

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM

PHAN NGUYỄN QUÍ TÂM

NGHIÊN CỨU, ỨNG DỤNG
NĂNG LƯỢNG ĐIỆN CẢM TRÊN Ô TÔ

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí
Mã số chuyên ngành: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH- 06/2021

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS Đỗ Văn Dũng

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Nguyễn Bá Hải

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu khoa học của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tôi cam đoan rằng nội dung tham khảo cho việc thực hiện luận án đã được trích dẫn rõ ràng.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 04 tháng 06 năm 2021

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

Phan Nguyễn Quý Tâm

LỜI CẢM ƠN

Người nghiên cứu chân thành cảm ơn:

- PGS.TS Đỗ Văn Dũng và TS. Nguyễn Bá Hải, hai giảng viên hướng dẫn khoa học, đã cho tôi cơ hội bắt đầu luận án, tận tình hướng dẫn, định hướng, dành thời gian đọc và hiệu chỉnh nội dung khoa học.
- Ban Giám Hiệu, Phòng Đào Tạo – Bộ phận Sau Đại Học, Ban Chủ Nhiệm Khoa Cơ Khí Động Lực, Khoa Cơ Khí Chế Tạo Máy, Khoa Điện – Điện Tử, Quý Thầy, Cô giáo Trường ĐHSPKT TP. HCM.
- Các đồng nghiệp, cộng sự tại phòng thí nghiệm điện tử ô tô, phòng thí nghiệm ô tô - Trường ĐHSPKT TP. HCM đã tận tình hỗ trợ, động viên tôi trong suốt thời gian dài thực hiện nội dung khoa học.
- Các thành viên hội đồng đánh giá đã dành thời gian đọc, góp ý nội dung nghiên cứu.
- Các chuyên gia đầu ngành, các nhà khoa học đã phản biện, góp ý cho các bài báo khoa học, tóm tắt luận án.
- Các Anh, Chị học viên cùng niên khóa 2013-2016 ngành kỹ thuật cơ khí.
- Các thành viên gia đình, người thân đã luôn tin tưởng, ủng hộ và tạo mọi điều kiện thuận lợi để nghiên cứu sinh chuyên tâm trong quá trình học tập, nghiên cứu và thực hiện luận án.

Trân trọng!

Tp. Hồ Chí Minh, 04 tháng 06 năm 2021
Nghiên cứu sinh

Phan Nguyễn Quý Tâm

TÓM TẮT

Thu hồi và sử năng lượng điện cảm trên ô tô là một hướng nghiên cứu mới hiện nay. Mục tiêu chính của luận án là nghiên cứu thu hồi nguồn năng lượng điện cảm tồn tại trên các cuộn dây trong quá trình hoạt động để tái sử dụng cho nhiều ứng dụng trong đó có việc cải thiện tính đáp ứng của kim phun. Nội dung nghiên cứu không những góp phần tiết kiệm năng lượng trên động cơ đánh lửa cưỡng bức mà còn giúp tiết kiệm nhiên liệu, giảm thiểu ô nhiễm môi trường và tăng tuổi thọ các chi tiết điện tử của hệ thống điện trên ô tô.

Những đóng góp mới của luận án thể hiện qua các nội dung sau:

- Xây dựng mô hình vật lý và mô hình toán cho hệ thống thu hồi năng lượng điện cảm trên bobine bằng việc sử dụng hệ siêu tụ điện.
- Thiết kế, chế tạo mô hình thử nghiệm thu hồi năng lượng điện cảm trên các cuộn dây sơ cấp bobine và kim phun.
- Sử dụng hệ siêu tụ điện tích trữ năng lượng tự cảm để điều khiển kim phun.

Luận án được trình bày trong 5 chương bao gồm 99 trang (không kể phần tài liệu Luận án được trình bày trong 05 chương bao gồm 99 trang (không kể phần tài liệu tham khảo và phụ lục). Trong đó, chương 1 trình bày tổng quan các vấn đề nghiên cứu về hệ thống năng lượng điện cảm trên ô tô, phân tích các công trình trong và ngoài nước có đề cập đến hướng nghiên cứu. Trên cơ sở đó, người nghiên cứu đề xuất mục tiêu và nội dung nghiên cứu. Chương 2 nghiên cứu sinh phân tích cơ sở lý thuyết về cuộn cảm, năng lượng điện cảm, xây dựng mô hình, tính toán và mô phỏng năng lượng tích lũy trên bobine, kim phun. Cơ sở lý thuyết hệ siêu tụ, kết nối phụ tải điện, cải thiện độ nhạy kim phun cũng được xem xét. Nội dung chương 3: quá trình thiết kế hệ thống thu hồi và tích trữ năng lượng điện cảm thông qua việc khảo sát dạng sóng suất điện động tự cảm thực tế, thi công mô hình thực nghiệm, thiết kế hệ thống thu thập dữ liệu, thu hồi, tích trữ năng lượng, thi công mạch điều khiển kim phun sử dụng năng lượng điện cảm tái sinh. Chương 4 trình bày quá trình thực nghiệm và đánh giá sản phẩm nghiên cứu qua 02 giai đoạn. Giai đoạn 1: thử nghiệm thu thập dữ liệu và tính toán năng

lượng thu hồi ở các chế độ vận hành khác nhau trên mô hình thực nghiệm. Giai đoạn 2: thử nghiệm sản phẩm trong trên xe thực tế trong phòng thử nghiệm theo chu trình ECE R15, từ đó đánh giá hiệu quả và so sánh kết quả thu được với nghiên cứu lý thuyết và các nghiên cứu khác. Chương 5 khẳng định các kết quả đạt được trong quá trình nghiên cứu và kiến nghị hướng phát triển.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Phan Nguyễn Quý Tâm**, Đỗ Quốc Âm, Đỗ Văn Dũng, Nguyễn Bá Hải. Nghiên cứu, thi công hệ thống tích lũy năng lượng điện dạng cảm kháng trên ô tô. Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật (số ISSN 1859-1272), số 32, trang 27-33, 2015.
2. Đỗ Quốc Âm, Đỗ Văn Dũng, **Phan Nguyễn Quý Tâm**, Lê Khánh Tân. Tính toán sức điện động tự cảm trên hệ thống đánh lửa lai. Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật (số ISSN 1859-1272), số 32, trang 8-12, 2015.
3. **Phan Nguyễn Quý Tâm**, Đỗ Văn Dũng. Nghiên cứu mô phỏng thu hồi năng lượng điện cảm trên ô tô. Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật (số ISSN 1859-1272), số 61, trang 79-84, 2020.
4. **Phan Nguyễn Quý Tâm**, Đỗ Văn Dũng, Nguyễn Bá Hải, Nguyễn Thành Tuyên. Đo lường và kiểm soát năng lượng điện cảm trên ô tô sử dụng LabVIEW. Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật (số ISSN 1859-1272), số 61, trang 100-106, 2020.
5. **Phan Nguyễn Quý Tâm**, Đỗ Văn Dũng. Phân tích năng lượng điện cảm trong hệ thống đánh lửa. Tạp chí Khoa học và công nghệ (số ISSN 1859-3585), Trường Đại Học Công Nghiệp Hà Nội, tập 57 - số 01, trang 67-71, 2021.
6. **Phan Nguyễn Quý Tâm**, Đỗ Văn Dũng, Đinh Cao Trí. Ứng dụng siêu tụ nâng cao tính đáp ứng của kim phun nhiên liệu trên động cơ xăng. Tạp chí Cơ Khí Việt Nam (số ISSN 2615-9910), số 01+02, trang 16-22, 2021.
7. **Phan Nguyen Qui Tam**, Do Van Dung, Dinh Cao Tri, Evaluation of Applying Various High Voltage Levels to Improve Fuel Injector Response Time on Gasoline Engines. International Journal of Transportation Engineering and Technology (ISSN Online: 2575-1751), Special Issue: Transportation Engineering Technology and Education, Vol. 7, No. 1, 2021, pp. 19-23. doi: 10.11648/j.ijtet.20210701.13.
8. **Phan Nguyễn Quý Tâm**, Đỗ Văn Dũng, Đinh Cao Trí. Thiết kế mạch quản lý nguồn năng lượng tự cảm kim phun trên ô tô. Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật (số ISSN 1859-1272), số 63, trang 91-97, 2021.

