điều khiển tốc độ quay mô-tơ khi đo các thông số động, nghiên cứu sử dụng một bộ điều khiển PID tốc độ và vị trí DC mô-tơ. Sơ đồ kết nối thiết bị hệ thống thu thập dữ liệu được mô tả như **Hình 4**.



Hình 4. Sơ đồ khối hệ thống thu thập dữ liệu

Trong **Hình 4**, 1 – Cụm bướm ga điện tử; 2 – Card *NI myDAQ*; 3 – Máy tính với giao diện thu thập dữ liệu lập trình bằng LabVIEW; 4 – Nguồn điện đa năng *NI PS-16*; 5 – Card *NI-9505*; 6 – Mô-tơ Planet *PG-457*.

2.2.1. Xác định thông số tĩnh cuộn dây mô-tơ

Để xác định hai thông số tĩnh của cuộn dây bao gồm R_a và L_a thí nghiệm tiến hành khóa bướm ga ở vị trí cố định, điều này có nghĩa là $\omega_m = 0$ và cấp nước ở mức nhiệt độ 80°C để làm nóng mô-tơ tới nhiệt độ thường xuyên của khoang động cơ. Đối với giá trị R_a , thí nghiệm cấp từng mức điện áp vào mô-tơ cho tới khi dòng điện ổn định, lúc này phương trình (1) trở thành như sau:

$$R_a i_a(t) = v_a(t) \quad (8)$$

Giữ nguyên cách khóa bướm ga, tiến hành cấp một mức điện áp cố định và thu thập dòng điện trong thời gian tăng trưởng dòng điện đi qua cuộn dây mô-tơ. Khi đó phương trình (1) trở thành:

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = v_a(t) \quad (9)$$

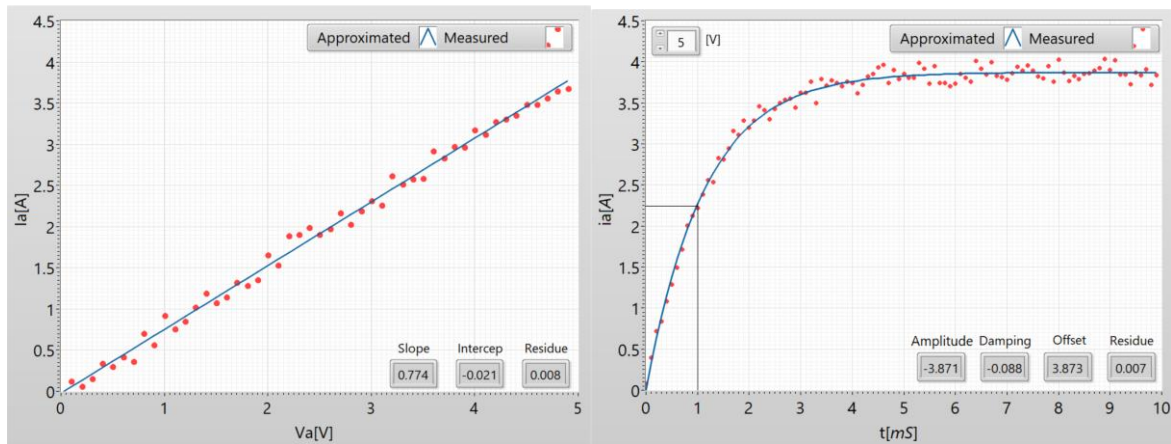
Nghiệm của phương trình vi phân (9) có dạng:

$$i_a(t) = \frac{V_a}{R_a} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (10)$$

Trong phương trình (10) $\tau = L_a/R_a$. Từ đó ta có công thức xác định L_a theo t và i_a như sau:

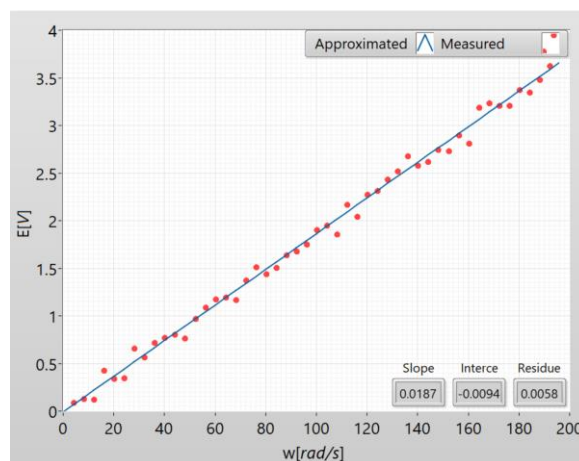
$$L_a = \frac{t R_a}{\ln(1 - \frac{i_a R_a}{V_a})} \quad (11)$$

