

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.

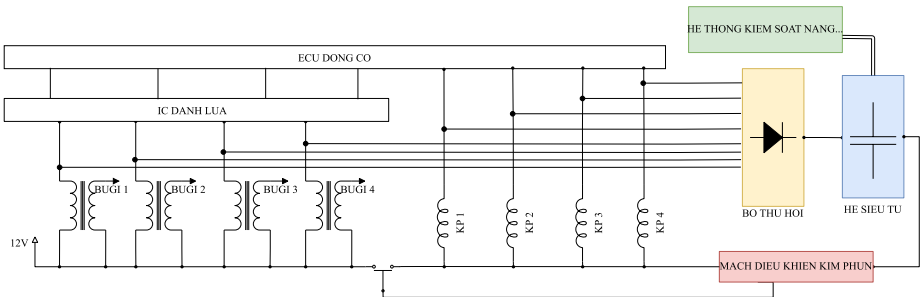
Trên các thiết bị điện ô tô có cấu tạo cuộn dây đều sinh ra năng lượng điện cảm từ suất điện động tự cảm trong quá trình chuyển mạch. Thiết bị có năng lượng điện cảm do hiện tượng cảm ứng điện từ bao gồm: máy phát điện, cảm biến điện từ... do hiện tượng hỗ cảm như: biến áp, bobine đánh lửa...

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

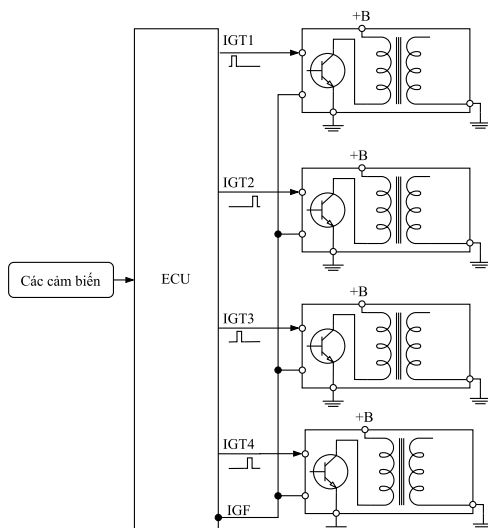
Nhằm hoàn thành mục tiêu nghiên cứu, những nội dung đã được triển khai:

- 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

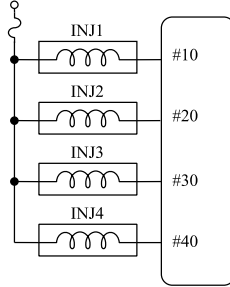
2.1 Các cơ cấu chấp hành tích trữ năng lượng điện cảm

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.

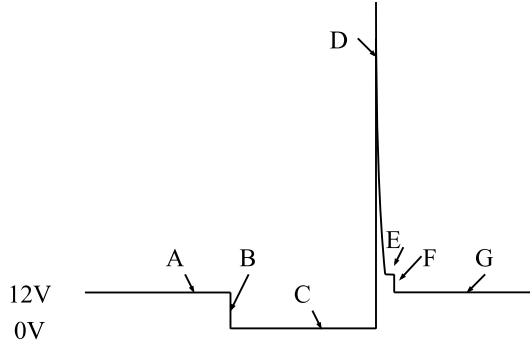
$$\xi_{tc} = - \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \tag{2.2}$$

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 áp 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)

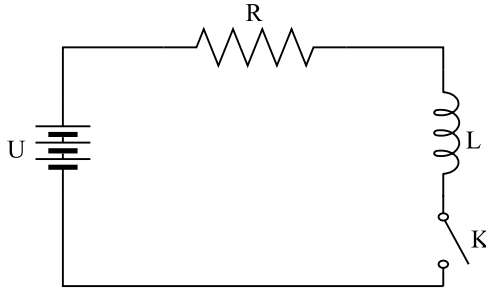
I : cường độ dòng điện (A)

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.

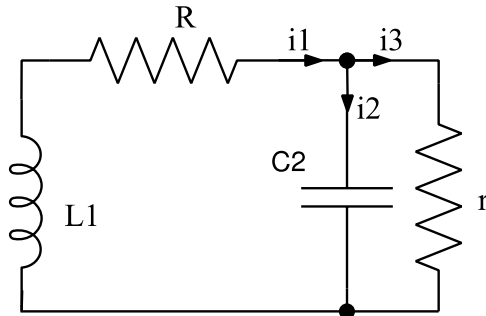
2.2 Mô hình toán và mô phỏng

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:

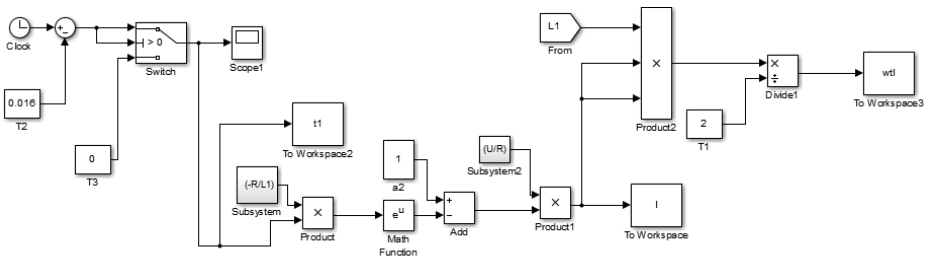
$$W_{dc1}(t) = \frac{1}{2} \times L \times (i_1(t))^2 = \frac{1}{2} \times L \times \left(\frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right)^2 \quad (2.8)$$

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

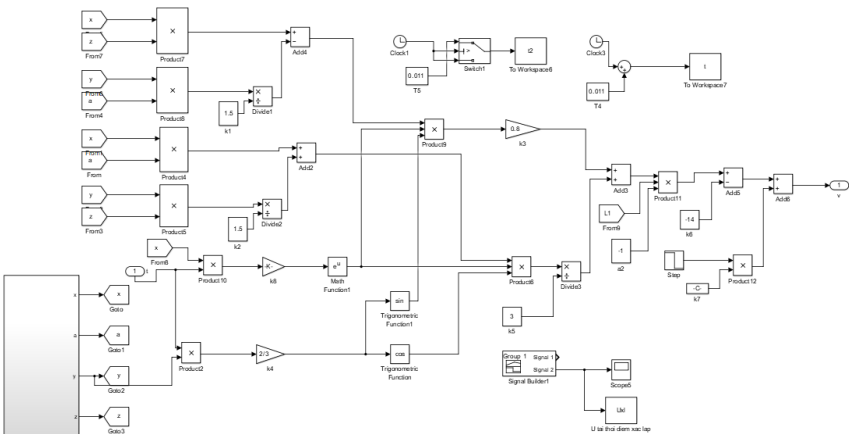
$$W_{dc2}(t) = \frac{1}{2} \times L \times (i_1(t))^2 = \frac{1}{2} \times L \times (ae^{xt} \cos(yt) + ze^{xt} \sin(yt))^2 \quad (2.13)$$