MỤC LỤC

Mục	Trang
Lời cam đoan	i
Lời cảm ơn	ii
Tóm tắt	iii
Danh mục các công trình công bố	v
Mục lục	vi
Chương 1: TỔNG QUAN	1
1.1 Lý do chọn đề tài	1
1.2 Mục tiêu nghiên cứu	3
1.3 Nội dung nghiên cứu	3
Chương 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ NĂNG LƯỢNG ĐIỆN CẢM VÀ HỆ SIÊU TỤ ĐIỆN	4
2.1 Các cơ cơ cấu chấp hành tích trữ năng lượng điện cảm	4
2.2 Mô hình toán và mô phỏng	7
2.3 Tính toán năng lượng điện cảm	9
2.4 Đặc tính kim phun	12
Chương 3: THIẾT KẾ HỆ THỐNG THU HỒI VÀ TÍCH TRỮ NĂNG LƯỢNG ĐIỆN CẢM	15
3.1 Thiết kế mô hình thực nghiệm điều khiển phun xăng đánh lửa	15
3.2 Phân tích, lựa chọn bộ lưu trữ năng lượng	16
3.3 Thi công hệ thống thu thập, đo lường và kiểm soát năng lượng điện cảm	16
3.4 Thiết kế hệ thống đánh giá độ nhạy kim phun	18
Chương 4: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ	19
4.1 Thực nghiệm, đánh giá bộ thu hồi và tích trữ năng lượng điện cảm	19
4.2 Thực nghiệm cải thiện tính đáp ứng của kim phun	20
4.3 Thực nghiệm trên ô tô	22
Chương 5: KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	24
5.1 Kết luận	24
5.2 Kiến nghị	24

Chương 1: TỔNG QUAN

1.1 Lý do chọn đề tài

Nhằm nâng cao tính kinh tế nhiên liệu và giảm ô nhiễm môi trường, các hãng sản xuất ô tô không ngừng tìm kiếm các giải pháp, trong đó có giải pháp thu hồi năng lượng mất mát vô ích. Một số nghiên cứu về việc thu hồi năng lượng đã được thương mại hóa như công nghệ thu hồi năng lượng phanh i-ELoop (Intelligent Energy Loop) của hãng ô tô Mazda. Công nghệ này giúp giảm khoảng 10% tiêu hao nhiên liệu của động cơ. Công nghệ phanh tái sinh, thu hồi năng lượng quán tính trên các xe Hybrid hiện cũng rất phổ biến. Audi đã thiết kế hệ thống thu hồi năng lượng từ hệ thống treo dựa trên nguyên lý biến dao động của hệ thống treo ở dạng cơ năng thành năng lượng điện thu được vào bộ tích trữ. Các nguồn năng lượng khác nhau được thu hồi dưới dạng điện năng đóng vai trò như một nguồn dự trữ năng lượng riêng để cung cấp cho một số hệ thống trên xe. Tùy thuộc vào thời gian thu hồi và mật độ tích trữ được, năng lượng sẽ được dùng để cung cấp cho các bộ chấp hành ở các hệ thống khác nhau.

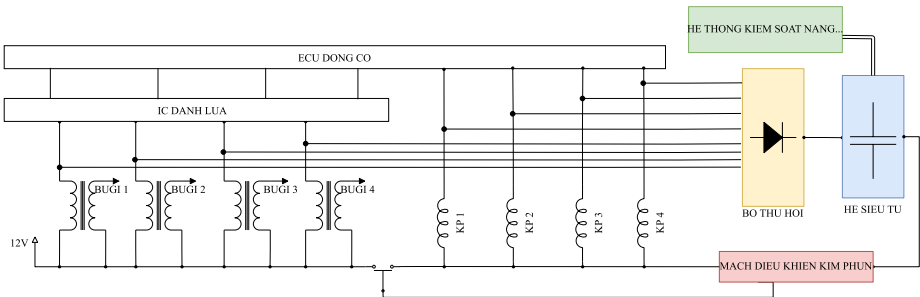
Trên các thiết bị điện ô tô có cấu tạo cuộn dây đều sinh ra năng lượng điện cảm từ suất điện động tự cảm trong quá trình chuyển mạch. Thiết bị có năng lượng điện cảm do hiện tượng cảm ứng điện từ bao gồm: máy phát điện, cảm biến điện từ... do hiện tượng hồ cảm như: biến áp, bobine đánh lửa...

Nguồn năng lượng điện cảm nêu trên có khả năng thu hồi và sử dụng như một dạng năng lượng tái sinh. Năng lượng này tồn tại phần lớn trên các bobine của hệ thống đánh lửa. Khi dòng điện qua cuộn sơ cấp của bobine bị ngắt đột ngột để bắt đầu cho quá trình phóng điện trên điện cực bugi, trên cuộn sơ cấp sẽ xuất hiện một suất điện động tự cảm khoảng 200V đến 500V do sự thay đổi đột ngột của từ thông qua cuộn dây. Ngoài ra, trên xe còn nhiều cơ cấu chấp hành có kết cấu dạng cuộn cảm như: kim phun, van điện từ, role... cũng xuất hiện các suất điện động tương tự có biên độ từ 70V đến 120V trong quá trình hoạt động. Số lượng lớn các xung điện từ 70V đến 500V như thể lan truyền trên toàn hệ thống điện ô tô ảnh hưởng xấu đến tuổi thọ thiết bị đóng ngắt, linh kiện điện tử, sinh nhiệt và

lãng phí năng lượng. Các giải pháp kỹ thuật được áp dụng như: mắc diode zener, điện trở, tụ điện song song với transistor công suất chỉ nhằm bảo vệ các thiết bị đóng ngắt nhưng không tận dụng được phần năng lượng tự cảm sinh ra trên cuộn dây.

Một trong những thiết bị giúp thu hồi nhanh và dự trữ năng lượng tái sinh rất hiệu quả chính là các siêu tụ. Hiện nay, siêu tụ điện đang từng bước được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực của ngành công nghiệp ô tô. Trong những năm gần đây, các siêu tụ được ứng dụng ngày càng nhiều trên các phương tiện giao thông thân thiện với môi trường như xe điện, xe lai. Ngay cả trên những ô tô truyền thống sử dụng động cơ đốt trong, siêu tụ đã và đang được sử dụng như một nguồn lưu trữ năng lượng nhằm đáp ứng những hệ thống hoạt động liên tục ở tần số cao nhờ đặc tính nạp-xả nhanh của tụ, điển hình như hệ thống phun nhiên liệu trực tiếp trên động cơ Diesel (CRDi) của Audi.

Mục tiêu của nghiên cứu là mô hình hóa quá trình sinh ra và thu hồi năng lượng tái sinh từ các cuộn cảm, tìm ra các giải pháp thiết thực để có thể tích trữ năng lượng vào hệ siêu tụ, tái sử dụng nguồn năng lượng điện cảm lãng phí nêu trên, cải thiện tính năng hoạt động kim phun góp phần tiết kiệm nhiên liệu giảm thiểu ô nhiễm môi trường và tăng tuổi thọ các chi tiết bán dẫn trên xe theo mô hình lý thuyết như hình 1.16:



Hình 1.16: Mô hình lý thuyết hệ thống thu hồi và ứng dụng năng lượng điện cảm
 Người nghiên cứu quyết định chọn và thực hiện đề tài: “*Nghiên cứu, ứng dụng năng lượng điện cảm trên ô tô*”.

1.2 Mục tiêu nghiên cứu

Luận án được thực hiện với mục tiêu như sau:

Nghiên cứu thu hồi nguồn năng lượng điện cảm trên ô tô và sử dụng cho việc cải thiện tính năng hoạt động kim phun xăng.

1.3 Nội dung nghiên cứu

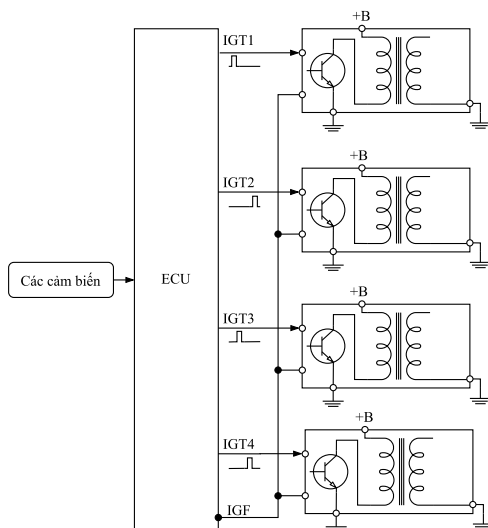
Nhằm hoàn thành mục tiêu nghiên cứu, những nội dung đã được triển khai:

- Tổng quan về năng lượng điện cảm, các công trình nghiên cứu liên quan.
- Cơ sở lý thuyết về cuộn cảm, suất điện động tự cảm, năng lượng điện cảm.
- Phân tích mô hình tính toán các quá trình hoạt động trên cuộn cảm.
- Phân tích, mô hình hóa hệ siêu tụ điện và hệ siêu tụ kết nối phụ tải điện.
- Tính toán, mô phỏng năng lượng điện cảm.
- Phân tích quá trình hoạt động của kim phun.
- Khảo sát đặc tuyến các suất điện động tự cảm.
- Thiết kế, thi công, thử nghiệm sản phẩm mô hình thực nghiệm.
- Thử nghiệm sản phẩm trên ô tô, đánh giá lại tính năng động học.