Tiến hành cấp điện áp nhiều mức khác nhau từ 0 đến 5V để xác định R_a , sau đó sử dụng hàm *Linear Fit* ta được đặc tuyến dòng điện theo điện áp và các thông số như bên trái **Hình 5** với giá trị $R_a=1,291[\Omega]$. Thay giá trị R_a vào phương trình (11), cấp điện áp 5V và sử dụng chức năng bắt đo xung qua kênh AI của NI my DAQ kết hợp cảm biến ASC712 – 5A đo dòng điện bằng hiệu ứng Hall có độ nhạy $5\mu S$. Đặt các khoảng đo 0,1ms thực hiện thu thập dữ liệu dòng điện theo thời gian ta được tập hợp nhiều giá trị dòng điện phân tán theo thời gian tính từ lúc cấp điện áp sau đó sử dụng hàm *Power Fit* lấy xấp xỉ giá trị trung bình được đường đặc tuyến và các thông số phép nội suy như bên phải **Hình 5**. Từ đó cho thấy, tại vị trí đánh dấu trên đồ thị tương ứng theo cột thời gian ở thời gian là điểm 1 ms, dòng điện đạt mức tương ứng xấp xỉ là 2,25 A. Thay giá trị vào công thức (11) ta có giá trị $L_a = 1,47 mH$. Từ kết quả này nghiên cứu ước lượng giá trị độ tự cảm $L_a = 1,47[mH]$.



Hình 5. Dữ liệu thí nghiệm xác định thông số tính của bươmg ga

2.2.2. Xác định suất điện động của mô-tơ



Hình 6. Đặc tuyến suất phản điện động theo tốc độ trục động cơ

Để xác định suất điện động ngược của mô-tơ bươmg ga, nghiên cứu tiến hành tháo bánh răng bộ truyền và kết nối mô-tơ bươmg ga với trục DC mô-tơ Planetm được điều khiển tốc độ bởi Card Ni-9505. Lúc này suất điện động được xác định theo công thức sau:

$$K_{bm}\omega_m(t) = e_a(t) \quad (12)$$

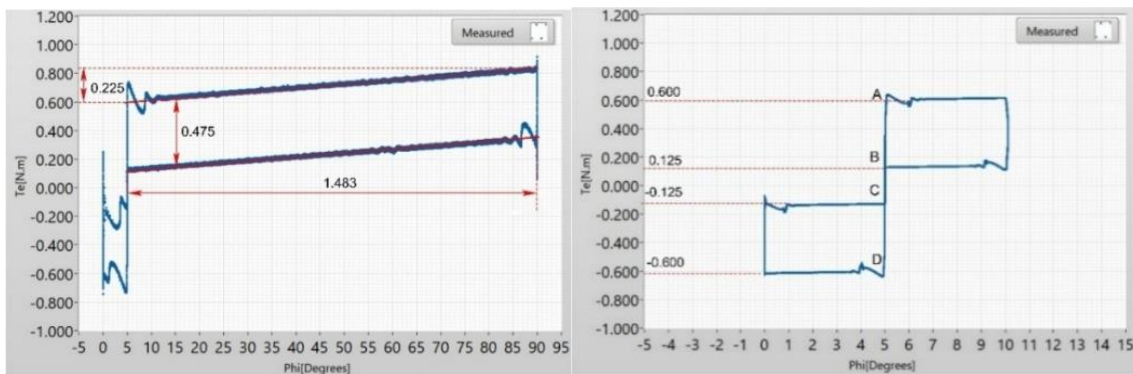
Điều chỉnh tốc độ mô-tơ tăng dần từ 0 tới 200 rad/s và thu thập suất điện động phát ra bằng cổng AI của *Ni myDAQ* sau đó sử dụng hàm *Linear Fit* ta được đặc tuyến suất phản điện theo tốc độ quay với $K_{bm} = 0,0187 [V.s/rad]$ và các thông số như **Hình 6**.

