



Nghiên cứu giải pháp nâng cao tính an toàn cho ô tô tập lái thông qua hệ thống ngắt tín hiệu chân ga

A study on the implementation of throttle signal disengagement systems for elevated safety in trainee motor vehicles

Cao Văn Dũng¹, Nguyễn Văn Việt², Đỗ Hùng Chiến^{3,*}

¹Trường Sĩ quan Kỹ thuật Quân sự

²Khoa kỹ thuật ô tô, trường công nghệ, Trường Đại học Văn Lang, Thành phố Hồ Chí Minh

³Viện Hàng hải, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Từ khóa:

TÓM TẮT

Ô tô tập lái
Phanh phụ
Bàn đạp ga điện tử
Cảm biến APP
Liên động an toàn
ECU ô tô

Trong đào tạo lái xe ô tô, tình huống học viên đạp nhầm chân ga trong khi giáo viên sử dụng phanh phụ có thể tạo ra trạng thái xung đột ga-phanh, làm suy giảm hiệu quả giảm tốc và tăng nguy cơ mất an toàn. Nghiên cứu này đề xuất một kiến trúc liên động an toàn giữa phanh phụ và bàn đạp ga điện tử trên ô tô tập lái. Khi phanh phụ đạt ngưỡng can thiệp xác định, hệ thống chuyển tín hiệu cảm biến bàn đạp ga đưa tới ECU từ tín hiệu APP gốc sang cặp tín hiệu tham chiếu tương ứng với trạng thái nhả ga, thay vì cắt hở mạch tín hiệu. Phương pháp nghiên cứu bao gồm khảo sát 60 giáo viên dạy lái, phân tích nguyên lý hệ thống ga điện tử, xây dựng mô hình động lực học phanh và chế tạo mô hình bench-top để kiểm chứng logic ưu tiên phanh. Kết quả thử nghiệm mô hình cho thấy cơ cấu chuyển mạch đáp ứng trong khoảng 20–50 ms và hoạt động ổn định theo các kịch bản mô phỏng. Kết quả này xác nhận tính khả thi ban đầu của nguyên lý liên động phanh phụ – bàn đạp ga điện tử, làm cơ sở cho các thử nghiệm tiếp theo trên ECU và phương tiện thật.

Keywords:

ABSTRACT

Driver training vehicle
Auxiliary brake
Electronic accelerator pedal
APP sensor
Safety interlock
Automotive ECU

In driver training vehicles, a trainee may mistakenly press or hold the accelerator pedal while the instructor applies the auxiliary brake. This brake-accelerator overlap can reduce deceleration effectiveness and increase safety risks during practical driving lessons. This study proposes a safety interlock architecture between the instructor's auxiliary brake and the electronic accelerator pedal of a driver training vehicle. When the auxiliary brake reaches a predefined intervention threshold, the accelerator pedal position signal delivered to the ECU is switched from the original APP signals to a calibrated idle-reference APP signal pair, rather than being open-circuited or directly interrupted. The research methodology includes a survey of 60 driving instructors, theoretical analysis of electronic throttle control and braking dynamics, and the development of a bench-top model to verify the brake-priority logic. Experimental results on the model show a switching response time of approximately 20–50 ms and stable operation under representative simulated scenarios. These results confirm the initial feasibility of the proposed auxiliary-brake-APP interlock principle and provide a basis for further validation on real ECUs and full vehicles.

* Đỗ Hùng Chiến. Viện hàng hải, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh.

Email: chien.do@ut.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150403>

Ngày nhận bài: 15/12/2025; Ngày nhận bài sửa: 05/5/2026; Ngày chấp nhận đăng: 21/5/2026

pISSN: 1859-4263

1. Đặt vấn đề

Nhu cầu học và thi giấy phép lái xe ô tô tại Việt Nam tăng nhanh cùng với sự gia tăng số lượng xe cá nhân lưu thông trên đường. Hoạt động đào tạo lái xe ô tô tại Việt Nam hiện chịu sự điều chỉnh của Nghị định 160/2024/NĐ-CP về hoạt động đào tạo và sát hạch lái xe, cùng với Thông tư 14/2025/TT-BXD quy định về đào tạo lái xe và bồi dưỡng, kiểm tra, cấp chứng chỉ bồi dưỡng kiến thức pháp luật về giao thông đường bộ [1], [2]. Theo đó, một học viên hạng B hoặc C1 phải hoàn thành tối thiểu 710–825 km thực hành trên nhiều loại hình đường, bao gồm cả đường phức tạp, đèo núi và đường cao tốc, dưới sự bảo hiểm tay lái trực tiếp của giáo viên. Trong quá trình thực hành, do tâm lý căng thẳng và kỹ năng vận hành chưa thuần thục, học viên thường mắc lỗi về thao tác chân ga – chân phanh, đặc biệt là đạp nhầm ga khi cần phanh. Khi giáo viên đạp phanh phụ trong khi học viên vẫn giữ ga, hệ thống phanh và hệ thống truyền lực cùng tạo ra hai tác động đối kháng. Trạng thái này không chỉ làm tăng yêu cầu lực phanh mà còn có thể kéo dài thời gian dừng, tăng tải nhiệt lên cơ cấu phanh và làm giảm biên an toàn trong đào tạo thực hành.

Khảo sát 60 giáo viên dạy lái tại các trung tâm đào tạo cho thấy: 95% ý kiến cho rằng cấu tạo phanh phụ hiện nay “cần cải tiến thêm để đảm bảo an toàn trong mọi tình huống”; 100% giáo viên đánh giá trạng thái “giáo viên đạp phanh phụ trong khi học viên vẫn đạp ga” là nguy hiểm; và 100% đồng ý rằng nếu có hệ thống tự động giảm hoặc ngắt ga khi giáo viên đạp phanh phụ thì “quá tốt”. Đây là bằng chứng thực nghiệm quan trọng khẳng định tính cấp thiết của việc cải tiến hệ thống vận hành trên xe tập lái.

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chỉ ra rằng, sử dụng sai bàn đạp (pedal misapplication) là một dạng sai sót điều khiển có thật và có thể làm gia tăng nguy cơ tăng tốc ngoài ý muốn. Hasegawa và cộng sự cho thấy tỷ lệ đạp nhầm bàn đạp tăng lên khi tác vụ điều khiển bị gián đoạn lâu hơn, đặc biệt ở nhóm lớn tuổi [3]; đồng thời, một nghiên cứu khác của cùng nhóm chỉ ra khả năng phát hiện và sửa sai khi xảy ra tăng tốc ngoài ý muốn suy giảm theo tuổi [4]. Ở mức mô phỏng lái xe có độ chân thực cao, Gaspar và McGehee ghi nhận phản ứng

đạp phanh của người lái trong tình huống tăng tốc đột ngột ngoài ý muốn (sudden unintended acceleration) không đồng nhất và xuất hiện phân hóa kiểu phản ứng chỉ sau khoảng 1 giây (s) kể từ thời điểm khởi phát [5]. Ngoài ra, phân tích video tai nạn và dữ liệu EDR của Lee và Lee cho thấy một tỷ lệ đáng kể các sự cố tăng tốc ngoài ý muốn thực chất liên quan đến nhầm lẫn bàn đạp (pedal confusion) [6]. Các giải pháp phanh phụ hiện hành chủ yếu dựa trên liên kết cơ khí với bàn đạp phanh chính, chưa giải quyết trực tiếp yêu cầu mô-men phát sinh từ hệ thống ga điện tử. Vì vậy, cần nghiên cứu một cơ chế liên động an toàn giữa phanh phụ và tín hiệu bàn đạp ga điện tử, trong đó phanh phụ không chỉ tạo lực phanh mà còn kích hoạt trạng thái giảm yêu cầu mô-men động cơ.