Chương 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ NĂNG LƯỢNG ĐIỆN CẢM VÀ HỆ SIÊU TỤ ĐIỆN

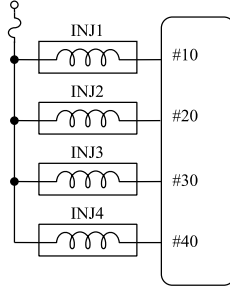
2.1 Các cơ cấu chấp hành tích trữ năng lượng điện cảm

Để điều khiển ô tô thực hiện các chức năng theo yêu cầu của người lái xe, ECU (Electronic Control Unit) tác động lên các cơ cấu chấp hành chuyển đổi năng lượng điện thành cơ năng hay nhiệt năng. Các cơ cấu chấp hành trên ô tô rất đa dạng: bobine đánh lửa, kim phun nhiên liệu, motor nâng kính - khóa cửa, dây nhiệt sưởi kính, đèn chiếu sáng, role.... Trong đó, bobine đánh lửa và kim phun nhiên liệu là hai cơ cấu chấp hành hoạt động liên tục trong suốt quá trình vận hành ô tô. Đặc điểm chung của bobine và kim phun là đều sử dụng các cuộn dây, sinh ra suất điện động tự cảm có biên độ cao trong quá trình chuyển mạch. ECU đóng vai trò trung tâm trong quá trình điều khiển, tiếp nhận và phân tích các tín hiệu đầu vào từ các cảm biến, xử lý và điều khiển đầu ra là các cơ cấu chấp hành dạng cuộn dây như bobine đánh lửa, kim phun, van điều khiển không tải, role.... Hình 2.1 trình bày sơ đồ điều khiển của cụm bobine trong hệ thống đánh lửa trực tiếp. Bobine gồm hai cuộn dây, một cuộn sơ cấp và một cuộn thứ cấp. Khi cuộn sơ cấp chuyển mạch sẽ xuất hiện điện áp cao trên cuộn thứ cấp, được cấp đến bugi để thực hiện quá trình đánh lửa động cơ.



Hình 2.1: Nguyên lý điều khiển các bobine đánh lửa

Hình 2.2 mô tả mạch điện của 04 kim phun INJ1, INJ2, INJ3, INJ4. Mỗi kim phun được cấu tạo cơ bản gồm cuộn dây có hai cực, trong đó một cực nối đến nguồn dương 12V, một cực còn lại được điều khiển đóng, ngắt mass tại các chân #10, #20, #30, #40 bởi các transistor công suất trong ECU.



Hình 2.2: Nguyên lý điều khiển các kim phun xăng

Các van điện từ và các cuộn dây trong rơle có cấu tạo cơ bản từ các cuộn cảm cũng có mạch điện điều khiển tương đương mạch điện kim phun hình 2.2.

Nhận định: bobine đánh lửa, kim phun xăng, van điện từ, rơle có cấu tạo cơ bản là một cuộn cảm. Một cực cuộn cảm được nối đến dương nguồn, cực còn lại được điều khiển bởi các transistor công suất. Mỗi khi transistor công suất ngắt, tại các cực âm của bobine và kim phun luôn xuất hiện các suất điện động tự cảm từ 70 đến 500V. Tần số xuất hiện các xung tự cảm này là rất lớn, tỉ lệ thuận với số xy lanh và tốc độ động cơ. Các điện áp tự cảm xung cao này lan truyền trên đường dây, đi vào các hộp điều khiển, gây hư hại các linh kiện điện tử và sinh nhiệt.

Suất điện động tự cảm:

Suất điện động tự cảm ξ_{tc} tỉ lệ với hệ số tự cảm và biến thiên của dòng cảm ứng.

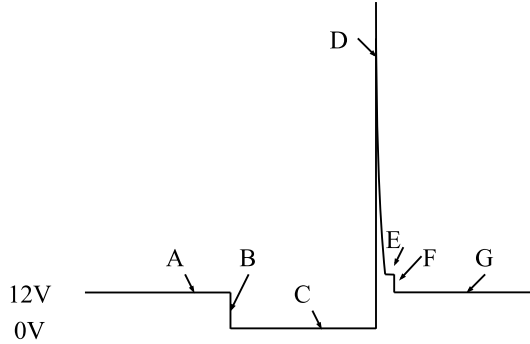
$$\xi_{tc} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(i)}{dt} = -L \frac{di}{dt} \tag{2.2}$$

Dấu trừ (-) trong biểu thức 2.1 chứng tỏ dòng điện cảm ứng có chiều theo định luật Lenz.

Dạng xung suất điện động tự cảm:

Các bộ chấp hành trên ô tô có cấu tạo từ cuộn cảm đều có chung một đặc điểm, đó là sau mỗi quá trình chuyển mạch đều xuất hiện các xung điện áp cao. Tuy các xung này tồn tại với thời gian rất ngắn nhưng biên độ rất cao, lan truyền trong hệ

thống điện dễ gây hư hỏng cho các bộ chấp hành. Quá trình biểu thị xung điện áp tự cảm qua 06 giai đoạn từ A đến G như hình 2.3.



Hình 2.3: Các giai đoạn biểu thị dạng xung điện áp tự cảm

- Đoạn A: mức điện áp được cấp (điện áp ắc quy).
- Đoạn B: thời điểm đóng ngắt mạch.
- Đoạn C: thời gian dòng điện qua cuộn dây.
- Đoạn D: xuất hiện xung điện áp tự cảm.
- Đoạn E: duy trì điện áp tự cảm.
- Đoạn F: quá trình tiêu hao năng lượng.
- Đoạn G: trở lại chu kỳ hoạt động.

Trong đó đoạn D có biên độ từ 70V đến 500V phụ thuộc chủ yếu vào tốc độ biến thiên của từ thông và số vòng quấn của cuộn cảm. Đề tài là tập trung nghiên cứu giai đoạn D với việc thu hồi dạng năng lượng này dưới dạng năng lượng điện cảm.

Năng lượng điện cảm:

$$W = \int_0^I dW = \int_0^I L \cdot i \cdot di = L \frac{I^2}{2} \tag{2.3}$$

Trong đó:

W : năng lượng tích trữ (J)

L : hệ số tự cảm (H)

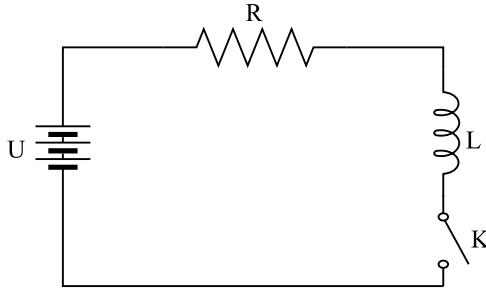
I : cường độ dòng điện (A)

Năng lượng điện cảm trong cuộn dây được tạo ra trong khoảng thời gian dòng điện trong mạch thay đổi (tăng hoặc giảm) của quá trình chuyển mạch.

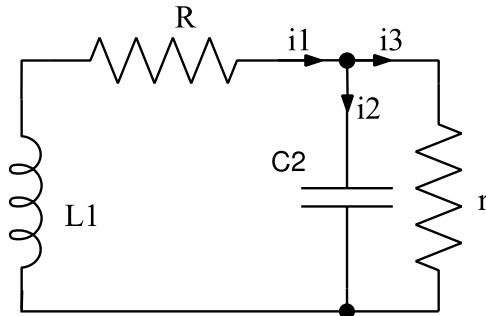
2.2 Mô hình toán và mô phỏng

2.2.1 Mô hình toán

Dựa trên nguyên lý điều khiển cuộn cảm, sơ đồ tương đương (mô hình vật lý) của cuộn cảm trong quá trình tích lũy năng lượng được đề xuất theo hình 2.8 và sơ đồ tương đương của cuộn cảm trong quá trình giải phóng năng lượng được đề xuất theo hình 2.11.



Hình 2.8: Sơ đồ tương đương điều khiển cuộn cảm trong quá trình tích lũy năng lượng



Hình 2.11: Sơ đồ tương đương điều khiển cuộn cảm trong quá trình giải phóng năng lượng

Trong đó: I : dòng điện qua cuộn cảm; R : tổng trở mạch; L : độ tự cảm của cuộn dây; U : điện áp hoạt động; C_2 : tụ ký sinh; r : điện trở rò của tụ C_2 ; i_1 : dòng điện qua điện trở R ; i_2 : dòng điện qua tụ C_2 ; i_3 : dòng điện rò qua r .

Phương trình toán suất điện động tự cảm ξ_{tc} trên cuộn cảm:

$$\xi_{tc} = V_1(t) = -L \frac{di_1}{dt} \quad (2.11)$$

$$V_1(t) = -L[ae^{xt} \cos(yt) + ze^{xt} \sin(yt)]$$

Phương trình toán năng lượng điện cảm $W_{dc1}(t)$ quá trình tích lũy năng lượng:

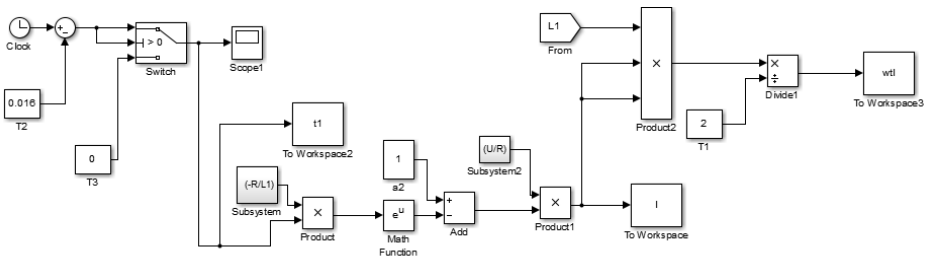
$$W_{dc1}(t) = \frac{1}{2} \times L \times (i_1(t))^2 = \frac{1}{2} \times L \times \left(\frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right)^2 \quad (2.8)$$

Phương trình toán năng lượng điện cảm $W_{dc2}(t)$ quá trình giải phóng năng lượng:

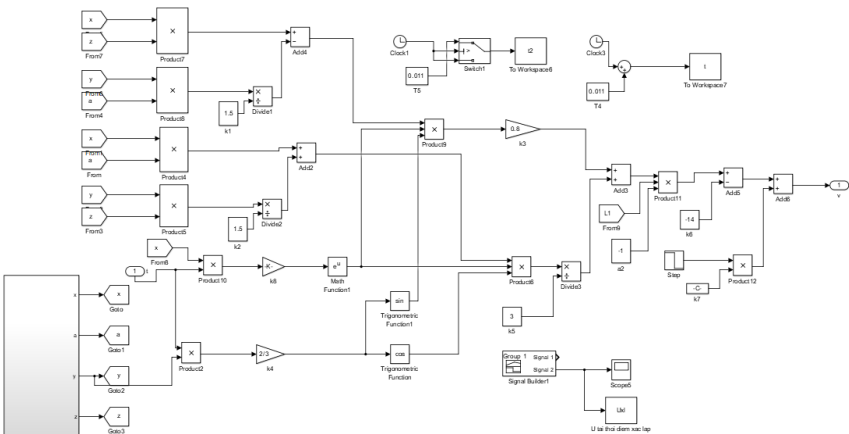
$$W_{dc2}(t) = \frac{1}{2} \times L \times (i_1(t))^2 = \frac{1}{2} \times L \times (ae^{xt} \cos(yt) + ze^{xt} \sin(yt))^2 \quad (2.13)$$

Trong đó a, b, c, d là các hệ số được đặt theo mối quan hệ với R, r, L, i_1, i_2, i_3 .

2.2.2 Mô hình mô phỏng



Hình 2.10: Mô hình mô phỏng quá trình tích lũy năng lượng điện cảm

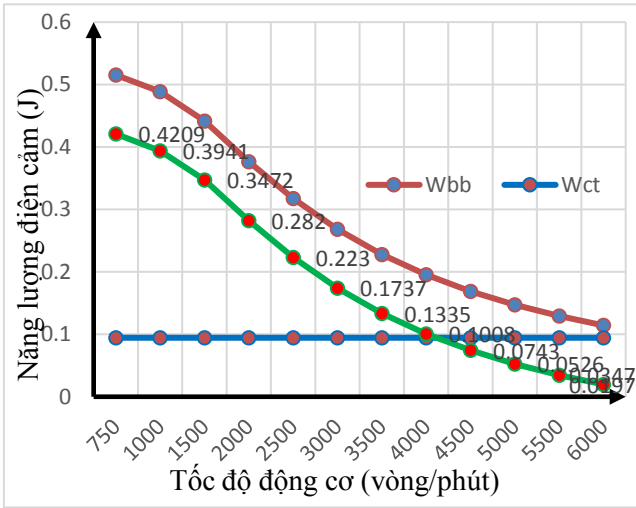


Hình 2.13: Mô hình mô phỏng suất điện động tự cảm

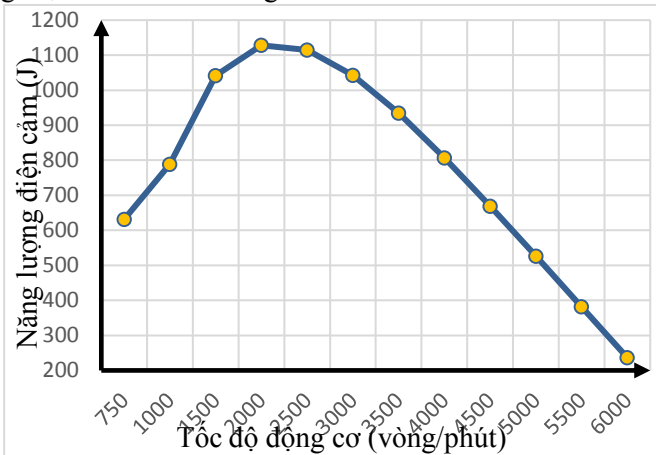
2.3 Tính toán năng lượng điện cảm

2.3.1 Năng lượng điện cảm tích lũy trên bobine

Hình 2.18 biểu thị năng lượng điện cảm của bobine W_{bb} , năng lượng cần thiết đảm bảo diễn ra quá trình đánh lửa W_{ct} , năng lượng có khả năng thu hồi W_{th} trong một lần đánh lửa trên cuộn sơ cấp bobine tại dải tốc độ động cơ từ 750 đến 6000 vòng/phút.



Hình 2.18: Mô tả W_{th} , W_{bb} , W_{ct} trong một lần đánh lửa theo tốc độ động cơ. Năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi trên 04 bobine theo tốc độ n_e

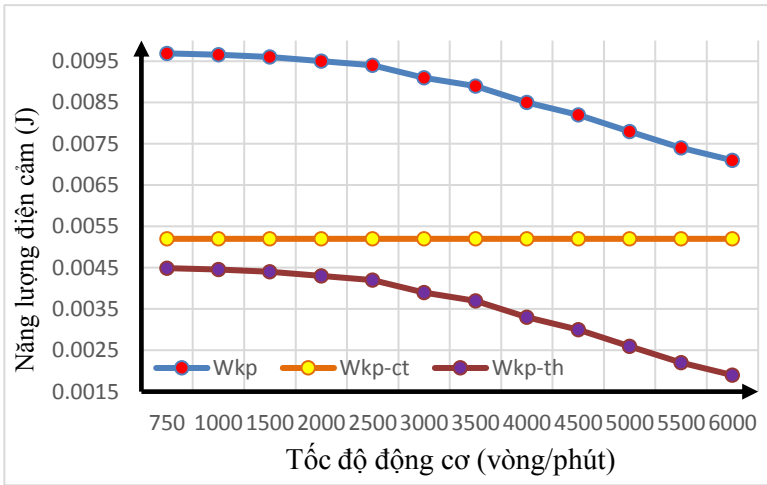


Hình 2.19: Năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi theo tốc độ động cơ

Nhận định: khi tốc độ động cơ càng cao, năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi càng thấp. Năng lượng đạt giá trị cực đại dao động quanh dải tốc độ 1500 đến 2500 v/ph tương ứng với dải tốc độ trung bình của khi xe vận hành trên đường.

2.3.2 Năng lượng điện cảm tích lũy trên kim phun

Hình 2.21 biểu thị năng lượng điện cảm của kim phun W_{kp} , năng lượng cần thiết đảm bảo diễn ra quá trình phun W_{kp-ct} , năng lượng có khả năng thu hồi W_{kp-th} , trong một lần phun tại dải tốc độ động cơ từ 750 đến 6000 vòng/phút.



Hình 2.21: Mô tả W_{kp} ; W_{kp-ct} ; W_{kp-th} trong một lần phun xăng

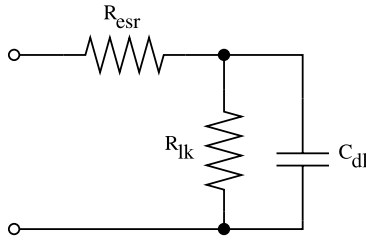
Năng lượng điện cảm của kim phun đạt giá trị cao nhất khoảng $9,69 \times 10^{-3} \text{J}$ tại tốc độ cảm chừng 750 v/ph và đạt giá trị thấp nhất khoảng $7,1 \times 10^{-3} \text{J}$ tại tốc độ động cơ 6000 v/ph. Chênh lệch năng lượng giữa giá trị cao nhất và thấp nhất của kim phun ở dải tốc độ trên là không nhiều (khoảng $2,59 \times 10^{-3} \text{J}$).

2.3 Tính toán trên hệ siêu tụ

Một mô hình đơn giản cho hệ tụ điện hai lớp có thể được biểu diễn bằng điện dung tương đương (Cdl), điện trở song song tương đương (Rlk) và điện trở nối tiếp tương đương ($Resr$) như hình 2.23.

Hiện có hai phương pháp để nạp và xả hệ siêu tụ: một là nạp-xả hệ siêu tụ với điện áp không đổi theo thời gian, cách còn lại là nạp-xả hệ siêu tụ với cường độ

dòng điện không đổi theo thời gian. Phương pháp nạp và xả hệ siêu tụ với điện áp không đổi được chú trọng và triển khai trong đề tài.



Hình 2.23: Sơ đồ mạch tương đương của hệ siêu tụ

Một hệ gồm n siêu tụ có dung lượng điện dung (C), giống nhau được mắc nối tiếp, dung lượng tổng cộng của hệ siêu tụ (C_{total}).

$$C_{total} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}} = \frac{1}{n} C \quad (2.27)$$

Năng lượng cực đại và công suất cực đại mà hệ siêu tụ có thể tích trữ lần lượt được tính theo biểu thức:

$$E_{max} = \frac{CU^2}{2 \times 3600 \times mass} \quad (2.40)$$

$$P_{max} = 0,06 \frac{CU^2}{ESR_{DC}} \quad (2.41)$$

Trong đó:

E_{max} : năng lượng cực đại trên hệ siêu tụ.

P_{max} : công suất cực đại trên hệ siêu tụ.

$mass$: hệ số khối lượng hệ siêu tụ.

ESR_{DC} : điện trở rò hệ siêu tụ.