2.2.3. Xác định mô-men cân

Để xác định các mô-men cân của cụm bướm ga, nghiên cứu sử dụng bộ điều khiển PID vị trí với giá trị góc mở bướm ga θ_L xác định chuyển đổi thông qua giá trị cảm biến vị trí bướm ga *TPS*. Khi điều khiển bướm ga dịch chuyển chậm ổn định ở từng vị trí, lúc này $\omega_L \approx 0$. Khi đó phương trình (5) trở thành:

$$K_s(\theta_L(t) - \theta_0) + T_{PL} + \text{sign}T_f = K_{bL}i_a(t) \quad (13)$$

Trong phương trình (12), góc tự do ban đầu của cánh bướm ga là $5[^\circ]$ từ đó ta có $\theta_0 = 0,0872[rad]$, $K_{bL} = N.K_{bm}$, mà $K_{bm} = 0,0187[V.s/rad]$ đã xác định trước đó nên $K_{bL} = 0,3785[N.m/rad]$. Dùng bộ điều khiển PID vị trí cho bướm ga chạy chậm tăng dần từ 0° tới 90° và chạy ngược lại. Ở mỗi vị trí đo dòng điện i_a trung bình và suy ngược mô-men ở từng vị trí ta kết quả thu thập được như bên trái **Hình 7**. Để loại bỏ các tín hiệu do độ vọt lố khi điều khiển giúp thấy rõ quá trình thay đổi mô-men ở vị trí cân bằng, thí nghiệm cho bướm ga chạy chậm từ 0° tới 10° và thu thập dữ liệu. Kết quả cho thấy như bên phải **Hình 7**.



Hình 7. Dữ liệu mô-men cân tĩnh bướm ga theo góc mở

Trong **Hình 7**, đặc tuyến thu được khi cho cánh bướm ga tăng góc đều từ 0° tới 90° và ngược lại ta có hai phần đặc tuyến khác nhau khi góc mở đi qua góc cân bằng ban đầu $\theta_0 = 5^\circ$. Đồng thời mỗi phần có hai đặc tuyến song song với nhau. Ở hình bên trái, khi đóng mở cánh bướm ga tạo ra hai đường mô-men có độ chênh lệch $0,475 [N.m]$. Độ chênh lệch này chính là mô-men ma sát T_f , khi đảo chiều nó trái dấu nhau nên ta có $T_f = 0,475/2 = 0,237 [N.m]$. Bướm ga di chuyển từ 5° tới 90° tương đương góc di chuyển $1,483 [rad]$ từ $0,0872 [rad]$ tới $1,5707 [rad]$, độ chênh lệch mô-men là $0,225 [N.m]$. Từ đó ta có $K_s = 0,225/1,483 = 0,151[N.m/rad]$. Ở hình bên phải **Hình 7**, bướm ga di chuyển chậm từ 0° tới 10° , khi bướm ga đi qua vị trí cân bằng trong lúc đang đóng lại, mô-men giảm từ điểm B xuống D với độ chênh lệch mô-men là $0,725 [N.m]$. Điều này cũng đúng khi bướm ga đang mở ra và đi qua vị trí cân bằng, mô-men tăng từ điểm C lên A. Từ đó ta có mô-men ban đầu có hai chiều khác nhau ở hai bên góc cân bằng và $T_{PL} = 0,725/2 = 0,362[N.m]$.