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

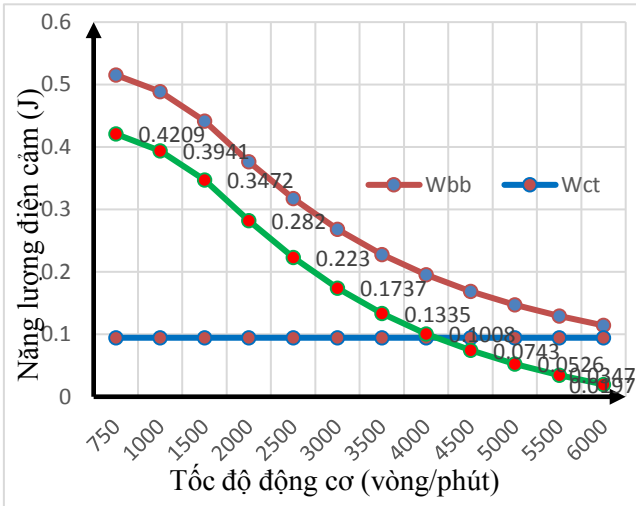


Hình 2.13: Mô hình mô phỏng suất điện động tự cảm

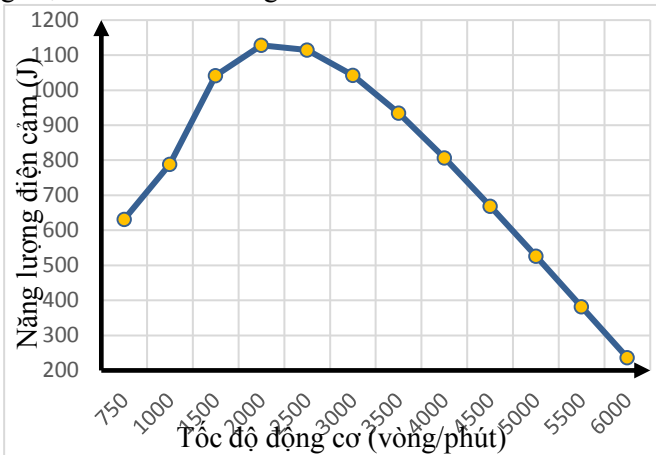
2.3 Tính toán năng lượng điện cảm

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

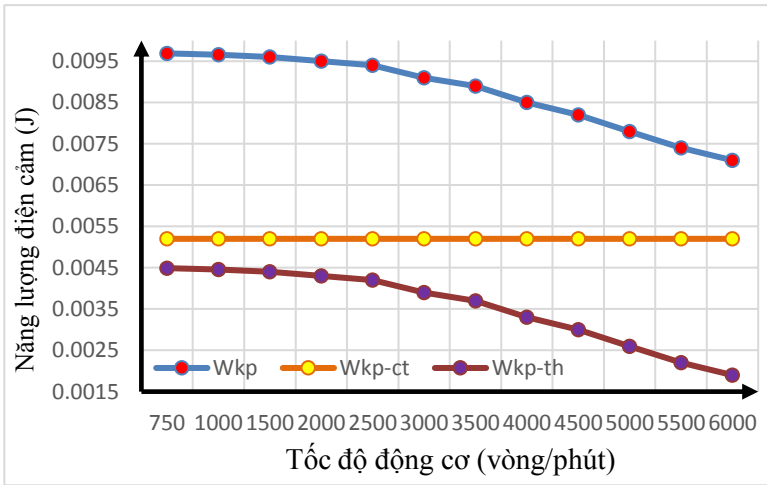


Hình 2.19: Năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi theo tốc độ động cơ

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

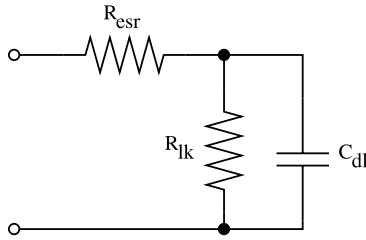
Năng lượng điện cảm của kim phun đạt giá trị cao nhất khoảng $9,69 \times 10^{-3} \text{J}$ tại tốc độ cảm chừng 750 v/ph và đạt giá trị thấp nhất khoảng $7,1 \times 10^{-3} \text{J}$ tại tốc độ động cơ 6000 v/ph. Chênh lệch năng lượng giữa giá trị cao nhất và thấp nhất của kim phun ở dải tốc độ trên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

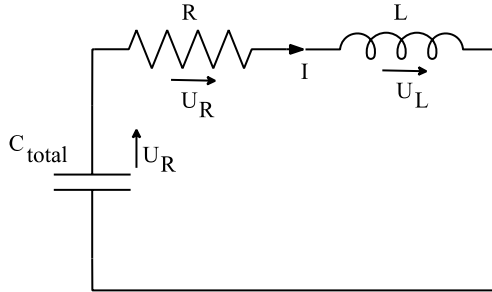
Năng lượng trên hệ siêu tụ

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.

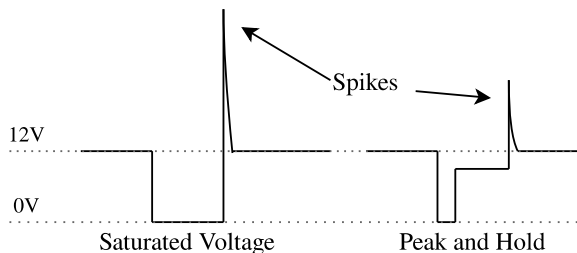
$$I = I_0 e^{\frac{-Rt}{2L}} e^{\sqrt{\frac{1}{LC_{total}} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} t} \quad (2.49)$$

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.



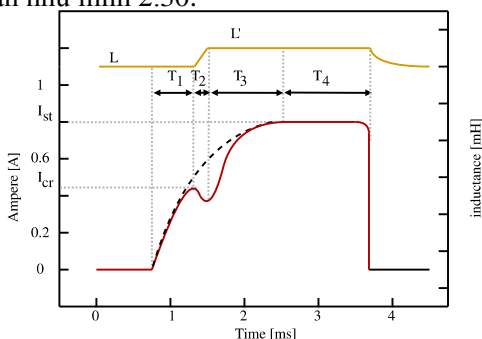
Hình 2.27. Điện áp ở hai chế độ điều khiển

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.

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

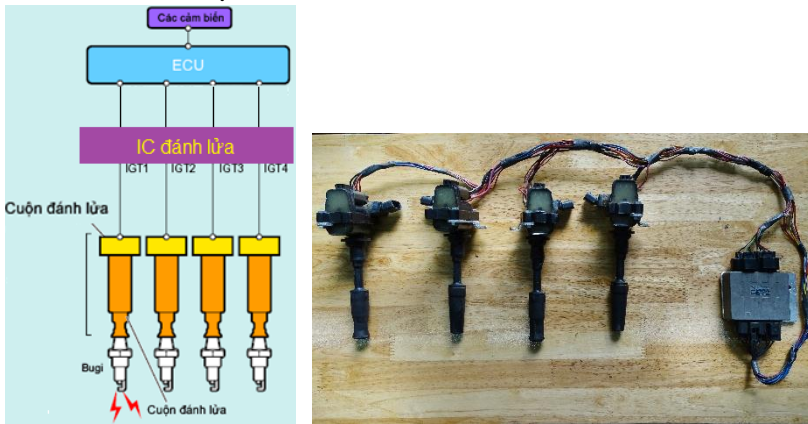
Giai đoạn 4 (T_4): cường độ dòng điện đạt giá trị bão hòa, ổn định theo thời gian.