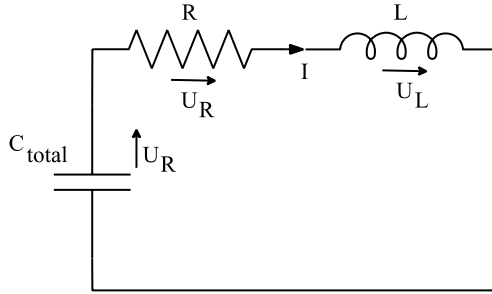
Năng lượng trên hệ siêu tụ

Hệ siêu tụ gồm n siêu tụ được mắc nối tiếp với nhau tạo thành một hệ siêu tụ có dung lượng tổng cộng C_{total} . Biểu thức (2.42) biểu thị năng lượng điện trường (W_{cap}) của hệ siêu tụ với dung lượng (C_{total}) và điện áp trên tụ (U).

$$W_{cap} = \frac{1}{2} C_{total} U^2 \quad (2.42)$$

Hệ siêu tụ kết nối phụ tải điện

Một mạch kín gồm hai thành phần cơ bản là điện dung (C) và độ tự cảm (L). Quá trình hệ siêu tụ cấp điện đến phụ tải điện dạng cuộn dây được mô tả bằng một sơ đồ mạch tương đương ở hình 2.26 bên dưới.



Hình 2.26: Sơ đồ tương đương mạch siêu tụ và phụ tải điện

Tại thời điểm $t = 0$, trước khi hệ siêu tụ phóng điện, dung lượng, điện áp và cường độ dòng điện ban đầu của tụ ở trạng thái nạp đầy là $C_{total} = C/n$, $U = U_0$, $I = I_0$

Khi tụ bắt đầu phóng, cường độ của dòng điện xuất hiện trong mạch được xác định.

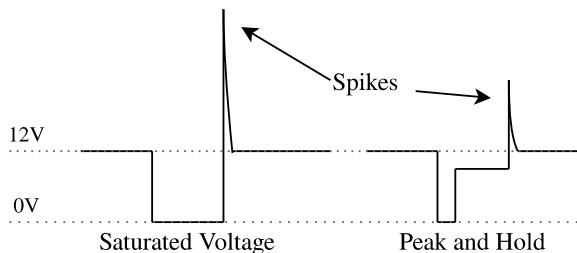
$$I = I_0 e^{\frac{-Rt}{2L}} e^{\sqrt{\frac{1}{LC_{total}} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} t} \quad (2.49)$$

Biểu thức (2.49) mô tả cường độ dòng điện phóng trên hình 2.26.

2.4 Đặc tính kim phun

2.4.1 Điều khiển kim phun

Kim phun nhiên liệu được điều khiển theo hai phương pháp phổ biến, phương pháp điều khiển theo dòng hay còn gọi là phương pháp “nhắc và giữ” (Peak and Hold) và phương pháp điều khiển theo áp (Saturated Voltage). Trong quá trình chuyển mạch, cuộn cảm trong kim phun tạo ra một suất điện động ngược về phía nguồn cấp cho kim phun, điều này vẫn là một trong những nhược điểm cố hữu của các bộ chấp hành có cấu tạo từ cuộn cảm.



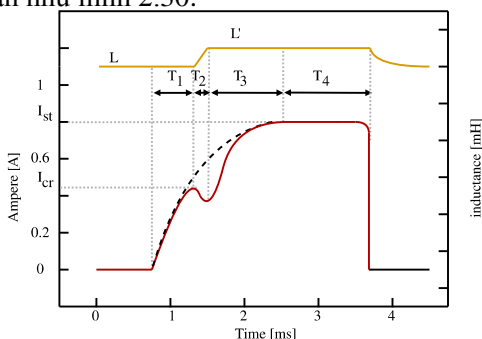
Hình 2.27. Điện áp ở hai chế độ điều khiển

Hai phương pháp điều khiển như trên đều cấp một nguồn điện áp đến kim phun để nhắc kim. Tuy nhiên, ở phương pháp điều khiển theo dòng, mạch điều khiển sẽ cấp dòng điện có cường độ cao để mở kim phun, sau đó dòng điện sẽ được giảm xuống bằng cách hạ điện áp xuống đủ để duy trì hoạt động mở của kim với mục đích làm giảm một phần suất điện động khi chuyển mạch (hình 2.27).

2.4.2 Đặc tính cường độ dòng điện qua kim phun

Khi điện áp cấp đến kim phun, dòng điện trong cuộn từ sẽ tăng dần do sự cản trở của dòng tự cảm, dòng điện sinh ra có xu hướng chống lại nguyên nhân sinh ra nó, một đặc tính cơ bản của cuộn dây. Dòng điện tăng dần tương ứng với lực từ tác dụng lên ty kim tăng dần, đến thời điểm nhất định, khi lực từ lớn hơn lực nén của lò xo hồi vị và áp lực từ nhiên liệu, ty kim sẽ dịch chuyển lên trên và nhiên liệu được phun vào xy lanh.

Quá trình thay đổi của độ tự cảm L trong kim phun ở quá trình nhắc kim được chia thành 03 giai đoạn như hình 2.30.



Hình 2.30: Đường đặc tính cường độ dòng điện qua kim phun

Giai đoạn 1 (T_1): ty kim đóng, độ tự cảm lúc này có giá trị là L_1 . Lúc này, lực từ (F_m) trong kim phun là rất nhỏ so với cản lực tổng cộng của lò xo hồi vị (F_s) và của áp lực nhiên liệu (F_f).

$$F_f + F_s \gg F_m \quad (2.63)$$

Cường độ dòng điện trong giai đoạn 1:

$$I_1 = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t_1} \right) \quad (2.64)$$

Giai đoạn 2 (T_2): ty kim bắt đầu nhấc lên, độ tự cảm lúc này sẽ tăng từ L đến L' . Lực từ thắng được các trở lực, ty kim bắt đầu nhấc lên khỏi bệ.

$$F_f + F_s = F_m \quad (2.65)$$

Mặt khác, độ tự cảm của kim phun bắt đầu tăng lên từ $L \rightarrow L'$, cường độ dòng điện lúc này sẽ giảm xuống đột ngột (dI/dt khác 0).

$$I_2 = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{\Delta L}t_2} \right) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'-L}t_2} \right) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'(1-e^{-t})}t_2} \right) \quad (2.66)$$

U, R các là giá trị không đổi trong quá trình nhấc kim, nên độ tự cảm tăng lên đột ngột dẫn đến cường độ dòng điện sẽ giảm xuống. Tuy nhiên, khoảng thời gian cường độ dòng điện rơi xuống là rất ngắn, vì giá trị t_2 tăng dần theo thời gian, dẫn đến $L'(1-e^{-t_2})$ tiến dần đến L' , lúc này cường độ dòng điện sẽ tiếp tục tăng. Giai đoạn 3 (T_3): ty kim được nhấc lên hoàn toàn, độ tự cảm có giá trị là L' . Lực từ đã lớn hơn cản lực của lò xo và cản lực của nhiên liệu. Ty kim đã được nhấc lên hoàn toàn khỏi bệ.

$$F_f + F_s < F_m \quad (2.67)$$

Lúc này độ tự cảm đã đạt giá trị L' , cường độ dòng điện tiếp tục tăng dần cho đến khi đạt giá trị bão hòa.

$$I_3 = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'}t_3} \right) \quad (2.68)$$

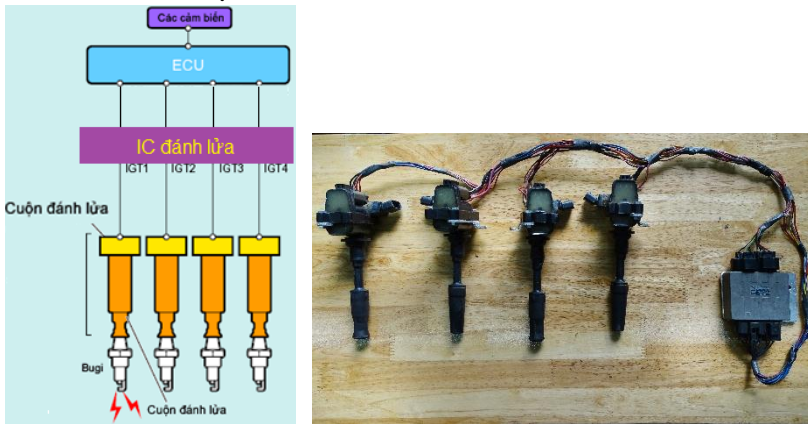
Giai đoạn 4 (T_4): cường độ dòng điện đạt giá trị bão hòa, ổn định theo thời gian.

$$I_4 = \frac{U}{R} \quad (2.69)$$

Chương 3: THIẾT KẾ HỆ THỐNG THU HỒI VÀ TÍCH TRỮ NĂNG LƯỢNG ĐIỆN CẢM

3.1 Thiết kế mô hình thực nghiệm điều khiển phun xăng đánh lửa

Phương thức bố trí cụm đánh lửa hiện hành đảm bảo hệ thống nhỏ gọn nhưng có yếu điểm là không tận dụng được năng lượng điện cảm “thừa” trên cuộn sơ cấp bobine. Để giải quyết vấn đề quan tâm, người nghiên cứu đề xuất chuyển đổi kết cấu của cụm điều khiển đánh lửa có IC và bobine rời như hình 3.6 phù hợp với khả năng tận dụng năng lượng điện cảm “thừa” nhưng vẫn đảm bảo vận hành ổn định, an toàn và thiết thực.