Từ thực tiễn này, bài báo hướng tới ba mục tiêu:

Thứ nhất, phân tích cơ sở kỹ thuật của hiện tượng xung đột ga–phanh trên xe tập lái sử dụng bàn đạp ga điện tử.

Thứ hai, đề xuất kiến trúc liên động phanh phụ – APP (Accelerator Pedal Position - Cảm biến vị trí bàn đạp ga) theo nguyên lý chuyển chọn tín hiệu, tránh cắt hờ hoặc trộn tín hiệu APP.

Thứ ba, chế tạo mô hình bench-top và đánh giá sơ bộ logic ưu tiên phanh thông qua các kịch bản mô phỏng.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Bối cảnh pháp lý và nhu cầu thực tiễn

Hoạt động đào tạo lái xe tại Việt Nam được điều chỉnh bởi hệ thống văn bản pháp lý chặt chẽ về chương trình, phương tiện và điều kiện an toàn. Thông tư 14/2025/TT-BXD quy định cụ thể khối lượng chương trình, thời gian đào tạo lý thuyết – thực hành, số giờ và quãng đường tối thiểu phải thực hiện trên các loại đường khác nhau. Nghị định 160/2024/NĐ-CP quy định các yêu cầu đối với phương tiện tập lái, bao gồm trang bị phanh phụ, thiết bị giám sát thời gian và quãng đường, tiêu chuẩn cải tạo, đăng kiểm và an toàn kỹ thuật của xe tập lái [2]. Các nghiên cứu trong nước đã chỉ ra một số bất cập trong quản lý đào tạo và sát hạch lái xe, trong đó nổi bật là vấn đề chuẩn hóa phương tiện tập lái và cơ sở dữ liệu phục vụ giám sát chất lượng [7]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu về mô

hình dạy lái và ứng dụng mô phỏng 3D cho thấy xu hướng tăng cường các giải pháp hỗ trợ an toàn, nhưng các giải pháp can thiệp sâu vào cơ cấu điều khiển ga – phanh trên xe tập lái vẫn còn hạn chế [8]. Hoạt động đào tạo lái xe hiện nay được quản lý bởi các văn bản quy phạm pháp luật như Nghị định về đào tạo, sát hạch, cấp giấy phép lái xe và Thông tư 14/2025/TT-BXD, quy định chi tiết khối lượng chương trình, thời lượng đào tạo lý thuyết – thực hành, yêu cầu về xe tập lái và thiết bị giám sát [1],[2]. Xe tập lái bắt buộc phải có phanh phụ, thiết bị DAT và được kiểm định an toàn kỹ thuật định kỳ; tuy nhiên, hiện chưa có yêu cầu cụ thể về cơ cấu can thiệp tín hiệu ga của học viên khi giáo viên sử dụng phanh phụ. Điều này mở ra không gian cho các giải pháp cải tiến kỹ thuật nhằm nâng cao mức độ an toàn mà vẫn tuân thủ quy định hiện hành [1],[2]. Trong phạm vi nghiên cứu này, giải pháp được xem xét như một hệ thống phụ trợ nhằm giám xung đột ga-phanh khi giáo viên sử dụng phanh phụ, chưa thay thế cho các yêu cầu kiểm định và phê duyệt kỹ thuật khi ứng dụng thực tế.

2.2. Cơ sở lý thuyết về tín hiệu bàn đạp ga điện tử và liên động an toàn

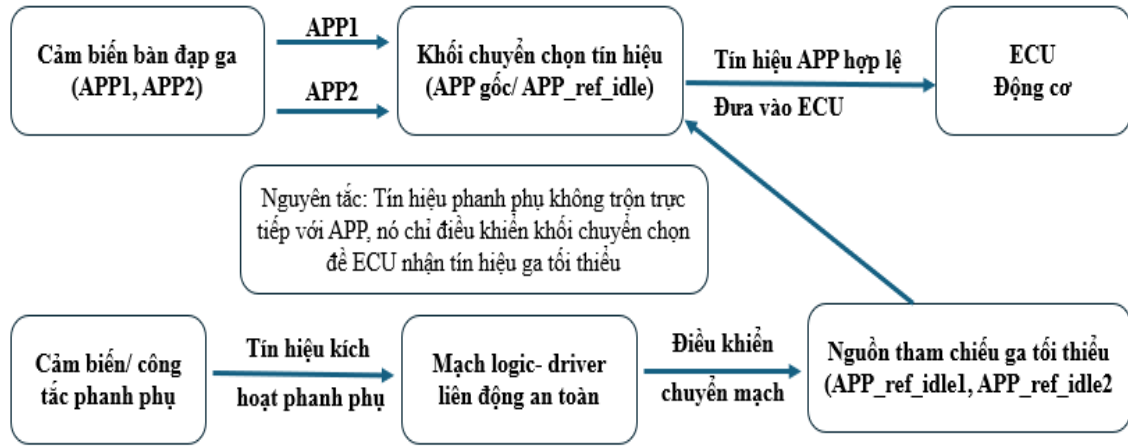
Trong các hệ thống ETCS (Electronic Throttle Control System – Intelligent) hiện đại, cảm biến bàn đạp ga APP thường cung cấp ít nhất hai kênh tín hiệu điện áp để ECU (Electronic Control Unit) đánh giá độ mở tương đương của bàn đạp ga và đồng thời kiểm tra tính hợp lệ của tín hiệu. Do đó, ECU không phát lệnh “điều khiển” đến cảm biến; ngược lại, ECU nhận tín hiệu từ cảm biến, đối chiếu quan hệ giữa các kênh APP và từ đó tính toán yêu cầu mô-men động cơ. Điều này có ý nghĩa then chốt đối với nghiên cứu, bởi mọi can thiệp ở tầng tín hiệu đầu vào phải bảo toàn được cấu trúc logic mà ECU có thể chấp nhận. Vì vậy, tín hiệu APP không nên được xem như một đường tín hiệu đơn có thể đóng/ngắt tùy ý. Nếu một kênh APP bị cắt hở, bị kéo xuống 0 V hoặc bị thay đổi độc lập so với kênh còn lại, ECU có thể diễn giải đó là lỗi hở mạch, ngắn mạch hoặc lỗi tương quan giữa các kênh. Trong nghiên cứu này, trạng thái an toàn mong muốn không phải là làm mất tín hiệu APP, mà là

đưa cấp tín hiệu APP về vùng giá trị tương ứng với trạng thái bàn đạp ga nhả hoàn toàn và vẫn nằm trong miền hợp lệ đối với ECU.