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

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

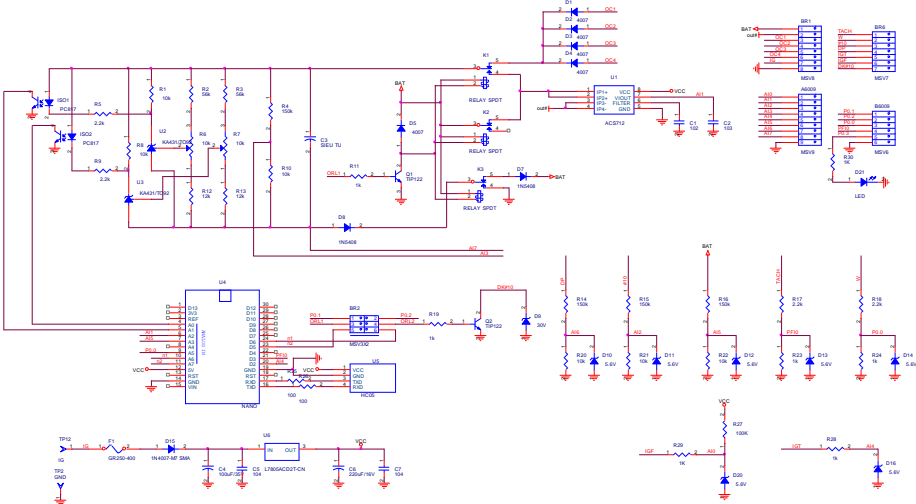
Với mục tiêu chọn loại thiết bị có khả năng nạp và phóng nhanh, tiếp nhận các suất điện động dạng tắt dần đồng thời là nguồn tích trữ năng lượng có điện áp cao hơn điện áp của ắc quy và có dung lượng đủ lớn nhằm cải thiện tính đáp ứng của kim phun. Hệ siêu tụ điện 27V-35F được ghép nối tiếp từ 10 siêu 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.



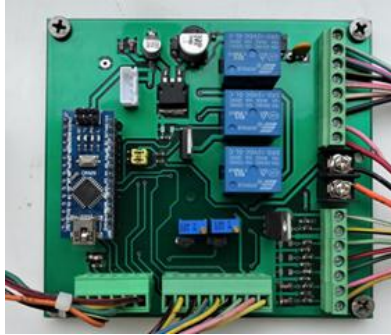
Hình 3.10: Hệ siêu tụ điện 27V-35F

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.



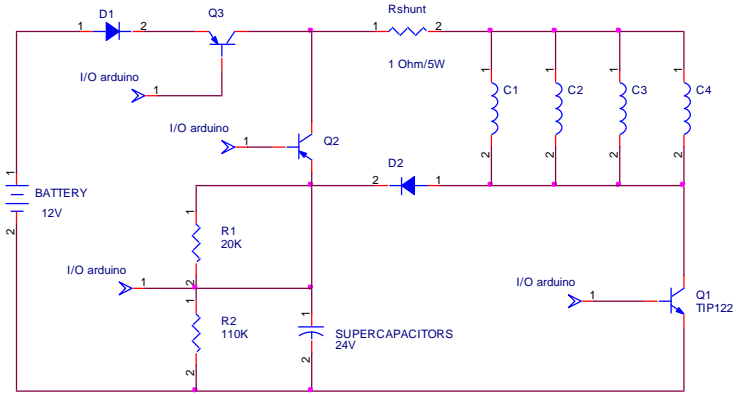
Hình 3.21: Giao diện thu thập dữ liệu và kiểm soát năng lượng điện cảm

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

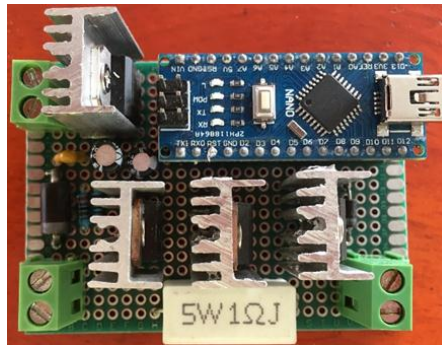
Sơ đồ nguyên lý của mạch đánh giá độ nhạy kim phun như hình 3.25.



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

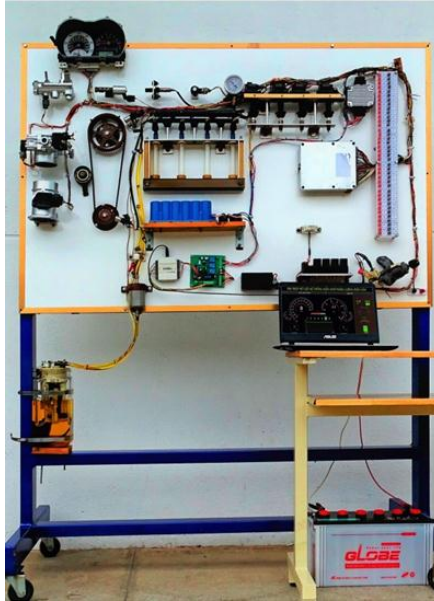
Các phần chính của mạch công suất gồm: nguồn điện 12V từ ắc quy được dùng làm nguồn cấp cho hệ thống, Arduino Nano được sử dụng làm bộ điều khiển trung tâm. Kim phun được điều khiển bởi một transistor công suất TIP122.

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.

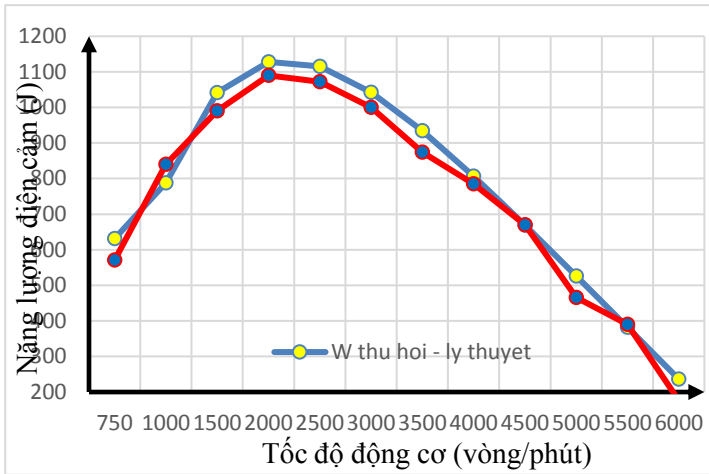


Hình 4.1: Sơ đồ kết nối bộ thu hồi, bộ tích trữ, hệ thống kiểm soát năng lượng trên mô hình thử nghiệm

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.