Hình 3.6: Cụm đánh lửa được đề xuất thay thế

Mô hình thực nghiệm:

Hệ thống điện điều khiển động cơ trên một khung thép kích thước: 1320 x 700 x 1690 (mm) với các cụm chi tiết của hệ thống điện điều khiển động cơ 1TR-FE có kết hợp Card NI 6009 giao tiếp dữ liệu đa năng giữa máy tính và thiết bị thông qua cổng USB, bộ tích trữ năng lượng và mạch thu hồi năng lượng điện cảm tái sinh như hình 4.1. Mô hình sử dụng nguồn ắc-quy 12V để vận hành động cơ một chiều và các bộ phận điện cấu thành, có giả lập tốc độ động cơ tương ứng lập dải tốc độ động cơ từ 750 đến 6000 v/ph theo mục tiêu thực nghiệm.

3.2 Phân tích, lựa chọn bộ lưu trữ năng lượng

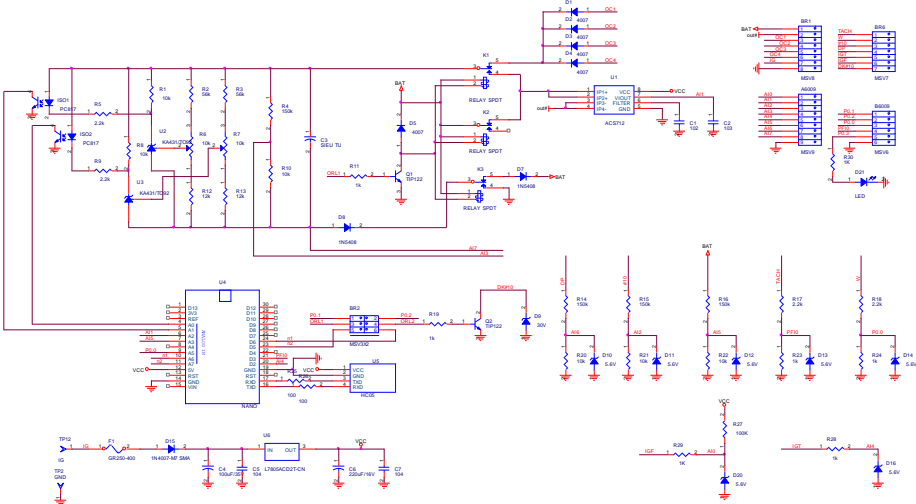
Với mục tiêu chọn loại thiết bị có khả năng nạp và phóng nhanh, tiếp nhận các suất điện động dạng tắt dần đồng thời là nguồn tích trữ năng lượng có điện áp cao hơn điện áp của ắc quy và có dung lượng đủ lớn nhằm cải thiện tính đáp ứng của kim phun. Hệ siêu tụ điện 27V-35F được ghép nối tiếp từ 10 siêu tụ Maxwell BCAP0350 (hình 3.2) được chọn đáp ứng đầy đủ tiêu chí về điện áp, đặc tính nạp phóng, dung lượng nhiệt độ, lý tính, công suất riêng, năng lượng riêng, độ an toàn, tuổi thọ, thân thiện môi trường.



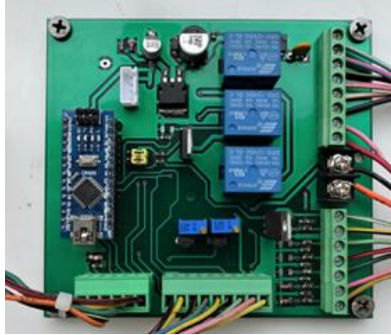
Hình 3.10: Hệ siêu tụ điện 27V-35F

3.3 Thi công hệ thống thu thập, đo lường và kiểm soát năng lượng điện cảm

Mạch thu hồi năng lượng điện cảm tái sinh được thiết kế, lập trình theo nguyên lý như hình 3.12 và sản phẩm hoàn thiện như hình 3.14.



Hình 3.12: Sơ đồ nguyên lý mạch thu hồi năng lượng



Hình 3.14: Mạch thu hồi năng lượng

Nhằm hiển thị trực quan các thông số trong quá trình thử nghiệm, một giao diện trên máy tính dùng phần mềm LabVIEW được thiết kế trực quan dạng bảng đồng hồ trung tâm như hình 3.21.



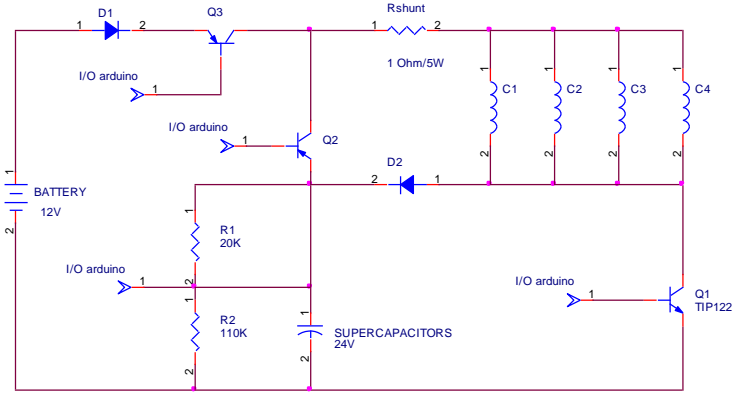
Hình 3.21: Giao diện thu thập dữ liệu và kiểm soát năng lượng điện cảm

Các thông số hiển thị trên giao diện chính:

- Tốc độ động cơ (TACH).
- Điện áp ắc quy (BAT).
- Số lần phun xăng (#10).
- Số lần đánh lửa (IGT).
- Hoạt động đèn cảnh báo (W).
- Chế độ sử dụng nguồn điện: ắc quy hoặc siêu tụ.
- Năng lượng hiện tại tích trữ trên siêu tụ.

3.4 Thiết kế hệ thống đánh giá độ nhạy kim phun

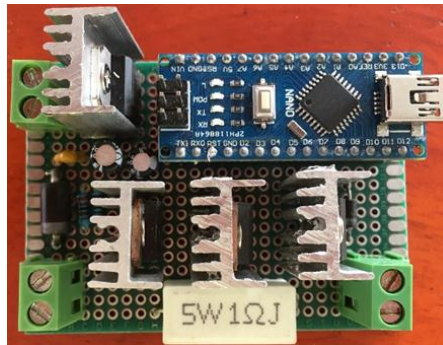
Sơ đồ nguyên lý của mạch đánh giá độ nhạy kim phun như hình 3.25.



Hình 3.25: Nguyên lý thu hồi năng lượng và điều khiển trên kim phun

Khi hệ siêu tụ được nạp đầy bởi suất điện động tự cảm trên các cuộn sơ cấp bobine (C1, C2, C3, C4), tín hiệu điện áp sẽ được truyền về vi điều khiển thông qua một cầu phân áp. Lúc này, vi điều khiển sẽ điều khiển transistor Q2 mở và Q3 đóng, hệ siêu tụ sẽ cung cấp điện áp hoạt động cho kim phun thay cho ắc quy. Một điện trở công suất có giá trị $1\Omega/5W$ được mắc nối tiếp với kim phun nhằm xác định giá trị cường độ dòng điện.

Một mạch công suất điều khiển kim phun được xây dựng như hình 3.26.



Hình 3.26: Mạch thu hồi năng lượng và điều khiển trên kim phun

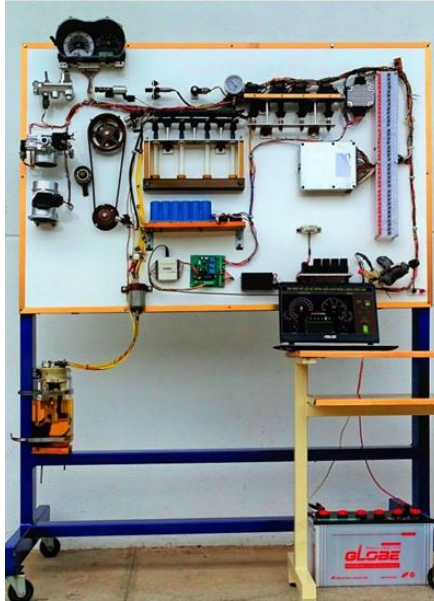
Các phần chính của mạch công suất gồm: nguồn điện 12V từ ắc quy được dùng làm nguồn cấp cho hệ thống, Arduino Nano được sử dụng làm bộ điều khiển trung tâm. Kim phun được điều khiển bởi một transistor công suất TIP122.

Chương 4: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

4.1. Thực nghiệm, đánh giá bộ thu hồi và tích trữ năng lượng điện cảm

Nhằm mục tiêu đánh giá khả năng thu hồi và tích trữ năng lượng điện cảm của sản phẩm chế tạo là bộ thu hồi và tích trữ năng lượng điện cảm.

Kết nối bộ thu hồi, bộ tích trữ, hệ thống kiểm soát năng lượng như hình 4.1.