Về phương diện hệ thống điều khiển, các công trình về ETC (electronic throttle control) cũng nhấn mạnh rằng hệ ga điện tử là một hệ cơ điện tử (mechatronics) có yêu cầu cao về chẩn đoán sai lỗi và giám sát tình trạng làm việc. Conatser và cộng sự đã đề xuất chiến lược chẩn đoán thời gian thực cho ETC nhằm phát hiện và cô lập bất thường trong hệ thống [9]. Ở cấp độ an toàn chức năng, Zhang và cộng sự [10] xây dựng cách tiếp cận model-based diagnosis và fault tolerant control cho pedal-by-wire nhằm bảo đảm torque functional safety theo tinh thần ISO 26262 [11]. Những kết quả này củng cố lựa chọn thiết kế của nghiên cứu theo hướng can thiệp có điều kiện, bảo toàn tính hợp lệ tín hiệu và ưu tiên trạng thái an toàn.

Từ góc nhìn điều khiển, bài toán đặt ra là một bài toán liên động an toàn (safety interlock) ở tầng giám sát đầu vào. Tín hiệu từ phanh phụ của giáo viên không được ghép cộng hoặc trộn trực tiếp vào tín hiệu APP, vì cách làm đó tạo ra một đại lượng đầu vào không còn ý nghĩa vật lý đối với ECU. Tương tự, việc cắt hở hoàn toàn tín hiệu APP bằng rơ-le đơn thuần cũng không thích hợp, bởi ECU có thể diễn giải đó là lỗi cảm biến hoặc đứt mạch. Trạng thái an toàn mong muốn trong nghiên cứu này không phải là “ngắt động cơ”, mà là buộc yêu cầu mô-men về mức tối thiểu tương ứng với trạng thái nhả ga để hệ thống phanh làm việc hiệu quả hơn.

Theo đó, hệ thống được xây dựng trên nguyên lý chuyển chọn tín hiệu có điều kiện: ở chế độ bình thường, ECU nhận cấp tín hiệu APP gốc từ bàn đạp ga; khi phanh phụ được tác động, một khối chuyển mạch sẽ cô lập đường APP gốc và đưa tới ECU một cấp tín hiệu tham chiếu APP_ref_idle được hiệu chỉnh trước, bảo toàn quan hệ hợp lệ giữa hai kênh. Cách tiếp cận này phù hợp hơn với yêu cầu fail-safe và tương thích với logic chẩn đoán của ECU so với phương án cắt hở mạch một kênh tín hiệu.

**Hình 1.** Sơ đồ khối kiến trúc liên động phanh phụ - tín hiệu bàn đạp ga

2.3. Mô hình động lực học phanh khi tồn tại lực kéo động cơ

Trên cơ sở mô hình động lực học chuyển động thẳng của ô tô, nghiên cứu thiết lập phương trình cân bằng lực theo phương dọc khi phanh[12],[13]: Từ đó, lực phanh được xác định cho các kịch bản làm việc khác nhau Ba trường hợp làm việc điển hình được xem xét trong đánh giá: Trường hợp 1: Học viên nhả ga đúng lúc khi giáo viên sử dụng phanh phụ. Trường hợp 2: Học viên vẫn giữ ga, xe trang bị hệ thống ngắt tín hiệu chân ga được đề xuất. Trường hợp 3: Học viên vẫn giữ ga, xe không trang bị hệ thống ngắt ga. Đặc điểm của ba trường hợp đánh giá được tổng hợp định tính trong Bảng 2, làm cơ sở cho việc xây dựng kịch bản thử nghiệm mô hình, tập trung vào các chỉ tiêu lực phanh cần thiết với gia tốc giảm dần.

$$m\delta \frac{dv}{dt} = P_k - P_p - P_f - P_w - P_i \quad (1)$$

Trong đó:

m là khối lượng xe

v là vận tốc xe

δ là hệ số kể đến khối lượng quay quy đổi

P_k là lực kéo từ hệ thống truyền lực,

P_p là lực phanh tổng hợp tại bánh xe,

P_f là lực cản lăn,

P_w là lực cản không khí và

P_i là lực cản dốc.

Khi giáo viên tác động phanh phụ trong khi học viên vẫn giữ ga, thành phần P_k không triệt tiêu mà tiếp tục tồn tại ngược chiều với yêu cầu giảm tốc. Điều này làm tăng lực phanh cần thiết nếu muốn đạt cùng mức gia tốc chậm dần. Ngược lại, khi hệ thống liên động đưa tín hiệu APP về trạng thái idle, P_k giảm mạnh, điều kiện phanh tiến gần hơn tới trường hợp học viên chủ động nhả ga.

Nghiên cứu xem xét ba trường hợp (TH) điển hình: TH1 - học viên nhả ga đúng lúc khi giáo viên đạp phanh phụ; TH2 - học viên vẫn giữ ga nhưng xe có hệ thống liên động, nên yêu cầu mô-men được ép về mức ga tối thiểu khi phanh phụ tác động; TH3 - học viên vẫn giữ ga và xe không có cơ chế liên động, khi đó lực kéo và lực phanh cùng tồn tại đối kháng.

Bảng 2. So sánh ba trường hợp đánh giá hệ thống.

Trường hợp	Mô tả	Tác động tới ECU	Đánh giá định tính
TH1	Học viên nhả ga, giáo viên đạp phanh phụ	ECU nhận APP gốc ở mức thấp	Điều kiện chuẩn tham chiếu
TH2	Học viên giữ ga, phanh phụ kích hoạt liên động	ECU nhận APP_ref_idle	Hiệu quả phanh tiệm cận TH1
TH3	Học viên giữ ga, không có liên động	ECU tiếp tục nhận APP gốc	Tăng lực phanh yêu cầu, tăng tải nhiệt

3. Thiết kế và xây dựng mô hình hệ thống

3.1. Khảo sát hiện trạng sử dụng phanh phụ

Nghiên cứu đã thiết kế phiếu khảo sát và thu thập ý kiến của 60 giáo viên dạy thực hành lái xe tại các trung tâm đào tạo lái xe thuộc nhiều đơn vị khác nhau. Phiếu khảo sát tập trung vào các nội dung: đánh giá cấu tạo phanh phụ, mức độ nguy hiểm của từng bài tập thực hành, tần suất sử dụng phanh phụ và nhu cầu trang bị hệ thống giảm/ngắt ga khi giáo viên đạp phanh phụ. 95% giáo viên cho rằng hệ thống phanh phụ “cần cải tiến để đảm bảo an toàn trong mọi tình huống”. Trong các bài tập, mức độ nguy hiểm được đánh giá cao nhất đối với các bài “tập lái xe trên đường thành phố” (75,4% đánh giá nguy hiểm) và “tập lái xe trên đường cao tốc” (91,6% đánh giá nguy hiểm). Tần suất sử dụng phanh phụ trong một giờ giảng dạy khá cao, đặc biệt ở các bài tập trên đường đèo dốc, thành phố, ban đêm, cho thấy giáo viên phải thường xuyên can thiệp để bảo trợ tay lái. 100% giáo viên đánh giá tình huống “giáo viên sử dụng phanh phụ, học viên vẫn đạp ga” là nguy hiểm và 100% đồng ý rằng “nếu có hệ thống tự động giảm/ngắt ga khi giáo viên đạp phanh phụ thì quá tốt”. Các kết quả này khẳng định nhu cầu thực tiễn và là cơ sở quan trọng để đề xuất giải pháp ngắt tín hiệu chân ga trên xe tập lái.