2.2.4. Xác định mô-men quán tính

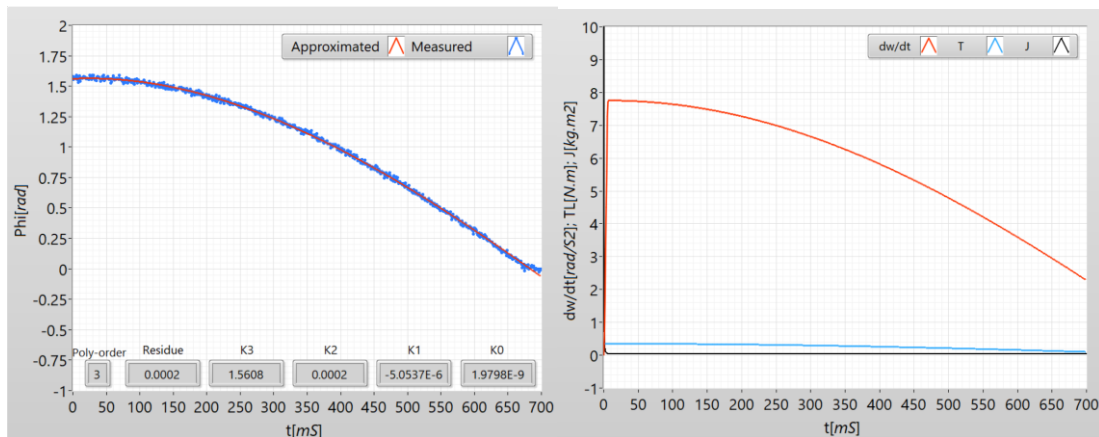
Để xác định mô-men quán tính của bướm ga, thí nghiệm tiến hành mở bướm ga tới 90° sau đó thả tự do cho lò xo hồi vị kéo bướm ga về vị trí cân bằng. Trong quá trình này các cực điện mô-tơ hở mạch nên sức cản điện động không tồn tại. Tổng mô-men quy đổi của cụm bướm ga $T(t)$ bao gồm mô-men xoắn của lò xo T_s , mô-men ép đĩa bướm ga T_{PL} và mô-men ma sát T_f . Lúc này phương trình (6) trở thành phương trình vi phân sau:

$$T(t) = J\ddot{\theta}(t) = K_s\theta_L(t) + T_{PL} - T_f \quad (14)$$

Từ phương trình (13) ta có công thức xác định mô men quán tính của bướm ga điện tử sau:

$$J = \frac{T(t)}{\ddot{\theta}(t)} = \frac{K_s\theta_L(t) + T_{PL} - T_f}{\ddot{\theta}(t)} \quad (15)$$

Thí nghiệm thu thập dữ liệu góc mở bướm ga từ mức mở hoàn toàn 90° về góc tự do 5° thông qua cảm biến vị trí bướm ga rồi sử dụng hàm *Polynomial Fit* trong LabVIEW để xấp xỉ hóa quá trình thay đổi góc mở bướm ga. Từ giá trị này áp dụng công thức (13) để tìm đặc tuyến mô-men $T(t)$. Sau đó từ tập giá trị góc mở bướm ga tính đạo hàm bậc hai để tìm đặc tuyến gia tốc góc bướm ga $\ddot{\theta}(t)$. Áp dụng công thức (14) ta tìm được giá trị mô-men quán tính tương đương của cụm bướm ga $J = 0.045 \text{ [kg/m}^2\text{]}$. Kết quả thí nghiệm được mô tả như **Hình 8**.



Hình 8. Kết quả thí nghiệm xác định mô-men quán tính cụm bướm ga

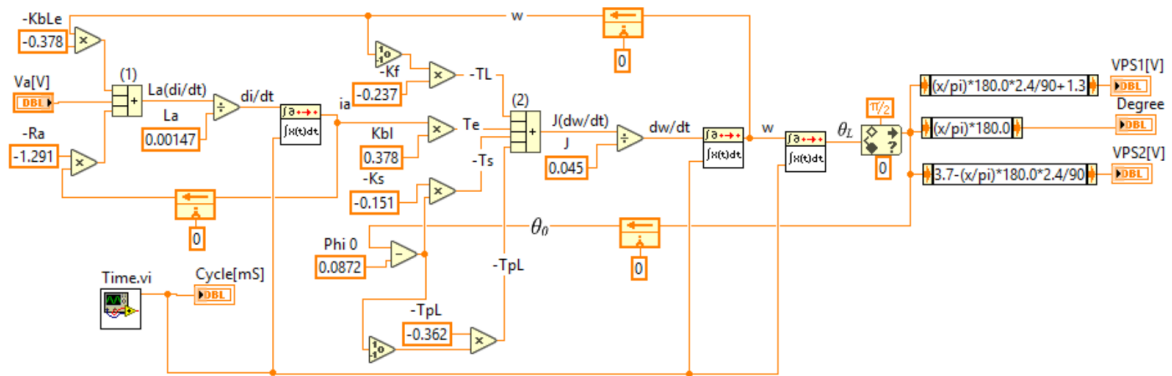
Từ kết quả thí nghiệm xác định thông số ta có bảng thông số cụm bướm ga điện tử như **Bảng 1**