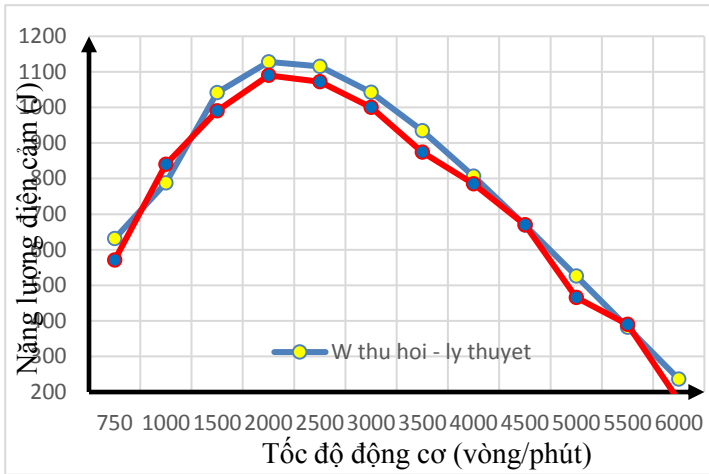


Hình 4.1: Sơ đồ kết nối bộ thu hồi, bộ tích trữ, hệ thống kiểm soát năng lượng trên mô hình thử nghiệm

Vận hành, điều chỉnh bộ điều khiển để tốc độ động cơ ổn định tại 750 v/ph, giả lập các tín hiệu đầu vào tương ứng. Quan sát, đánh giá các thông tin trên giao diện thu thập dữ liệu.

Kết quả thử nghiệm

Hình 4.2 cho thấy: năng lượng điện cảm thực tế thu hồi được tại các dải tốc độ động cơ (đường màu đỏ) đạt giá trị 570J tại tốc độ cảm chùng 750 v/ph và có xu hướng tăng dần khi gia tăng tốc độ, năng lượng thu hồi cực tại đạt 1,090J tại tốc độ 2000 v/ph. Sau đó năng lượng này có xu hướng giảm dần khi tốc độ động cơ tiếp tục tăng. Cho thấy, việc thu hồi năng lượng điện cảm trong dải tốc độ 1500 – 2500 v/ph là tối ưu.



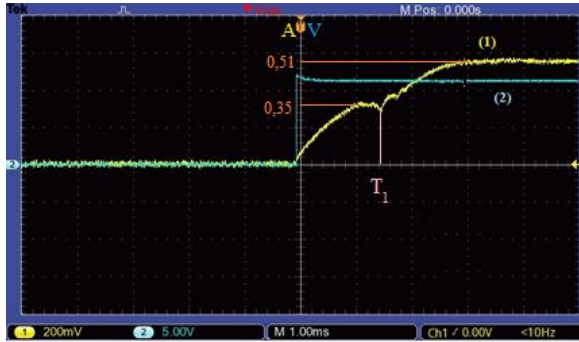
Hình 4.2: Năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi theo tốc độ động cơ
Chênh lệch về trị số khoảng 4% giữa năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi theo lý thuyết và năng lượng thu hồi được theo thực tế.

4.2 Thực nghiệm cải thiện tính đáp ứng của kim phun

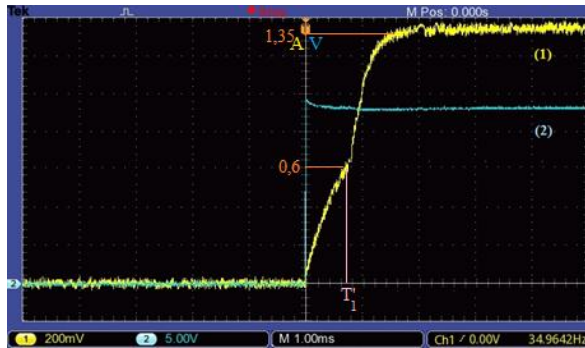
Thực nghiệm trên kim phun với hai nguồn điện áp: nguồn ắc quy hiện hành 12V và nguồn 24V trên hệ siêu tụ được nạp đầy từ suất điện động tụ cảm từ bobine và kim phun như hình 4.3.



Hình 4.3: Thực nghiệm khả năng đáp ứng của kim phun
Các thông số của kim phun gồm: Điện trở: $R = 14,5\Omega$, Độ tự cảm: $L = 0,02H$.
Hình 4.4 và 4.5 biểu thị đường đặc tính dòng điện và điện áp của kim phun ở mức điện áp 12V từ ắc quy và khi dùng siêu tụ 24V.



Hình 4.4: Đặc tính dòng điện và điện áp của kim phun khi dùng ắc quy 12V



Hình 4.5: Đặc tính dòng điện và điện áp của kim phun khi dùng siêu tụ 24V
Đường số 1 là cường độ dòng điện qua kim biểu diễn tăng dần từ lúc kim phun được cấp điện áp đến thời điểm dòng điện bảo hòa, đường số 2 là điện áp trên kim phun. Khi tăng điện áp hoạt động của kim phun lên hai lần thì tính đáp ứng của kim phun được tăng lên tương ứng hai lần, hay nói cách khác là độ trễ của kim phun được giảm đi 02 lần.

$$\frac{T'_1}{T_1} = \frac{1}{2}$$

Cụ thể, kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng với mức điện áp 24V đặt vào kim phun, thì thời gian đáp ứng của kim tăng lên gấp 2 lần từ $1,59 \times 10^{-3}$ s ở mức 12V giảm xuống còn $0,8 \times 10^{-3}$ s ở mức 24V.

4.3 Thực nghiệm trên ô tô

Nhằm xem xét đường đặc tính công suất và đường đặc tính momen của động cơ lắp trên ô tô thử nghiệm với mong muốn rằng hai đường đặc tính này sẽ không thay đổi khi xe được lắp đặt thêm bộ thu hồi năng lượng như hình 4.8. Qua đó chứng minh được tính ổn định của sản phẩm nghiên cứu, ứng dụng.

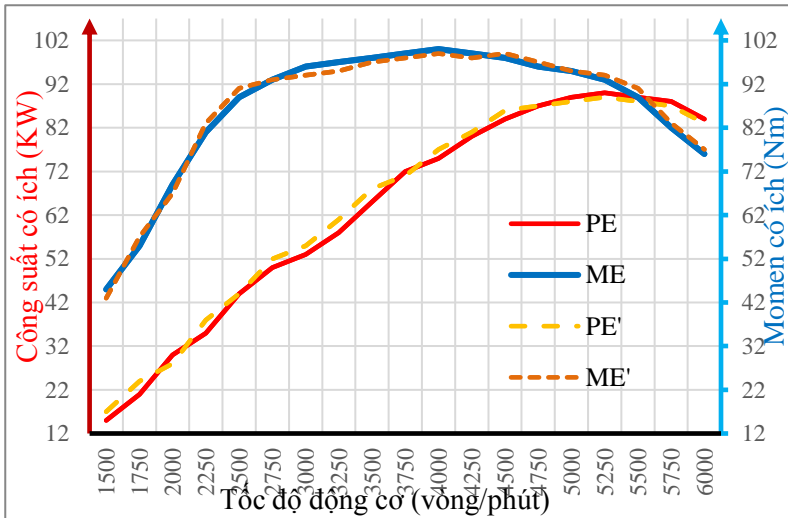


Hình 4.8: Sản phẩm nghiên cứu được lắp trên ô tô thử nghiệm

Ô tô 07 chỗ được thử nghiệm trên băng thử công suất Mustang Dyanometer MD-500 theo chu trình ECE R15 tại phòng thí nghiệm ô tô tại Củ Chi Motor Sport.

Kết quả thực nghiệm

Kết quả thu thập được dữ liệu từ hệ thống PowerDyne trong quá trình thử nghiệm như hình 4.14.

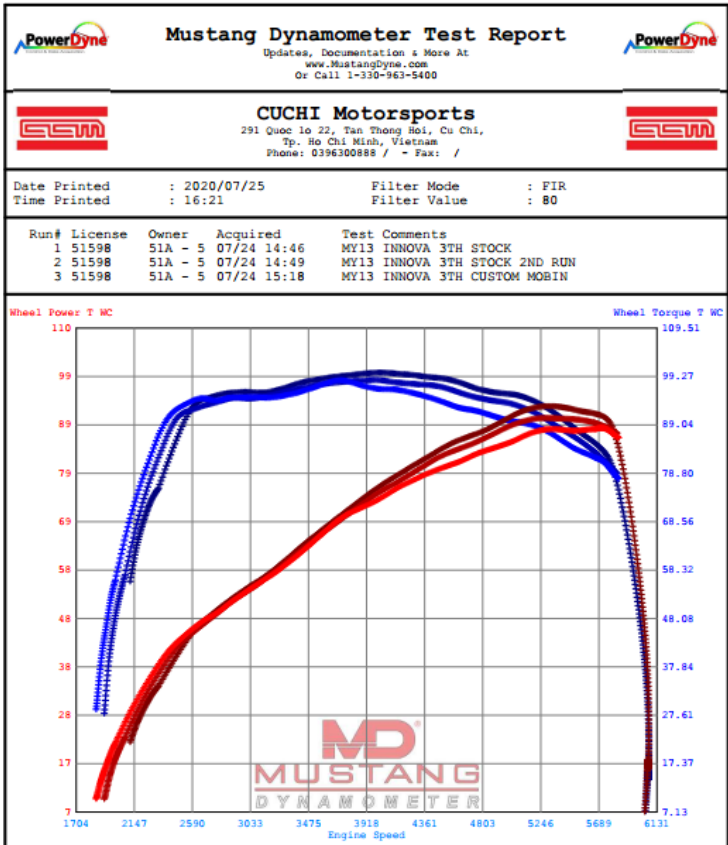


Hình 4.14: Đặc tính so sánh công suất và momen động cơ với hệ thống đánh lửa nguyên thủy và hệ thống đánh lửa có lắp bộ thu hồi năng lượng điện cảm

Thực nghiệm khi ô tô hoạt động với hệ thống đánh lửa nguyên thủy cho thấy công suất có ích cực đại đạt giá trị 90,2 kW tại tốc độ 5250 v/ph và momen cực đại đạt 100,7 Nm tại tốc độ 4000 v/ph (các đường PE và ME trên hình 4.14).