Bảng 1. Kết quả tổng hợp khảo sát giáo viên dạy lái.

Chỉ tiêu khảo sát	Kết quả
Giáo viên nhận định phanh phụ hiện nay cần cải tiến	95%
Giáo viên đánh giá tình huống phanh phụ - giữ ga là nguy hiểm	100%
Giáo viên ủng hộ giải pháp tự động đưa ga về trạng thái an toàn	100%
Bài thực hành có mức nguy hiểm cao	Đường thành phố, đường cao tốc, đường đèo dốc, chạy ban đêm

Kết quả khảo sát cho thấy trạng thái giáo viên sử dụng phanh phụ trong khi học viên vẫn giữ ga được đánh giá là tình huống có nguy cơ cao. Đây là cơ sở thực tiễn để nghiên cứu cơ chế liên động, trong đó phanh phụ không chỉ tạo lực phanh mà

còn kích hoạt trạng thái giảm yêu cầu mô-men động cơ ở tăng tín hiệu điều khiển.

3.2. Mô hình hệ thống xe tập lái Toyota Vios

Toyota Vios được lựa chọn do đây là dòng xe phổ biến trong đào tạo lái xe hạng B tại Việt Nam[14],[15]. Trong nghiên cứu này, xe được xem xét ở cấu hình sử dụng bàn đạp ga điện tử và hộp số cơ khí. Các thông số trong Bảng 3 được sử dụng làm cơ sở cho phân tích động lực học phanh và xây dựng kịch bản thử nghiệm mô hình. Giá trị APP_ref_idle cần được hiệu chỉnh theo điện áp nhả ga thực đo trên từng cấu hình xe cụ thể trước khi thử nghiệm với ECU thật.

Bảng 3. Một số thông số kỹ thuật chính của Toyota Vios sử dụng trong nghiên cứu

Thông số	Giá trị
Khối lượng bản thân	1110 kg
Khối lượng toàn bộ	1550 kg
Dung tích động cơ	1496 cm ³
Công suất cực đại	79 kW tại 6000 vòng/phút
Mô-men xoắn cực đại	141 N·m tại 4200 vòng/phút
Hộp số	5 MT
Tỷ số truyền tay số tiến	I: 3,545; II: 1,904; III: 1,310; IV: 0,969; V: 0,815
Tỷ số truyền cầu chủ động	4,857

3.3. Kiến trúc phần cứng của hệ thống liên động

Kiến trúc phần cứng sau khi hiệu chỉnh gồm bốn khối chức năng được thể hiện Hình 3 gồm: (i) cảm biến/công tắc hành trình phanh phụ; (ii) mạch logic - driver tiếp nhận tín hiệu điều kiện từ phanh phụ; (iii) khối chuyển mạch hai kênh để lựa chọn giữa APP gốc và APP_ref_idle; và (iv) nguồn tham chiếu ga tối thiểu. Điểm quan trọng của kiến trúc này là khối chuyển mạch phải xử lý đồng thời cả hai kênh APP. Trường hợp chỉ can thiệp một kênh hoặc tạo ra sai lệch không phù hợp giữa APP1 và APP2 có thể làm ECU phát hiện lỗi tương quan tín hiệu. Do đó, bộ tạo APP_ref_idle cần được hiệu chỉnh theo giá trị điện áp nhả ga thực tế và phải duy trì quan hệ tương quan giữa hai kênh trong suốt quá trình chuyển trạng thái. Vì vậy, ECU vẫn

nhận được một bộ tín hiệu có ý nghĩa vật lý và có thể diễn giải đó là trạng thái nhả ga.

Về nguyên tắc triển khai, đối với xe có hai kênh APP, mạch phải xử lý đồng thời cả hai kênh để bảo toàn quan hệ chẩn đoán. Nguồn APP_ref_idle có thể được xây dựng bằng mạch chia áp chính xác hoặc mạch đệm điện áp, sau đó hiệu chỉnh theo điện áp nhả ga thực đo được trên xe. Khi phanh phụ chưa tác động, công tắc thường đóng duy trì đường APP gốc. Khi giáo viên đạp phanh phụ, tín hiệu điều kiện từ cảm biến hành trình sẽ kích hoạt driver và chuyển cả hai kênh sang nguồn APP_ref_idle.

3.4. Nguyên lý làm việc và yêu cầu fail-safe

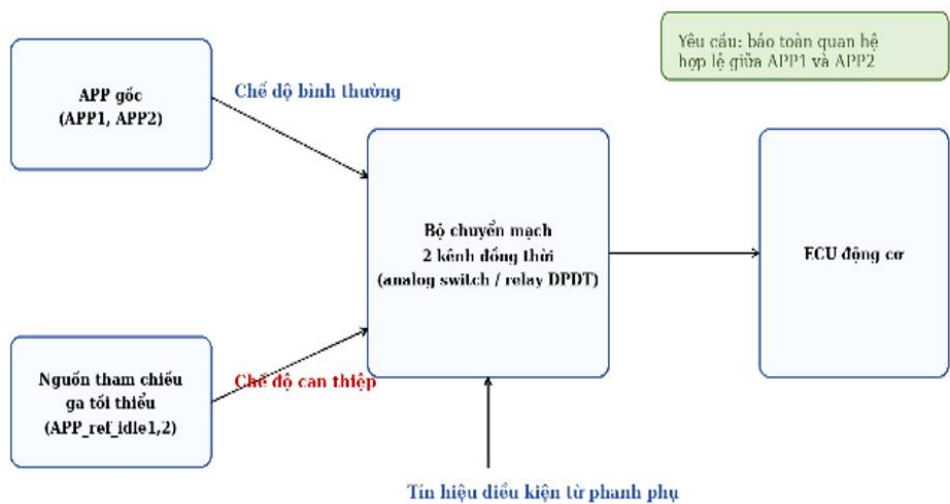
Hệ thống làm việc theo ba trạng thái. Trạng thái thứ nhất là vận hành bình thường: phanh phụ không tác động, khối chuyển mạch ở vị trí thông mạch với đường APP gốc, ECU xử lý yêu cầu mô-men hoàn toàn theo thao tác của học viên. Trạng thái thứ hai là can thiệp an toàn: khi giáo viên đạp phanh phụ ($\geq 80\%$ hành trình), ngưỡng kích hoạt 80% hành trình phanh phụ được lựa chọn như một ngưỡng can thiệp bảo thủ nhằm phân biệt giữa thao tác phanh điều chỉnh nhẹ và thao tác phanh khẩn cấp hoặc can thiệp an toàn rõ rệt của giáo viên. Khi phanh phụ dưới ngưỡng này, hệ

thống chưa chuyển sang APP_ref_idle để tránh kích hoạt nhầm trong các tình huống giáo viên chỉ hỗ trợ giảm tốc nhẹ. Khi hành trình phanh phụ đạt hoặc vượt 80%, hệ thống ưu tiên trạng thái giảm yêu cầu mô-men động cơ nhằm hạn chế xung đột ga-phanh.