Bảng 1. Thông số cụm bướm ga điện tử

TT	Thông số kỹ thuật	Giá trị và tính chất
1	R_a	1,291 [Ω]
2	L_a	$1,47 \cdot 10^{-3}$ [H]
3	J	0,045 [kg/m ²]
3	$K_{bm} - K_{bL}$	0,0187 [V.s/rad] – 0,378 [V.s/rad]
4	$K_m - K_{mL}$	0,0187 [N.m/A] – 0,378 [V.s/rad]
5	K_s	0,151 [N.m/rad]
6	N	20,24
7	T_{PL}	0.362 [N.m]
8	T_f	0,237 [N.m]
9	θ_0	0,0872 [rad] (5°)
10	TPS	VPS1: 3,7-1,3[V]; VPS2: 1,3-3,7[V]

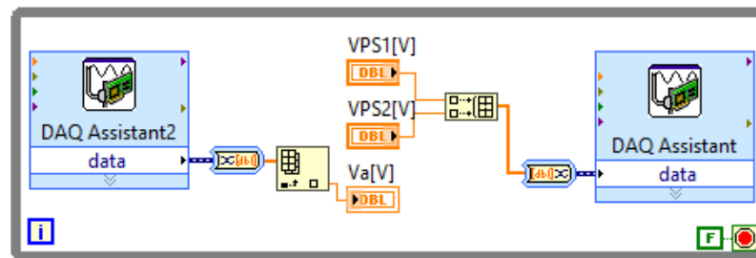
2.3. Mô phỏng bướm ga điện tử

Từ phương trình (3) và (6) kết hợp với thông số hệ thống như **bảng 1**, nghiên cứu xây dựng khối mô phỏng theo thời gian thực trên phần mềm LabVIEW có Block Diagram như **Hình 9**.



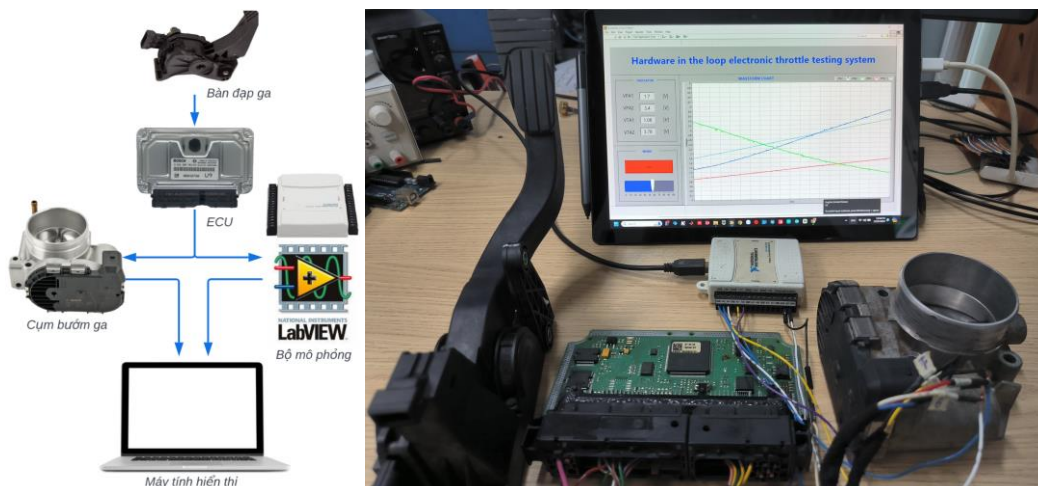
Hình 9. Khối Block Diagram mô phỏng buồng ga điện tử

Trong Hình 9, dữ liệu đầu vào là điện áp đặt vào hai đầu cực điện mô tơ V_a , qua các quá trình biến đổi điện từ như công thức (3) và (6) ta có ngõ ra là giá trị góc buồng ga θ_L . Sau khi có giá trị góc mở buồng ga, khối mô phỏng cuối cùng chuyển đổi đơn vị đo góc và đưa ra tín hiệu cảm biến $VPS1$ và $VPS2$ theo thông số cảm biến vị trí đi kèm. Khối *Time* điều khiển thời gian lấy mẫu 1 *mS*. Để quá trình thu thập và chuyển đổi tín hiệu giữa *Ni-6009* và *ECU* không ảnh hưởng tới hàm *Time* trong khối mô phỏng, nghiên cứu sử dụng một vòng lặp chạy độc lập, song song với khối mô phỏng có cấu trúc Block Diagram như Hình 10. Trong đó các biến V_a , $VPS1$, $VPS2$ được nối với khối mô phỏng. V_a được thu thập từ ngõ vào AO_0 , $VPS1$, $VPS2$ được xuất ra ngõ AO_1 của *Ni-6009*.