Kết quả thực nghiệm khi ô tô hoạt động với hệ thống đánh lửa có lắp bộ thu hồi năng lượng điện cảm: công suất có ích cực đại đạt giá trị 89,6 kW tại tốc độ 5250 v/ph và momen đạt cực đại 99,8 Nm tại tại tốc độ 4000 v/ph (đường PE', ME' trên hình 4.14). Sai lệch các giá trị của công suất và momen tương ứng tại các tốc độ khác nhau trong toàn đặc tuyến là <5% (trên hình 4.14).

Đặc tuyến dữ liệu thử nghiệm (hình 4.15) được xuất và in ra từ hệ thống thu thập dữ liệu PowerDyne cho thấy độ ổn định của sản phẩm trong 03 lần thử nghiệm.



Hình 4.15: Đặc tính so sánh công suất và momen động cơ với với hệ thống đánh lửa có lắp bộ thu hồi năng lượng điện cảm trong 03 lần thử nghiệm.

Chương 5: KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1 Kết luận

Kết quả nghiên cứu của luận án cho phép rút ra những kết luận sau đây:

- Đã xây dựng mô hình vật lý và mô hình toán cho hệ thống thu hồi năng lượng điện cảm trên các cuộn dây bằng việc sử dụng hệ siêu tụ điện.
- Đã thiết kế, chế tạo mô hình thu hồi năng lượng điện cảm trên các cuộn dây bobine và kim phun.
- Đã thiết kế, thi công hệ thống giám sát năng lượng điện cảm tái sinh ứng dụng vi điều khiển đảm bảo yêu cầu tiết kiệm năng lượng. Dù năng lượng tiết kiệm trong mỗi chu kỳ hoạt động không lớn nhưng với số lượng ô tô rất nhiều, hoạt động liên tục thì năng lượng tiết kiệm không nhỏ và đây là một nghiên cứu phù hợp xu thế tương lai.
- Năng lượng điện cảm thu hồi thực tế sai biệt nhỏ hơn 4% so với tính toán lý thuyết.
- Năng lượng điện cảm tái sinh được tích trữ trên hệ siêu tụ điện ở mức 24V góp phần tăng độ nhạy của kim phun lên hai lần so với ban đầu.
- Sản phẩm nghiên cứu là bộ thu hồi và tích trữ năng lượng khi lắp trên ô tô 07 chỗ không làm ảnh hưởng tính năng động học của xe. Đặc tuyến về công suất và momen động cơ thay đổi không đáng kể (nhỏ hơn 5%) khi được lắp bộ thu hồi, tích trữ, ứng dụng năng lượng điện cảm.
- Năng lượng điện cảm được nghiên cứu và ứng dụng trên ô tô đã đạt hiệu quả bước đầu, góp phần vào nền tảng quan trọng cho các nghiên cứu kế tiếp về vấn đề này.

5.2 Kiến nghị

Người nghiên cứu kiến nghị đề tài có thể được phát triển theo các hướng sau:

- Nghiên cứu đánh giá hiệu suất cũng như thời điểm phun của kim phun dạng điện trở cao ở mức điện áp 24V nhằm cải thiện quá trình trộn hỗn hợp nhiên liệu và quá trình cháy của động cơ.
- Tính toán giảm dung lượng và kích thước ắc quy khi áp dụng siêu tụ.
- Phát triển thuật toán và lập trình phân bố tải giữa máy phát, ắc quy, hệ siêu tụ.
- Tính toán năng lượng từ cuộn dây pha của máy phát để nạp hệ siêu tụ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] John Smart, Jim Francfort, Donald Karner. và cộng sự, Advanced Vehicle Testing Activity, Idaho National Laboratory, EVS24, Stavanger, pp. 1-13, 2009.
- [2] Cieślík W., Pielecha I., and Borowski P., Effects of Start–Stop System on The Operation of Drive System in Urban Traffic Conditions, Journal of Mechanical and Transport Engineering, Vol. 67, No. 2, 2015.
- [3] Xueying L., Yanju J. và cộng sự, Research Review of a Vehicle Energy-Regenerative Suspension System, Energies, 13; doi:10.3390/en13020441, 2020.
- [4] Pasquier A., Plitz I., và cộng sự, A Comparative Study of Li-Ion Battery, Supercapacitor and Nonaqueous Asymmetric Hybrid Devices for Automotive Applications, Journal of Power Sources, Vol 115, pp. 171-178, 2003.
- [5] Thounthong P., Rael S. and Davat B., Utilizing Fuel Cell and Supercapacitors for Automotive Hybrid Electrical System, Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1-7, 2005.
- [6] Do Van Dung, Do Quoc Am, Nguyen Tan Ngoc. Effects of Resistance, Capacitance and Self-Inductance on Accumulated Energy in the Hybrid Ignition system. International conference on system science and engineering Hochiminh city, July, pp. 1-6, 2017.
- [7] Am Do Quoc, Dung Do Van, Le Khanh Diem, Le Khanh Tân. An Application of hybrid method for improving of ignition system in small power explosion engine. International conference on advances in civil, structural and mechanical engineering, doi: 10.15224/ 978-1-63248-039-2-2, pp. 1-5, 2015.
- [8] Do Quoc Am, Do Van Dung, Nguyen Tan Ngoc. Estimation of the Accumulated Energy in the Hybrid Ignition System. International conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), IEEE, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595520, 23-24 Nov. 2018.
- [9] Milan ŠEBŮK, Miroslav GUTTEN, Lubomír OSTRICA, Matej KUČERA, Marek MAKYDA. Analysis of Distributorless Ignition Systems. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 89 NR, 2013.

- [10] SEBOK M., JURCIK J. và cộng sự. Diagnostics and Measurement of the Gasoline Engines Injection System. Przegląd Elektrotechniczny, 2015.
- [11] Edward B. Rosa and Louis Cohen, Formule and Tables for the calculation of mutual and self-inductance, pp. 116-142, 2017.
- [12] Więclawski, Krzysztof & Mączak, Jędrzej & Szczurowski, Krzysztof, Electric Current Waveform of the Injector as a Source of Diagnostic Information, Sensors. 20. 4151. 10.3390/s20154151, 2020.
- [13] Tom Denton, Automobile Electrical and Electronic Systems, (5th Edition), Published by Elsevier, 2018.
- [14] Toyota Company. Engine - 1 TR-FE Engine - Description. Internet: https://www.academia.edu/14069176/ENGINE-1TR-FE_ENGINE_EG9_1TR-FE_ENGINE, 2018.
- [15] Đỗ Quốc Âm, Nghiên cứu, tính toán, chế tạo hệ thống đánh lửa hỗn hợp điện dung – điện cảm sử dụng bobine đơn, luận án tiến sĩ Trường ĐH SPKT TP. HCM, tr. 1-21, tr. 44-49, tr. 115-116, 11/2020.
- [16] Huỳnh Xuân Thành, Thực nghiệm đánh giá khả năng tích lũy năng lượng trên hệ thống đánh lửa Hybrid, luận văn Thạc sĩ Trường ĐH SPKT TP. HCM, tr. 49-85, 2018.
- [17] Dương Tuấn Tùng, Nghiên cứu nâng cao hiệu quả thu hồi năng lượng của hệ thống phanh tái sinh trên ô tô, luận án tiến sĩ Trường ĐH SPKT TP. HCM, tr. 82-98, 06/2020
- [18] Nguyễn Đỗ Minh Triết, Mô phỏng, thử nghiệm và đánh giá thiết bị thu hồi năng lượng điện cảm trên hệ thống điện ô tô, luận văn Thạc sĩ Trường ĐH SPKT TP. HCM, tr. 21-63, 2016.
- [19] PGS.TS. Đỗ Văn Dũng. Điện động cơ và điều khiển động cơ. NXB Đại học Quốc gia Tp.Hồ Chí Minh, tr. 129-132, 2013.
- [20] Lê Khánh Tân. Ứng dụng nền tảng Arduino và LabVIEW trong thu thập dữ liệu động cơ. Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật số 51, tr. 44-49, 2019.
- [21] Nguyễn Thành Luân, Lê Thị Hồng Nhung, Lại Hoài Nam. Đo lường và điều khiển từ sấy sử dụng LabVIEW. Tạp Chí Khoa Học Giáo Dục Kỹ Thuật số 58, tr. 60-66, 2020.