Bảng 4. Phân vùng hành trình phanh phụ và trạng thái liên động đề xuất

Vùng hành trình phanh phụ	Ý nghĩa thao tác	Trạng thái hệ thống
0–20%	Dao động cơ khí, chậm nhẹ	Không kích hoạt
20–60%	Phanh hỗ trợ nhẹ	Không chuyển APP_ref_idle
60–80%	Phanh can thiệp rõ rệt	Ghi nhận trạng thái, chưa cưỡng bức idle
$\geq 80\%$	Phanh khẩn cấp hoặc can thiệp an toàn	Chuyển sang APP_ref_idle

Tín hiệu điều kiện từ cảm biến hành trình được đưa tới mạch logic, mạch logic kích hoạt khối chuyển mạch và thay thế đường APP gốc bằng APP_ref_idle theo sơ đồ Hình 2.



Hình 2. Nguyên lý chuyển chọn đồng thời hai kênh APP gốc và APP_ref_idle

ECU khi đó diễn giải bàn đạp ga ở vị trí nhả, mô-men động cơ giảm về vùng tải nhỏ. Trạng thái thứ ba là phục hồi sau can thiệp: khi giáo viên nhả phanh phụ, khối chuyển mạch tự động trở về đường APP gốc để học viên tiếp tục điều khiển.

Yêu cầu fail-safe được xem xét ở hai mức. Ở mức chức năng, mọi can thiệp phải đưa hệ thống về trạng thái an toàn có thể dự đoán, nghĩa là ưu tiên giảm yêu cầu mô-men thay vì duy trì yêu cầu ga cũ. Ở mức phần cứng, mạch phải hạn chế khả năng

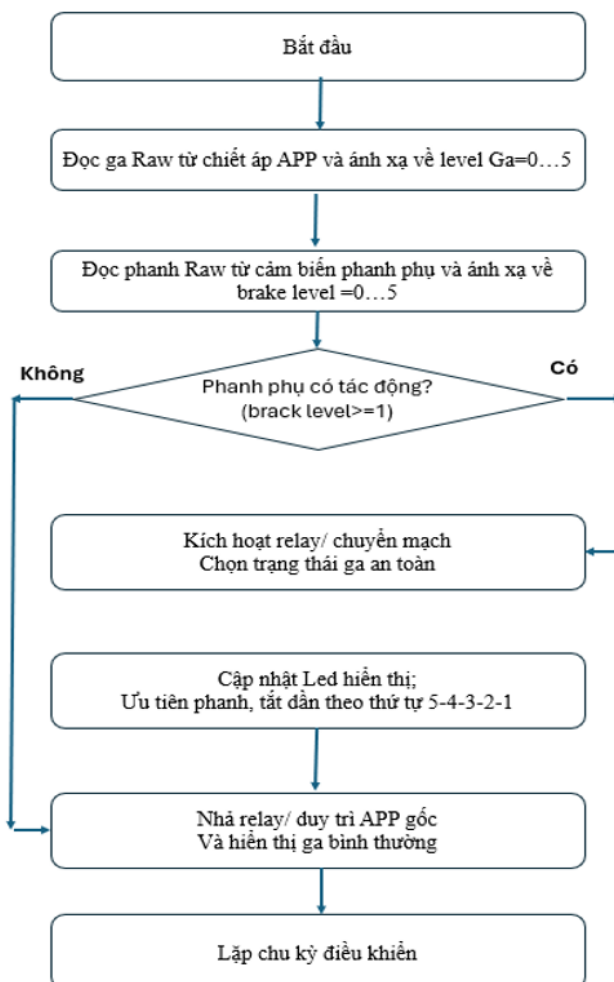
đưa ECU vào trạng thái lỗi giả do sai khác giữa APP1 và APP2; vì vậy, việc hiệu chỉnh nguồn APP_ref_idle và lựa chọn phần tử chuyển mạch có điện trở tiếp xúc nhỏ, độ trễ thấp và độ ổn định tốt là điều kiện cần để triển khai trên xe thực.



Hình 3. Mô hình thực nghiệm hệ thống liên động ga - phanh phụ đã được chế tạo

3.5. Thuật toán điều khiển và mô hình thực nghiệm

Để kiểm chứng logic làm việc của hệ thống, nhóm nghiên cứu xây dựng mô hình bench-top gồm hai cụm biến trở mô phỏng bàn đạp ga và hành trình phanh phụ, vi điều khiển Arduino, phần tử relay/driver, cụm LED hiển thị mức yêu cầu ga và nguồn nuôi độc lập. Mục đích của mô hình là xác nhận trình tự chuyển trạng thái, khả năng ưu tiên phanh và thời gian đáp ứng của khối chuyển mạch trong điều kiện mô phỏng. Mô hình này chưa thay thế cho thử nghiệm trên ECU thật, nhưng cho phép đánh giá sơ bộ tính khả thi của nguyên lý liên động.



Hình 4. Lưu đồ thuật toán điều khiển của mô hình thực nghiệm

Thuật toán điều khiển được tổ chức theo chu trình Hình 4: đọc tín hiệu ga; đọc tín hiệu phanh phụ; xác định mức can thiệp; nếu phanh phụ chưa tác động thì truyền trạng thái ga cơ sở; nếu phanh phụ tác động thì kích hoạt relay/khởi chuyển mạch để cường bức yêu cầu ga về mức nhỏ nhất. Hệ đèn LED trên mô hình được dùng để biểu diễn trực quan mức ga và mức phanh trong quá trình thử nghiệm.

3.6. Kịch bản thử nghiệm và phương pháp đo

Các thử nghiệm được xây dựng nhằm kiểm tra khả năng chuyển trạng thái của hệ thống trong các tình huống đặc trưng của quá trình đào tạo lái xe. Thời gian đáp ứng được xác định từ thời điểm tín hiệu phanh phụ vượt ngưỡng kích hoạt đến thời điểm đầu ra mô phỏng yêu cầu ga chuyển về trạng thái idle. Mỗi kịch bản được lặp lại nhiều chu kỳ để đánh giá tính ổn định và khả năng kích hoạt nhằm của mô hình.

Bảng 5. Kịch bản thử nghiệm mô hình

Kịch bản	Trạng thái ga mô phỏng	Trạng thái phanh phụ	Kết quả mong đợi
K1	0%	0%	Không kích hoạt liên động
K2	50%	<80% hành trình	Không chuyển sang idle
K3	100%	≥80% hành trình	Chuyển đầu ra về trạng thái idle
K4	100%	≥80%, sau đó nhả phanh	Phục hồi về tín hiệu ga ban đầu
K5	100 chu kỳ	Phanh dưới ngưỡng	Không kích hoạt nhằm
K6	>500 chu kỳ	Lặp phanh vượt ngưỡng	Hoạt động ổn định

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Hiệu quả định tính của cơ chế liên động

So sánh ba trường hợp đánh giá cho thấy TH2, tức trường hợp học viên vẫn giữ ga nhưng hệ thống liên động được kích hoạt, có xu hướng đưa yêu cầu mô-men động cơ về gần trạng thái TH1, trong đó học viên nhả ga đúng lúc. Về mặt lý thuyết, khi ECU nhận cập tín hiệu tương ứng trạng thái idle, thành phần lực kéo P_k giảm đáng kể, từ đó làm giảm mức đối kháng giữa lực kéo động cơ và lực phanh. Tuy nhiên, ảnh hưởng định lượng

đến quãng đường phanh, thời gian dừng và tải nhiệt phanh cần được xác nhận bằng thử nghiệm trên xe thật hoặc mô phỏng động lực học có tham số thực nghiệm.