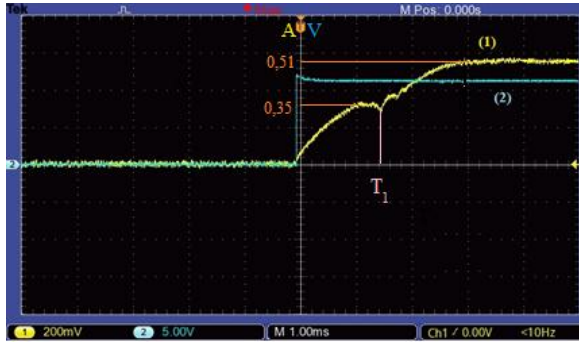
Hình 4.2: Năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi theo tốc độ động cơ
Chênh lệch về trị số khoảng 4% giữa năng lượng điện cảm có khả năng thu hồi theo lý thuyết và năng lượng thu hồi được theo thực tế.

4.2 Thực nghiệm cải thiện tính đáp ứng của kim phun

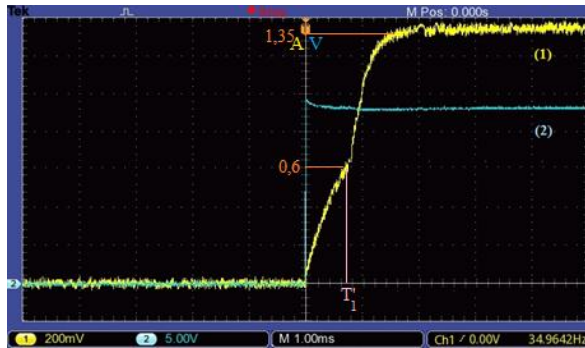
Thực nghiệm trên kim phun với hai nguồn điện áp: nguồn ắc quy hiện hành 12V và nguồn 24V trên hệ siêu tụ được nạp đầy từ suất điện động tụ cảm từ bobine và kim phun như hình 4.3.



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.

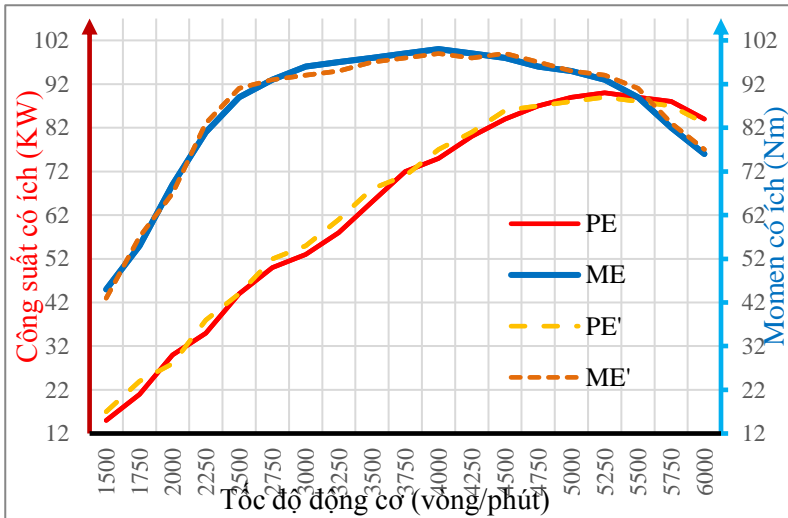


Hình 4.8: Sản phẩm nghiên cứu được lắp trên ô tô thử nghiệm

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.

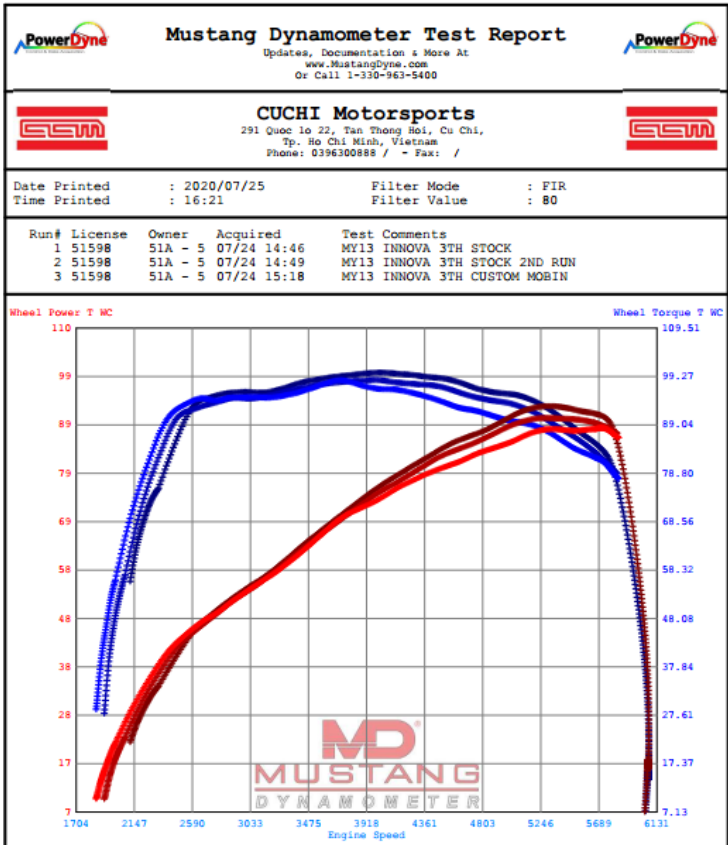


Hình 4.14: Đặc tính so sánh công suất và momen động cơ với hệ thống đánh lửa nguyên thủy và hệ thống đánh lửa có lắp bộ thu hồi năng lượng điện cảm

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.
-

**MINISTRY OF EDUCATION AND TRAINING
HO CHI MINH CITY
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION**

PHAN NGUYEN QUI TAM

**RESEARCH AND APPLICATION OF
SELF-INDUCTANCE ENERGY IN AUTOMOBILE**

Major: Mechanical Engineering
Major code: 9520103

SUMMARY OF PHD THESIS

HO CHI MINH CITY – 06/2021

**THE WORK IS COMPLETED AT
HCMC UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION**

Supervisor 1: Assoc. Prof. Dr. Do Van Dung

Supervisor 2: Dr. Nguyen Ba Hai

Reviewer 1:

Reviewer 2:

Reviewer 3:

COMMITMENT

I guarantee this is my scientific research.

The data and results stated in the thesis are true and have never been published by anyone in any other works. I also guarantee that all references to the implementation of the thesis have been clearly cited.

Ho Chi Minh City, June 04th, 2021

(Signature and name)

Phan Nguyen Qui Tam

ACKNOWLEDGEMENTS

The researcher would like to thank:

- Assoc. Prof. Dr. Do Van Dung and Dr. Nguyen Ba Hai, two science supervisors who gave me the opportunity to start the thesis, enthusiastically guide, orient, and spend time reading and editing scientific content.
- Rector Board, Training Department - Postgraduate Department, Dean of Mechanical Engineering Faculty, Faculty of Automotive Engineering, Department of Electrical – Electronics and lecturers of Ho Chi Minh City University of Technology. HCM City.
- Faculty and Staffs the automobile electronics laboratory, automobile laboratory HCMC University of Technology and Technology who have been wholeheartedly supported and encouraged me during time to perform scientific content.
- The members of the evaluation board who took the time to read and comment on the research content.
- Leading experts, scientists who have criticized and commented on scientific articles and the summary.
- PhD candidates of the same course 2013-2016 majoring in mechanical engineering.
- Family members and relatives who have always trusted, supported and created all favorable conditions for me to focus on the process of studying, researching and implementing the dissertation.