Hình 10. Khối Block Diagram chuyển đổi tín hiệu mô phỏng và vật lý buồng ga điện tử

2.4. Kiểm nghiệm mô hình với thực tế

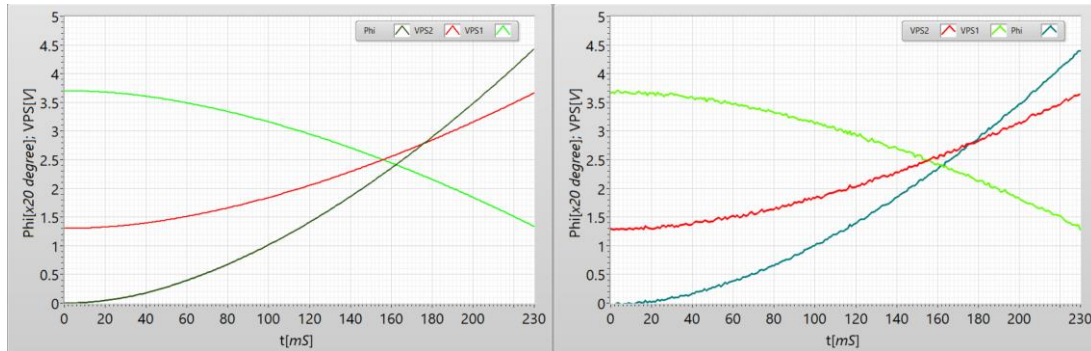


Hình 11. Bố trí thí nghiệm kiểm nghiệm mô hình mô phỏng

Để kiểm nghiệm mô hình mô phỏng, nhóm nghiên cứu sử dụng một bộ điều khiển bướm ga điện tử tên xe *Chevrolet Captiva* bao gồm bàn đạp ga, *ECU* và cụm bướm ga kết nối với nhau theo sơ đồ hệ thống và được bố trí như Hình 11. Trong đó hai chân tín hiệu điều khiển mô-tơ bướm ga được nhận

điện qua chức năng *Input Capture* để xác định *Duty Cycle* của xung PWM điều khiển đồng thời xác định chiều điện cực từ đó quy đổi ra điện áp điều khiển từ -12V tới +12V đặt làm biến đầu vào cho mô hình mô phỏng.

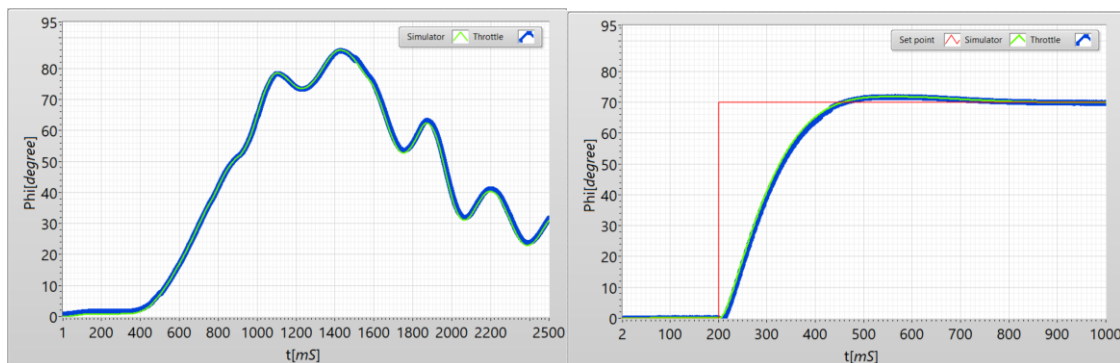
Bước kiểm nghiệm thứ nhất là kiểm tra sự tương đồng tín hiệu và thời gian đáp ứng khi cánh bướm ga mở từ 0° tới 90° . Thí nghiệm đặt vị trí bàn đạp ga ở mức tối đa và cấp điện cho hệ thống, ECU sẽ điều khiển mở bướm ga và thu thập dữ liệu. Kết quả cho thấy như **Hình 12**.