Để đánh giá sơ bộ logic ưu tiên phanh của hệ thống liên động, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm mô hình theo các kịch bản đã xây dựng. Các kết quả tập trung vào thời gian đáp ứng chuyển trạng thái, khả năng tránh kích hoạt nhằm dưới ngưỡng và độ ổn định khi lặp chu kỳ vận hành, được trình bày trong Bảng 6.

Bảng 6. Kết quả thử nghiệm mô hình

Thông số đánh giá	Kết quả mô hình	Điều kiện thử nghiệm	Nhận xét
Thời gian đáp ứng chuyển trạng thái	20–50 ms	Ga mô phỏng 100%, nguồn 12 V ổn định	Đáp ứng nhanh ở mức mô hình bench-top
Tỷ lệ kích hoạt nhằm dưới ngưỡng	0/100 chu kỳ	Phanh phụ <80% hành trình	Không ghi nhận kích hoạt nhằm trong điều kiện thử
Số chu kỳ vận hành ổn định	>500 chu kỳ	Lặp lại trạng thái ga–phanh	Xác nhận ổn định logic ban đầu
Trạng thái đầu ra khi phanh kích hoạt	Chuyển về mức mô phỏng idle	Ga mô phỏng vẫn giữ 100%	Chỉ xác nhận trên mô hình, chưa kết luận ECU thật
Thời gian chỉ thị mức ga giảm về idle	≈30 ms	Ga ban đầu 100%	Xác nhận khả năng ưu tiên phanh của mô hình

Các kết quả thử nghiệm cho thấy mô hình thực nghiệm thực hiện đúng logic ưu tiên phanh theo thiết kế. Khi tín hiệu phanh phụ vượt ngưỡng kích hoạt, đầu ra mô phỏng yêu cầu ga được đưa về trạng thái idle trong khoảng 20–50 ms. Kết quả này xác nhận tính khả thi ban đầu của cơ chế liên động ở tầng mô hình tín hiệu. Tuy nhiên, do thử nghiệm chưa được thực hiện trên ECU thật, các kết luận về khả năng tương thích chẩn đoán, phát sinh mã lỗi, ảnh hưởng đến mô-men động cơ và hiệu quả giảm quãng đường phanh cần được kiểm chứng trong giai đoạn nghiên cứu tiếp theo.

4.2. Ý nghĩa kỹ thuật và khả năng ứng dụng

Giải pháp đề xuất có ba ưu điểm. Thứ nhất, nó can thiệp ở tầng tín hiệu đầu vào nên không cần sửa đổi phần mềm ECU nguyên bản; mức độ cải tạo vì vậy thấp hơn so với việc xây dựng bộ điều khiển thay thế. Thứ hai, kiến trúc chuyển chọn tín hiệu có điều kiện phù hợp với logic chẩn đoán của ECU hơn phương án cắt hở mạch APP. Thứ ba, chi phí linh kiện không lớn, có thể triển khai dưới dạng bộ phụ trợ cho xe tập lái đang khai thác.

Bên cạnh đó, nghiên cứu vẫn còn các giới hạn cần thừa nhận. Mô hình thực nghiệm hiện được triển khai chủ yếu ở mức bench và phân tích trên một dòng xe đại diện; chưa tiến hành chuỗi thử nghiệm đường dài trên nhiều kiểu xe và nhiều điều kiện mặt đường. Ngoài ra, trong trường hợp ứng dụng ở quy mô thương mại, hệ thống cần được đánh giá sâu hơn về độ tin cậy linh kiện, tương

thích điện từ và tương tác với các chiến lược chẩn đoán lỗi của ECU.

Bảng 7. Tổng hợp lợi ích và giới hạn của giải pháp đề xuất

Khía cạnh	Nhận xét
An toàn vận hành	Có tiềm năng giảm xung đột ga–phanh khi giáo viên can thiệp bằng phanh phụ
Tính đúng nguyên lý	Không trộn tín hiệu, không cắt hở APP; định hướng duy trì cấp tín hiệu hợp lệ
Chi phí triển khai	Có thể thấp đến trung bình nếu dùng linh kiện phổ thông và thiết kế phụ trợ
Giới hạn hiện tại	Mới kiểm chứng ở mức bench-top, chưa thử ECU và xe thật
Hướng phát triển	Cần đo APP1/APP2 thực tế, kiểm tra DTC (Diagnostic Trouble Code), thử nghiệm EMC (Automotive Electromagnetic Compatibility), rung, nhiệt và thử nghiệm phanh thực địa

4.3. Phân tích an toàn chức năng sơ bộ

Do hệ thống đề xuất can thiệp vào tầng tín hiệu đầu vào của ECU, việc đánh giá các dạng lỗi tiềm ẩn là cần thiết trước khi triển khai trên phương tiện thật. Nghiên cứu thực hiện phân tích FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) sơ bộ nhằm nhận diện các lỗi có thể ảnh hưởng đến trạng thái tín hiệu APP và đề xuất biện pháp kiểm soát tương ứng.

Bảng 8. Phân tích FMEA sơ bộ của hệ thống liên động phanh phụ – APP

Dạng lỗi	Hậu quả tiềm ẩn	Mức ảnh hưởng	Biện pháp kiểm soát
Mất nguồn mạch liên động	Không chuyển sang APP_ref_idle khi phanh phụ kích hoạt	Cao	Kiểm tra nguồn trước vận hành, cảnh báo lỗi
Kẹt chuyển mạch ở APP gốc	Hệ thống không can thiệp khi cần	Cao	Tự kiểm tra trạng thái chuyển mạch
Kẹt chuyển mạch ở APP_ref_idle	Xe không tăng ga được	Trung bình	Thiết kế bypass an toàn, cảnh báo giáo viên

Dạng lỗi	Hậu quả tiềm ẩn	Mức ảnh hưởng	Biện pháp kiểm soát
Sai lệch APP1_ref/APP2_ref	ECU báo lỗi tương quan APP	Cao	Hiệu chỉnh hai kênh theo dữ liệu thực đo
Nhiều tín hiệu phanh phụ	Kích hoạt nhầm	Trung bình	Lọc tín hiệu, debounce, hysteresis
Đứt dây cảm biến phanh phụ	Không nhận biết can thiệp phanh phụ	Cao	Chẩn đoán hở mạch, kiểm tra định kỳ
Điện trở tiếp xúc chuyển mạch tăng	Méo tín hiệu APP	Trung bình	Dùng linh kiện automotive-grade, kiểm tra độ bền

5. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất kiến trúc liên động giữa phanh phụ và bàn đạp ga điện tử trên ô tô tập lái nhằm giảm nguy cơ xung đột ga-phanh khi học viên đạp nhầm hoặc giữ chân ga trong lúc giáo viên can thiệp bằng phanh phụ. Khác với phương án cắt hở tín hiệu bàn đạp ga, giải pháp đề xuất sử dụng nguyên lý chuyển chọn tín hiệu, trong đó cặp tín hiệu APP gốc được thay thế bằng cặp tín hiệu tham chiếu tương ứng với trạng thái nhả ga khi phanh phụ vượt ngưỡng kích hoạt.