Best regards!

Ho Chi Minh City, June 04th, 2021

PhD candidate

Phan Nguyen Qui Tam

ABSTRACT

The recovery as well as application of inductance energy is a new research trend in automobiles. One of the main puposes of the thesis is to recover the self-inductance energy occurring in coils during circuit switching, and then use it as regenerating power to supply either to low-mid power loads or improve of fuel injector response. In addition, the thesis not only solves the energy recovery problem on the internal combustion engine but also solve fuel economy, reduces environmental pollution, and protection of electronic elements in vehicle electrical systems..

Contributions of the thesis is presented below:

- Building physical and mathematical models for ignition coils and injectors based on inductance energy recovery system by using supercapacitors.
- Designing and manufacturing experimental models to recover inductive energy on ignition coils and injectors.
- Using the supercapacitor system to store inductive energy to improve injector sensitivity.

The thesis is presented in 5 chapters including 99 pages (excluding references and appendices). Chapter 1 presents an overview of research issues on inductive energy in cars, analysis of literature, referring to the research direction that is being focused. On that basis, the researcher proposes research objectives and content. In Chapter 2, the author analyze the theoretical basis of inductors, inductance energy, built a mathematical model, calculate and simulate the accumulated energy on the ignition coils and injectors. Theoretical basis for supercapacitors, connecting electrical loads, improving injector sensitivity also are carried out. Content of chapter 3 shows the process of designing the inductive energy recovery and storage system through the investigation of the actual inductive electric power waveform, construction of the experimental model, design of the data collection system. Recovery, storage of energy, building the of

control circuits of injectors which have used for regenerative inductive energy. Chapter 4 presents the process of experimentation and evaluation of research products through 02 phases. Stage 1: Testing data collection and calculation of recovered energy in different operating modes on the experimental model. Stage 2: Testing the internal product on real car in the laboratory according to the ECE R15 cycle, thereby evaluating the efficiency and comparison the obtained results with theoretical research and other studies. Chapter 5 confirms the results achieved in the research and recommends the direction of development.

LIST OF PUBLICATIONS

1. **Phan Nguyen Qui Tam**, Do Van Dung, Do Quoc Am, Nguyen Ba Hai. Researching and installing accumulated system of inductance energy in automobile. *Journal of Technical Education Science* (ISSN 1859-1272), No. 32, pages 27-33, 2015.
2. Do Quoc Am, Do Van Dung, **Phan Nguyen Qui Tam**, Le Khanh Tan. Calculation of electromotive force (EMF) on Hybrid Ignition systems. *Journal of Technical Education Science* (ISSN 1859-1272), No. 32, pages 8-12, 2015.
3. **Phan Nguyen Qui Tam**, Do Van Dung. A study on the recovery self-inductance energy in vehicles. *Journal of Technical Education Science* (ISSN 1859-1272), No. 61, pages 79-84, 2020.
4. **Phan Nguyen Qui Tam**, Do Van Dung, Nguyen Ba Hai, Nguyen Thanh Tuyen. Measurement and control self-inductance energy in vehicle by LabVIEW. *Journal of Technical Education Science* (ISSN 1859-1272), No. 61, pages 100-106, 2020.
5. **Phan Nguyen Qui Tam**, Do Van Dung. A study of self- inductance energy in the ignition system. *Journal of Science and Technology* (ISSN 1859-3585), Vol. 1, No.1, pages 67-71, 2021.
6. **Phan Nguyen Qui Tam**, Do Van Dung, Dinh Cao Tri. Application of super capacitor to improve dead-time of fuel injections on gasoline engines. *Vietnam Mechanical Engineering Journal* (ISSN 2615-9910), Vol 02, pages 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 Nguyen Qui Tam**, Do Van Dung, Dinh Cao Tri. Design of inductance energy managing circuit of fuel injectors in automobile. *Journal of Technical Education Science* (ISSN 1859-1272), No. 63, pages 91-97, 2021.

TABLE OF CONTENT

Item	Page
Commitment	i
Acknowledgements	ii
Abstract	iii
List of publications	v
Table of content	vi
Chapter 1: OVERVIEW	1
1.1 The reason to choose the thesis	1
1.2 Goals of research	3
1.3 Research content	3
Chapter 2: THEORETICAL BASIS OF INDUCTIVE ENERGY AND SUPER CAPACITY SYSTEM	4
2.1 Actuators store inductive energy	4
2.2 Mathematical modeling and simulation	7
2.3 Inductance energy calculation	9
2.4 Injector properties	12
Chapter 3: INDUCTIVE ENERGY RECOVERY AND STORAGE SYSTEM DESIGN	15
3.1 Experimental design of ignition fuel injection control	15
3.2 Energy storage analysis and selection	16
3.3 Construction of inductive energy collection, measurement system	16
3.4 Design of injector sensitivity evaluation system	18
Chapter 4: EXPERIMENT AND EVALUATION	19
4.1 Experimenting and evaluating inductance energy recovery and storage	19
4.2 Experimentally improving injector responsiveness	20
4.3 Experiment on automobile	22
Chapter 5: CONCLUSION	24
5.1 Conclusion	24
5.2 Recommendation and future works	

Chapter 1: OVERVIEW

1.1 The reason to choose the thesis

In order to improve fuel economy and reduce environmental pollution, car manufacturers are constantly looking for solutions, including solutions to recover useless energy losses. Several studies on energy recovery have been commercialized, such as Mazda's i-ELoop (Intelligent Energy Loop) brake energy recovery technology. This technology reduces the fuel consumption of the engine by about 10%. The regenerative braking technology and inertial energy recovery in hybrids are also very popular. Audi has designed the system to recover energy from the suspension system based on the principle of turning the oscillation of the suspension in mechanical form into the electrical energy collected into the storage. The various energy sources are recovered as electricity which acts as a separate energy reserve to power several vehicle systems. Depending on the time of recovery and the density stored, energy is used to feed actuators in different systems.

In automotive electrical equipment with coil structure, inductance energy is generated from the electromotive force inductively during the switching process. Equipment with inductive energy due to electromagnetic induction includes: generators, electromagnetic sensors ... due to inductance phenomena such as transformers, ignition coils...

The above inductance energy source can be recovered and used as a form of renewable energy. This energy exists mostly on the ignition coils. When the current through primary coil is suddenly interrupted to initiate the discharge on the spark plug electrode. On the primary coil, an inductance of about 200V to 500V will appear due to a sudden change of magnetic coil. In addition, there are many actuators with inductors such as: injectors, solenoid valves, relays... also appear similar electrodynamic capacities with amplitude from 70V to 120V during operation. Such a large number of 70V to 500V electrical pulses spread throughout the automotive electrical systems, adversely affecting the life of switches, electronic components, heat generation and wasted energy. The applied

technical solutions such as: connecting zener, resistors, capacitors parallel to the power transistors are only to protect the switches but do not take advantage of the energy generated on the coil.