Hình 12. Đặc tuyến góc mở bướm ga mô phỏng và thực tế

Trong **hình 12**, về mặt trực quan, tín hiệu cảm biến vị trí bướm ga giữa thực tế và mô phỏng khá tương đồng. Thời gian để bướm ga mở từ 0° tới 90° là $230 [mS]$. Điều này cho thấy mô hình mô phỏng có thể thay thế cụm bướm ga thực tế.

Kiểm nghiệm thứ hai, thí nghiệm kiểm tra mức độ đáp ứng của tín hiệu mô phỏng và bướm ga thực tế. Tiến hành cho bàn đạp ga thay đổi vị trí ngẫu nhiên trong một khoảng thời gian và thu thập dữ liệu góc mở bướm ga thực tế và mô phỏng trên một đồ thị. Kết quả như **Hình 13** bên trái cho thấy bướm ga thực tế có phần đáp ứng chậm hơn so với tín hiệu mô phỏng nhưng tín hiệu mô phỏng bám sát đặc tuyến của bướm ga thực tế và được ECU chấp nhận điều khiển như một bướm ga bình thường. Trong khi đồ thị như **Hình 13** bên phải mô tả quá trình đáp ứng điều khiển của bướm ga từ ECU khi cho góc mở đột ngột từ 0 tới 70° . Cả hai tín hiệu mô phỏng và thực tế thể hiện được kết quả điều khiển theo thuật toán vị trí từ ECU, mức độ đáp ứng của bướm ga mô phỏng khá tương đồng với bướm ga thực tế khi quan sát trên cùng một đồ thị.



Hình 13. So sánh đặc tuyến ngẫu nhiên góc mở bướm ga thực tế và mô phỏng

3. Kết luận

Nghiên cứu đã khảo sát, mô hình hóa và thu thập dữ liệu thí nghiệm về cụm bướm ga điện tử trên xe Chevrolet Captiva. Quá trình mô phỏng sử dụng phần mềm LabVIEW kết hợp với Card NI 6009 để nhận tín hiệu điều khiển và phản hồi tín hiệu vị trí bướm ga về ECU. Kết quả ban đầu cho thấy đặc tuyến góc mở của bướm ga mô phỏng tương đồng với bướm ga thực tế. Đồng thời, tín hiệu mô phỏng từ cảm biến vị trí bướm ga được ECU chấp nhận và phản hồi bằng tín hiệu điều khiển. Tín hiệu xung công suất điều khiển mô-tơ bướm ga được chuyển đổi thành điện áp và gửi về LabVIEW chạy khối mô phỏng đáp ứng yêu cầu hệ thống. Bộ mô phỏng bướm ga điện tử này đóng vai trò như một HIL đơn lẻ, góp phần

hoàn thiện hệ thống HIL cho động cơ ô tô. Nhờ đó, các quá trình hoạt động và điều khiển trên xe có thể được nghiên cứu mà không cần đến các băng thử phức tạp. Giải pháp này giúp đơn giản hóa quá trình thử nghiệm các tính năng điều khiển trên ô tô. Nhờ đó, các nhà nghiên cứu có thể đề xuất và cải tiến các phương pháp điều khiển động cơ nhằm tối ưu hóa hoạt động, giảm tiêu hao nhiên liệu, nâng cao tiện nghi cho người dùng và thân thiện với môi trường.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn tồn tại một số hạn chế cần được tiếp tục phát triển. Vấn đề đầu tiên là nghiên cứu chưa đánh giá đầy đủ ảnh hưởng của các thông số phần cứng cũng như thời gian đáp ứng của bộ giao tiếp trong hệ thống mô phỏng đến kết quả thu được. Do đó, chưa thể đưa ra được các yêu cầu tối thiểu về cấu hình phần cứng nhằm bảo đảm hệ thống hoạt động ổn định và hiệu quả. Bên cạnh đó, các thử nghiệm mới chỉ được tiến hành trên một đối tượng giới hạn, chưa mở rộng ra nhiều loại khác nhau và cũng chưa thực hiện đánh giá một cách khách quan, chi tiết về mức độ đáp ứng của hệ thống. Các thử nghiệm hiện tại chủ yếu nhằm mục đích xác nhận khả năng thay thế thiết bị thực tế bằng hệ thống mô phỏng, thay vì phân tích sâu về hiệu năng tổng thể.