Kết quả thử nghiệm trên mô hình bench-top cho thấy logic ưu tiên phanh hoạt động đúng theo thiết kế, thời gian đáp ứng chuyển trạng thái đạt khoảng 20–50 ms và không ghi nhận kích hoạt nhầm trong 100 chu kỳ thử dưới ngưỡng. Kết quả này xác nhận tính khả thi ban đầu của nguyên lý liên động phanh phụ – APP.

Tuy nhiên, nghiên cứu hiện mới dừng ở mức mô hình mô phỏng tín hiệu. Để ứng dụng thực tế, cần tiếp tục đo đặc điện áp APP1/APP2 trên xe thật, hiệu chỉnh giá trị APP_ref_idle theo từng cấu hình ECU, kiểm tra mã lỗi chẩn đoán, đánh giá tương thích điện từ, độ bền linh kiện và thử nghiệm động lực học phanh trong điều kiện vận hành thực tế.

Phụ lục

Listing 1. Thuật toán điều khiển ưu tiên phanh trên mô hình thực nghiệm.

```
/*
```

Mục đích:

- Đọc tín hiệu ga mô phỏng từ biến trở chân A0.
- Đọc tín hiệu phanh phụ mô phỏng từ biến trở chân A1.

- Khi phanh phụ $\geq 80\%$ hành trình: kích hoạt relay/chuyển mạch,

đưa yêu cầu ga mô phỏng về trạng thái idle.

- Khi phanh phụ giảm xuống dưới ngưỡng nhả: phục hồi tín hiệu ga ban đầu.

- LED hiển thị mức yêu cầu ga sau xử lý liên động.

Lưu ý:

- Code này chỉ dùng cho mô hình thực nghiệm Arduino.

- Không phải phần mềm điều khiển ECU thật.

- Khi triển khai trên xe thật cần kiểm tra APP1/APP2, DTC, nhiễu EMC,

độ bền linh kiện và an toàn chức năng.

```
*/
```

```
// ===== Khai báo chân tín hiệu =====
```

```
// Biến trở mô phỏng bàn đạp ga
```

```
const int gasPotPin = A0;
```

```
// Biến trở mô phỏng hành trình phanh phụ
```

```
const int brakePotPin = A1;
```

```
// Chân điều khiển relay hoặc khối chuyển mạch
```

```
const int relayPin = 8;
```

```
// 5 LED hiển thị mức yêu cầu ga sau xử lý
```

```
const int ledPins[5] = {3, 4, 5, 6, 7};
```

```
// ===== Thông số hiệu chuẩn ADC =====
```

```
// Dải ADC của Arduino UNO: 0–1023
```

```
const int ADC_MIN = 0;
```

```
const int ADC_MAX = 1023;
```

```
/*
```

Nếu biến trở mô hình không dùng toàn bộ dải 0–1023,

có thể hiệu chỉnh lại hai giá trị dưới đây theo số đo thực tế.

Ví dụ:

```

- Nếu khi không đạp phanh đọc được khoảng 60
- Khi đạp hết hành trình phanh đọc được khoảng 110
thì có thể sửa thành:
    const int BRAKE_ADC_MIN = 60;
    const int BRAKE_ADC_MAX = 110;
*/
const int BRAKE_ADC_MIN = 0;
const int BRAKE_ADC_MAX = 1023;
const int GAS_ADC_MIN = 0;
const int GAS_ADC_MAX = 1023;

// ===== Ngưỡng kích hoạt liên
động =====

/*
Ngưỡng kích hoạt:
- Kích hoạt liên động khi phanh phụ >= 80% hành
trình.
- Nhả liên động khi phanh phụ giảm xuống <= 75%
hành trình.
Việc dùng hai ngưỡng ON/OFF tạo hysteresis,
giúp tránh relay đóng/ngắt liên tục khi tín hiệu dao
động quanh 80%.
*/
const float BRAKE_ON_THRESHOLD_PERCENT =
80.0;
const float BRAKE_OFF_THRESHOLD_PERCENT =
75.0;

// ===== Thông số lọc và
debounce =====

// Số mẫu dùng để lọc trung bình ADC
const int FILTER_SAMPLES = 10;

// Thời gian xác nhận trạng thái trước khi đổi trạng
thái relay
const unsigned long DEBOUNCE_TIME_MS = 30;

// Chu kỳ lặp chính
const unsigned long LOOP_DELAY_MS = 10;

// ===== Biến trạng thái
=====

bool interlockActive = false;
bool pendingState = false;
bool lastRawState = false;
unsigned long lastStateChangeTime = 0;

// ===== Hàm đọc ADC trung
bình =====

int readAnalogAverage(int pin) {
    long sum = 0;

    for (int i = 0; i < FILTER_SAMPLES; i++) {
        sum += analogRead(pin);
        delayMicroseconds(300);
    }

    return (int)(sum / FILTER_SAMPLES);
}

// ===== Hàm giới hạn giá trị
=====

float constrainFloat(float value, float minValue, float
maxValue) {
    if (value < minValue) return minValue;
    if (value > maxValue) return maxValue;
    return value;
}

// ===== Chuyển ADC sang
phần trăm hành trình =====

float adcToPercent(int rawValue, int rawMin, int
rawMax) {
    if (rawMax == rawMin) {
        return 0.0;
    }

    float percent = 100.0 * (float)(rawValue - rawMin) /
(float)(rawMax - rawMin);
    return constrainFloat(percent, 0.0, 100.0);
}

```

```

// ===== Chuyển phần trăm ga sang mức LED 0-5 =====
int percentToLedLevel(float percent) {
    int level = 0;

    if (percent <= 0.0) {
        level = 0;
    } else if (percent <= 20.0) {
        level = 1;
    } else if (percent <= 40.0) {
        level = 2;
    } else if (percent <= 60.0) {
        level = 3;
    } else if (percent <= 80.0) {
        level = 4;
    } else {
        level = 5;
    }

    return level;
}

// ===== Hiển thị mức ga bằng LED =====
void displayGasLevel(int level) {
    level = constrain(level, 0, 5);

    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        if (i < level) {
            digitalWrite(ledPins[i], HIGH);
        } else {
            digitalWrite(ledPins[i], LOW);
        }
    }
}

// ===== Cập nhật trạng thái liên động có hysteresis =====
bool calculateInterlockCommand(float brakePercent, bool currentInterlockState) {
    if (!currentInterlockState) {
        // Chưa kích hoạt: chỉ kích hoạt khi phanh >= 80%
        if (brakePercent >= BRAKE_ON_THRESHOLD_PERCENT) {
            return true;
        } else {
            return false;
        }
    } else {
        // Đang kích hoạt: chỉ nhả khi phanh <= 75%
        if (brakePercent <= BRAKE_OFF_THRESHOLD_PERCENT) {
            return false;
        } else {
            return true;
        }
    }
}

// ===== Debounce trạng thái liên động =====
bool debounceInterlockState(bool rawCommand) {
    unsigned long currentTime = millis();

    if (rawCommand != lastRawState) {
        lastRawState = rawCommand;
        lastStateChangeTime = currentTime;
    }

    if ((currentTime - lastStateChangeTime) >= DEBOUNCE_TIME_MS) {
        pendingState = rawCommand;
    }

    return pendingState;
}

// ===== Setup =====
void setup() {
    // Khởi tạo LED
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        pinMode(ledPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(ledPins[i], LOW);
    }
}