One of the devices that help to quickly recover and store renewable energy is supercapacitors. Currently, supercapacitors are gradually being applied widely in many fields of the automotive industry. In recent years, supercapacitors are increasingly used in environmentally friendly vehicles such as electric cars and hybrid cars. Even in traditional cars using internal combustion engines, supercapacitors have been used as an energy storage source to accommodate systems that operate continuously at high frequencies thanks to the charge-discharge properties fast capacitors, typically the direct fuel injection system on a Diesel engine (CRDi) from Audi.

The goal of the research is to modelize process of generating and recovering renewable energy from inductors, finding practical solutions to store energy in the supercapacitor system, and reuse the energy source. The above wasted inductance, improve the injector performance, contributes to fuel saving, minimizes environmental pollution and increases the life of the semiconductor parts on the vehicle by the theoretical model figure 1.16 is as follows:

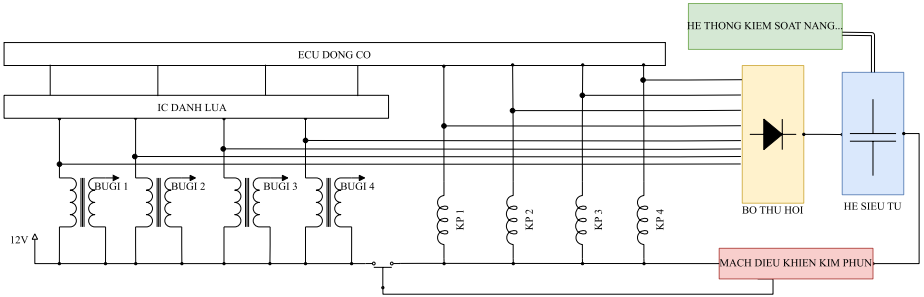


Figure 1.16: Theoretical model of inductive energy recovery and application systems

The researcher decides to select and implement the topic: **“Research and application of self-inductance energy in automobile”**.

1.2 Goals of research

Research to recover self- inductive energy sources in cars and use them for improving performance of fuel injectors.

1.3 Research content

The following contents of the thesis have been deployed:

- Overview of self - inductive energy, related studies.
- Theoretical basis of inductors, inductance electromotive force, self-inductance energy.
- Analysis of computational models of the processes operating on inductors.
- Analysis and modeling of supercapacitors and supercapacitors connecting electrical loads.
- Calculate and simulate inductive energy.
- Analyzing the injector's operation process.
- Surveying the characteristic of inductance electromotive force.
- Designing, constructing, testing products on the experimental model.
- Testing the product on a real car, re-evaluated the dynamics.

Chapter 2: THEORETICAL BASIS OF INDUCTIVE ENERGY AND SUPERCAPACITY SYSTEM

2.1 Actuators store inductive energy

To control the automobile to perform the functions required by the driver, the ECU (Electronic Control Unit) acts on the actuators that convert electrical energy into mechanical or thermal energy. Actuators in cars are very diverse: ignition coils, fuel injectors, glass lift motor - door lock, glass heater wire, lights, relay.... In which, the ignition coils and the fuel injectors are two actuators that operate continuously during automobile operation. The common feature of ignition coils and injectors is that they both use coils, which generate high amplitude inductance electromotive force in the switching process.

ECU plays a central role in controlling, receiving and analyzing input signals from sensors, processing and controlling the outputs of coil-type actuators such as ignition coils, injectors, control valves, relays Figure 2.1 shows the control diagram of the ignition coils assembly in the direct ignition system. The ignition coils consists of two windings, primary and secondary. When the primary coil is switched on, a high voltage appears on the secondary coil, fed to the spark plug to perform the ignition.

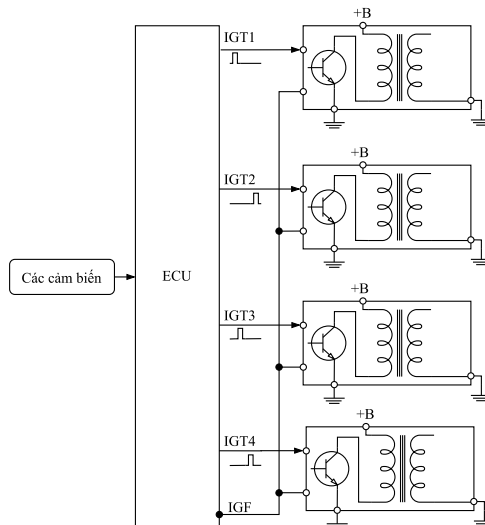


Figure 2.1: Principle of control of ignition coils

Figure 2.2 shows the circuit of 04 injectors J1, J2, J3, J4. Each injector is basically composed of a two-pole coil, in which one pole connects to a 12V positive source, the other is controlled to close, disconnect mass at pins # 10, # 20, # 30, # 40 by the power transistors in the ECU.

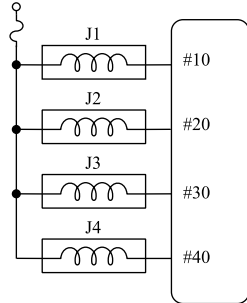


Figure 2.2: Principle of controlling fuel injectors

The solenoid valves and the relay coils are basically composed of inductors with a control circuit equivalent to that of the injector in figure 2.2.

Assessment: ignition coils, fuel injectors, solenoid valves, relays are basically an inductor. One coil is connected to the positive source, the other is driven by power transistors. Every time a power transistor is turned off, at the cathode of the ignition coils and injectors, inductance electromotive force always appears between 70 and 500V. The frequency of these inductance pulses is very large, proportional to the number of cylinders and engine speed. These high pulse inductance voltages propagate across lines, enter control boxes, damage electronic components and generate heat.

Self-inductance:

The self-inductance is proportional to the coefficient of inductance, the variation of the induced current.

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

The minus sign (-) in the expression proves that the induced current has the direction according to Lenz's law.

Waveform of self-inductance:

Actuators in cars made of inductors share the same property, that is, after each

switching process, high voltage pulses appear. Although these pulses exist for a very short time, but the amplitude is very high, propagating in the electrical system easily causing damage to the actuators. The process of showing inductance voltage pulses across 6 phases from A to G is shown in figure 2.3.

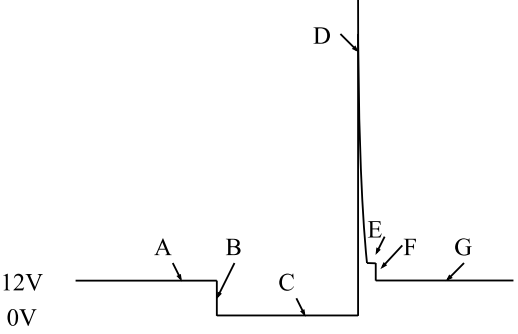


Figure 2.3: The phases represent self-inductance voltage impulses

- Section A: voltage level (battery voltage).
- Section B: time of circuit breaker.
- Section C: current time through the coil.
- Section D: inductance voltage pulse appears.
- Section E: maintain inductance voltage.
- Section F: process of energy consumption.
- Section G: return to operation cycle.