Lời cảm ơn

Tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh đã cấp kinh phí thực hiện đề tài nghiên cứu khoa học cấp cơ sở mã số T2025-12. Chân thành cảm ơn phòng thí nghiệm Cơ Điện Tử Ô tô, Khoa Cơ Khí Động Lực, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thiết bị thí nghiệm.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. C. Nissimagoudar, V. Mane, G. H. M. Giresha, and N. C. Iyer, "Hardware-in-the-loop simulation technique for an automotive electronics course," in *Proc. 9th World Engineering Education Forum (WEEF)*, 2019.
- [2] A. V. Tumasov, A. S. Vashurin, Y. P. Trusov, E. I. Toropov, P. S. Moshkov, V. S. Kryaskov, and A. S. Vasilyev, "The application of hardware-in-the-loop (HIL) simulation for evaluation of active safety of vehicles equipped with electronic stability control (ESC) systems," *Procedia Computer Science*, vol. 150, pp. 309–315, 2019.
- [3] J. Sobota, M. Goubej, J. Königsmarková, and M. Cech, "Raspberry Pi-based HIL simulators for control education," in *Proc. Int. Federation of Automatic Control (IFAC)*, 2019.
- [4] K. Meenam, S. Gonsrang, C. Dechwayukul, W. Kaewapichai, P. Neranon, N. Vittayaphadung, and J. Auysakul, "Modeling and tuning of electronic throttle control system in Formula Student car," *Int. J. Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 10917–10930, 2023.
- [5] X. Jiao, G. Li, and H. Wang, "Adaptive finite-time servo control for automotive electronic throttle with experimental analysis," *Mechatronics*, vol. 53, pp. 192–201, 2018.
- [6] N. Chen and P. Zhu, "Hardware-in-loop electronic throttle system based on Simulink," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 128–129, pp. 898–903, 2012.
- [7] J. Xue, X. Jiao, and Z. Sun, "ESO-based double closed-loop servo control for automobile electronic throttle," *IFAC PapersOnLine*, vol. 51, no. 31, pp. 979–983, 2018.
- [8] F. Cherian, A. Ranjan, P. Bhowmick, and A. Rammohan, "Model-based design of electronic throttle control," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 263, p. 062063, 2017.
- [9] M. Ouimet, G. Berteau, and K. Lundqvist, "Modeling an electronic throttle controller using the Timed Abstract State Machine language and toolset," *Embedded Systems Laboratory*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- [10] R. Grepl and B. Lee, "Modelling, identification and control of electronic throttle using dSPACE tools," *Mechatronics Laboratory*, Brno Univ. of Technology, and Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ., Korea.
- [11] Y. Liu, F. Li, and B. Sun, "Self-tuning backstepping control with Kalman-like filter for high-precision control of automotive electronic throttle," *Electronics*, vol. 12, p. 2938, 2023.

Quang Vu Le received his Engineer degree in Vehicle Engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam, in 2007, and his Master's degree in Vehicle Engineering from the same university in 2014. Since 2007, he has been a Lecturer in the Department of Automotive Electronics, Faculty of Vehicle and Energy Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam. His fields of expertise and research interests include automotive electronic and electrical systems, as well as the application of control systems in automotive engineering. Contact information: M.Sc. Quang Vu Le; Tel: +84 973 777 077. Email: vulq@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0293-4880>

Thanh Phuc Le received the B.E. degree in automotive engineering from Ho Chi Minh city University of Technology and Education, Vietnam, in 2004 and the M.E. degree in automotive engineering from Ho Chi Minh city University of Technology and Education, Vietnam, in 2007. He received PhD degree in mechanical engineering from Concordia University in Montreal Canada in 2013. His research interest is on electric vehicles, vehicle dynamics, driver models and engine control. His published paper is related to controlling of electric motorbikes, impaired driver model, PWM technique applied on induction motor. Email address: phuclt@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0272-099X>