```

```

// Khởi tạo relay
pinMode(relayPin, OUTPUT);
digitalWrite(relayPin, LOW);

// Khởi tạo Serial Monitor
Serial.begin(115200);
delay(200);

Serial.println("=====
=====");
Serial.println("MO HINH BENCH-TOP LIEN DONG
PHANH PHU - BAN DAP GA");
Serial.println("Nguong kích hoạt: phanh phu >= 80%
hành trình");
Serial.println("Nguong nha: phanh phu <= 75%
hành trình");

Serial.println("=====
=====");
}

// ===== Loop
=====

void loop() {
// 1. Đọc tín hiệu ADC đã lọc
int gasRaw = readAnalogAverage(gasPotPin);
int brakeRaw = readAnalogAverage(brakePotPin);

// 2. Quy đổi sang phần trăm hành trình
float gasPercent = adcToPercent(gasRaw,
GAS_ADC_MIN, GAS_ADC_MAX);
float brakePercent = adcToPercent(brakeRaw,
BRAKE_ADC_MIN, BRAKE_ADC_MAX);

// 3. Tính lệnh liên động theo ngưỡng 80% và
hysteresis 75%
bool rawInterlockCommand =
calculateInterlockCommand(brakePercent,
interlockActive);

// 4. Debounce để chống kích hoạt nhầm do nhiễu
hoặc dao động cơ khí
interlockActive =
debounceInterlockState(rawInterlockCommand);

// 5. Điều khiển relay/chuyển mạch
if (interlockActive) {
digitalWrite(relayPin, HIGH); // Kích hoạt chuyển
sang APP_ref_idle mô phỏng
} else {
digitalWrite(relayPin, LOW); // Trả về APP gốc mô
phỏng
}

// 6. Xác định mức yêu cầu ga sau xử lý liên động
float outputGasPercent;

if (interlockActive) {
outputGasPercent = 0.0; // Mô phỏng trạng thái
idle/nhả ga
} else {
outputGasPercent = gasPercent; // Bình thường:
giữ tín hiệu ga của học viên
}

// 7. Hiển thị LED theo mức ga sau xử lý
int ledLevel =
percentToLedLevel(outputGasPercent);
displayGasLevel(ledLevel);

// 8. In dữ liệu giám sát
Serial.print("gasRaw=");
Serial.print(gasRaw);

Serial.print(" | gasPercent=");
Serial.print(gasPercent, 1);
Serial.print("%");

Serial.print(" | brakeRaw=");
Serial.print(brakeRaw);

Serial.print(" | brakePercent=");
Serial.print(brakePercent, 1);
Serial.print("%");

Serial.print(" | interlock=");
Serial.print(interlockActive ? "ON" : "OFF");

Serial.print(" | outputGas=");
Serial.print(outputGasPercent, 1);
Serial.print("%");

Serial.print(" | ledLevel=");

```

```
Serial.println(ledLevel);  
  
delay(LOOP_DELAY_MS);  
}
```

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Cao Văn Dũng: đề xuất ý tưởng nghiên cứu, xây dựng hướng tiếp cận kỹ thuật và tham gia hoàn thiện bản thảo. **Nguyễn Văn Việt:** hỗ trợ chuẩn hóa cấu trúc bài báo theo định dạng tạp chí, biên tập hình ảnh và hoàn thiện phần trình bày. **Đỗ Hùng Chiến:** Giám sát toàn bộ nghiên cứu, phân tích hệ thống điều khiển, xây dựng mô hình lý thuyết, chỉnh sửa bản thảo, và phê duyệt phiên bản cuối cùng.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1st Cao Van Dung. *Tran Dai Nghia University*

2nd Nguyen Van Viet. *Van Lang University*

3rd Do Hung Chien*. *University of Transport Ho Chi Minh City*

*Corresponding author: chien.do@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] Chính phủ, *Nghị định số 160/2024/NĐ-CP ngày 18/12/2024 quy định về hoạt động đào tạo và sát hạch lái xe*, Hà Nội, Việt Nam, 2024.
- [2] Bộ Xây dựng, *Thông tư số 14/2025/TT-BXD ngày 30/06/2025 quy định về đào tạo lái xe; bồi dưỡng, kiểm tra, cấp chứng chỉ bồi dưỡng kiến thức pháp luật về giao thông đường bộ*, Hà Nội, Việt Nam, 2025.
- [3] K. Hasegawa, M. Kimura, and Y. Takeda, "Pedal Misapplication: Interruption Effects and Age-Related Differences," *Human Factors*, vol. 63, no. 8, pp. 1342–1351, 2021, doi: 10.1177/0018720820936122.
- [4] K. Hasegawa, M. Kimura, and Y. Takeda, "Age-related differences in correction behavior for unintended acceleration," *PLOS ONE*, vol. 15, no. 7,

Art. no. e0236053, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0236053.

- [5] J. G. Gaspar and D. V. McGehee, "Driver brake response to sudden unintended acceleration while parking," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 2, Art. no. 100039, 2019, doi: 10.1016/j.trip.2019.100039.
- [6] Y. Lee and J. Lee, "Report on pedal confusion in driving via forensic video," *Forensic Science International: Reports*, vol. 5, Art. no. 100269, 2022, doi: 10.1016/j.fsir.2022.100269.
- [7] N. X. Trung, "Một số bất cập trong quản lý nhà nước về đào tạo và sát hạch lái xe ô tô," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, vol. 227, no. 9, pp. 3–13, 2022, doi: 10.34238/tnu-jst.5347.
- [8] V. L. K. Thanh and N. K. Nguyên, "Nghiên cứu chế tạo mô hình dạy lái ô tô," *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, vol. 59, no. 4, pp. 57–65, 2023, doi: 10.22144/ctujos.2023.161.
- [9] R. Conatser, J. Wagner, S. Ganta, and I. Walker, "Diagnosis of automotive electronic throttle control systems," *Control Engineering Practice*, vol. 12, no. 1, pp. 23–30, 2004, doi: 10.1016/S0967-0661(02)00281-2.
- [10] J. Zhang, G. Rizzoni, A. Cordoba-Arenas, A. Amodio, and B. Aksun-Guvenc, "Model-based diagnosis and fault tolerant control for ensuring torque functional safety of pedal-by-wire systems," *Control Engineering Practice*, vol. 61, pp. 255–269, 2017, doi: 10.1016/j.conengprac.2016.11.017.
- [11] *ISO 26262:2018, Road Vehicles—Functional Safety*, 2nd ed. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [12] Đ. Quý, *Giáo trình lý thuyết ô tô*. TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam: NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2012.
- [13] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2012, doi: 10.1007/978-1-4614-1433-9.
- [14] Toyota Motor Corporation, *Toyota Repair Manual – Accelerator Pedal Position Sensor Diagnostic Description VPA/VPA2*, Toyota Technical Service Publication.
- [15] Toyota Motor Corporation, *Toyota Vios Repair Manual and New Car Features*, Toyota Technical Service Publication, 2015.