In which segment D has amplitude from 70V to 500V depends largely on the variable speed of the flux and the number of turns of coils. The topic is to focus on phase D research by recovering this form of energy in the form of inductance energy.

Inductive Energy:

$$W = \int_0^1 dW = \int_0^1 L \cdot i \cdot di = L \frac{i^2}{2} \tag{2.3}$$

Where:

- W*: energy stored (J)
- L*: inductance factor (H)
- I*: current (A)

Inductance energy in the coil is generated during the time the current in the circuit changes (increases or decreases) of the switching process.

2.2 Mathematical modeling and simulation

2.2.1 Mathematical modeling

Based on the principle of inductor control, the equivalent diagram (physical model) of the inductor in the energy accumulation process is proposed in figure 2.8 and the equivalent diagram of the inductor during the release of energy proposed in figure 2.11.

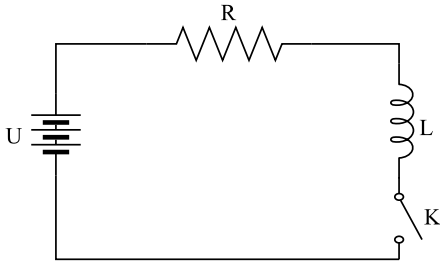


Figure 2.8: Equivalent diagram of controlling inductors during accumulation
năng lượng

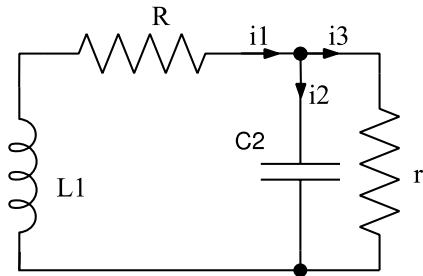


Figure 2.11: Equivalent diagram of controlling inductors in the process of
energy release

Where: I : current; R : resistance; L : inductive factor of coil; U : operation voltage; C_2 : internal capacitor; r : leakage resistor of capacitor C_2 ; i_1 : current of R ; i_2 : current of C_2 ; i_3 : current leakage of r .

Mathematical modeling of self-inductance ξ_{tc} :

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

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

Mathematical modeling of inductive energy $W_{dc1}(t)$, storing process:

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

Mathematical modeling of inductive energy $W_{dc2}(t)$, releasing process:

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

In which a, b, c, d are the factors that correspond to R, r, L, i_1, i_2, i_3 .

2.2.2 Simulation model

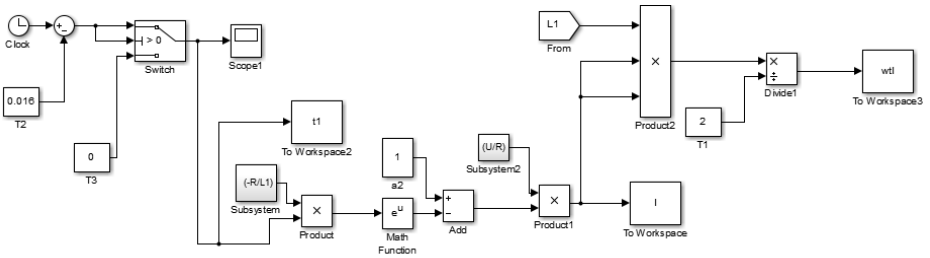


Figure 2.10: Model simulating inductance energy accumulation

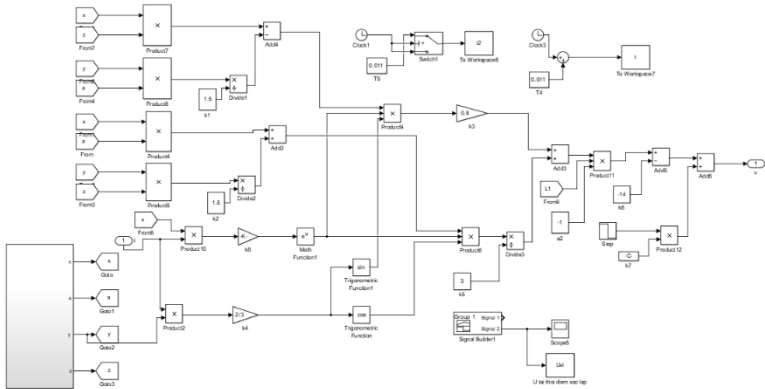


Figure 2.13: Model simulating inductance electromotive force

2.3 Inductance energy calculation

2.3.1 Inductive energy accumulates on the ignition coils

Figure 2.18 shows the inductance energy of the ignition coils W_{bb} , the energy required to ensure the ignition process W_{ct} , the energy recoverable W_{th} in one ignition on the primary coil at the speed range engine level from 750 to 6000 rpm.

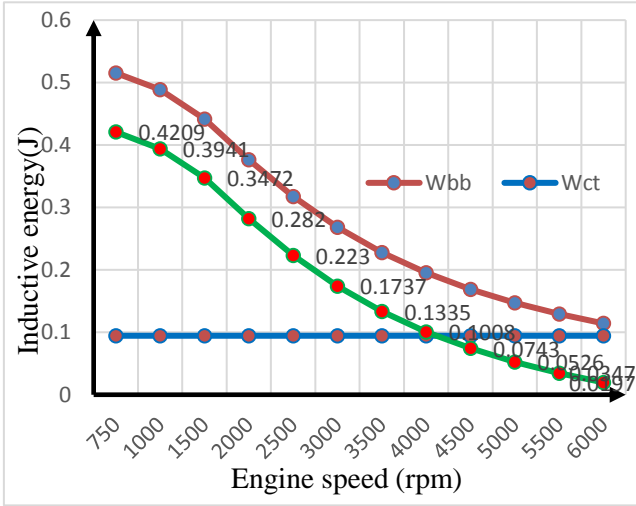


Figure 2.18: Description of W_{th} ; W_{bb} ; W_{ct} in one engine cycle

Inductance energy is capable of recovering over 04 ignition coils according to speed n_e

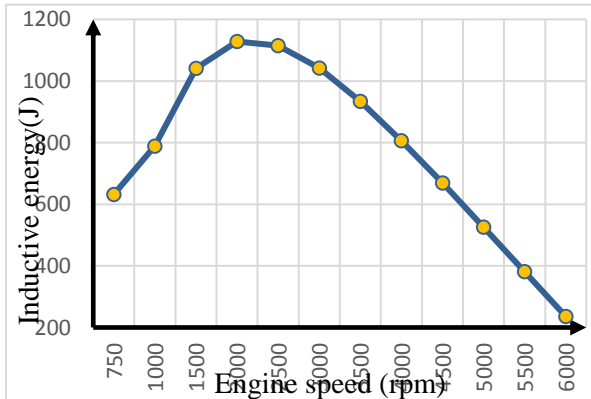


Figure 2.19: Inductance energy can be recovered according to engine speed

Assessment: the higher the engine speed, the lower the inductive energy that can be recovered. The maximum energy value fluctuates around the speed range of 1500 to 2500 rpm, corresponding to the average speed range of the vehicle when operating on the road.

2.3.2 Inductive energy accumulates on the injector

Figure 2.21 shows the inductance energy of the injector W_{kp} , the energy needed to ensure the injection process W_{kp-ct} , the recoverable energy $W_{kp-th,ne}$ in one injection at engine speed ranges from 750 to 6000 rpm.

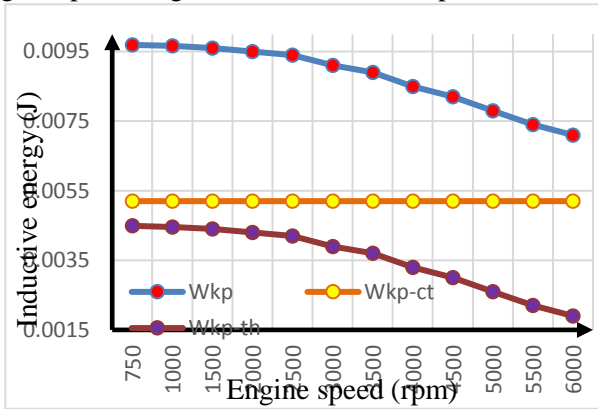


Figure 2.21: Description of W_{kp} ; W_{kp-ct} ; W_{kp-th} in one cycle

Inductance energy of the injector reaches the highest value of about $9.69 \times 10^{-3} \text{J}$ at the idle speed of 750 rpm and the lowest value of about $7.1 \times 10^{-3} \text{J}$ at the engine speed of 6000 rpm. The energy difference between the highest and lowest value of the injector in the upper speed range is not much (about $2.59 \times 10^{-3} \text{J}$).

2.3 Calculation of supercapacitors

A simple model for a two-layer capacitor system can be represented by equivalent capacitance (Cdl), equivalent parallel resistance (Rlk) and equivalent series resistance ($Resr$) as shown in figure 2.23.

There are two methods of charging and discharging supercapacitors: one is charging and discharging supercapacitors with constant voltage over time, the other is charging and discharging supercapacitors with constant amperage over

time. The method of charging and discharging supercapacitors with constant voltage is focused and deployed in the topic.

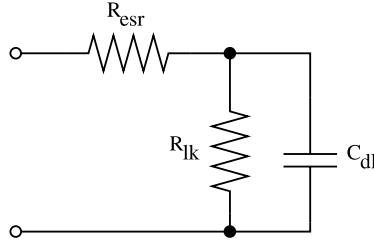


Figure 2.23: Equivalent circuit diagram of supercapacitors

A system of n supercapacitors with the same capacitance capacity (C), the same is connected in series, the total capacity of the supercapacitor system (C_{total}).

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

The maximum energy and maximum power that the supercapacitors can store is calculated by the expression:

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

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

In which:

E_{max} : maximum energy of capacitor.

P_{max} : maximum power of capacitor.

$mass$: mass factor of capacitor.

ESR_{DC} : leakage resistor of capacitor.

Energy on supercapacitors

The supercapacitor system consists of n supercapacitors connected in series to form a supercapacitor system with total capacity C_{total} . Equation (2.42) is represent to electric field energy (W_{cap}) of supercapacitors with C_{total} and voltage U .

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

Supercapacitors connected to load

A closed circuit consists of two basic components: capacitance (C) and inductance (L). The process of the supercapacitor supplying power to the load is depicted with an equivalent circuit diagram in figure 2.12 below.

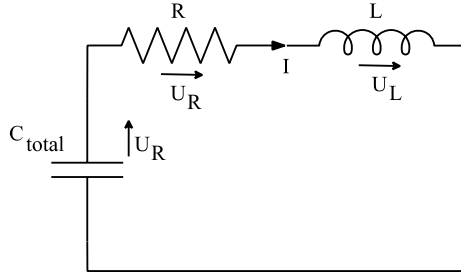


Figure 2.26: Diagram of the supercapacitor and load equivalent circuit

At time $t = 0$, before the supercapacitor discharges, the initial capacity, voltage and current of the capacitor at full charge is $C_{total} = C/n$, $U = U_0$, $I = I_0$

When the capacitor starts to discharge, the amperage appears in the circuit as shown in figure 2.26.

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

Equation (2.49) described releasing current of capacitor on figure 2.26.

2.4 Injector properties

2.4.1 Injector control

Fuel injectors are controlled by two popular methods, the flow control method, also known as the Peak and Hold method and the Saturated voltage method. During the switching process, the inductor in the injector generates an electromotive force opposite to the injector feed, which is still one of the inherent disadvantages of actuators constructed from inductors.

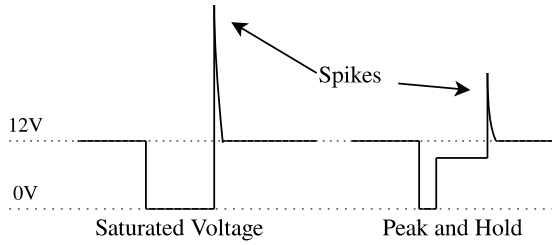


Figure 2.27: Voltage in two control modes

The two control methods above both supply a voltage source to the injector to lift the needle. However, in the current-control method, the control circuit will supply a high-intensity current to open the injector, then the current will be reduced by lowering the voltage enough to maintain the open operation of the needle. for the purpose of reducing part of the electromotive force when switching (figure 2.27).

2.4.2 Characteristics of current through the injector

When the voltage is applied to the injector, the current in the magnetic coil increases due to the resistance of the inductance, the current produced tends to counteract its cause, a fundamental characteristic of the coil. Increasing current in proportion to the magnetic force acting on the core increases, up to a certain point, when the magnetic force is greater than the compression force of the return spring and the pressure from the fuel, the needle will move upward and fuel is injected into the cylinder.

The process of changing the inductance L in the injector in the needle lifting process into three stages as shown in figure 2.30.

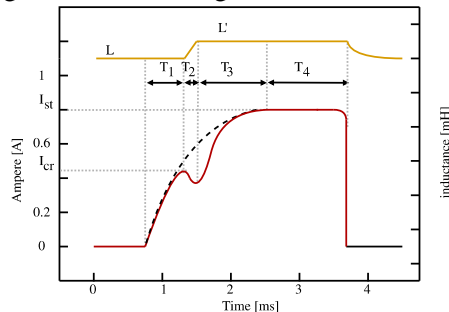


Figure 2.30: Curve of current through the injector

Stage 1 (T_1): needle closed, the inductance is now L_1 . At this time, the magnetic force (F_m) in the injector is very small compared with the total drag of the return spring (F_s) and the fuel pressure (F_f).

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

Electric current in phase 1:

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

Stage 2 (T_2): needle starts to lift, the inductance will increase from L to L' . The magnetic force overcame the resistance, and the needle began to lift off the base

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

On the other hand, the inductance of the injector starts to increase from $L \rightarrow L'$, the amperage will drop suddenly (dI/dt is different from 0).

$$I_2 = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{\Delta L}t_2} \right) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'-L}t_2} \right) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'(1-e^{-t_2})}t_2} \right) \quad (2.66)$$

U , R is the constant value during needle lifting, so the inductance increases suddenly leading to the current decrease. However, the period of current falling is very short, because the value of t_2 increases with time, leading $L'(1-e^{-t_2})$ to progress towards L' , at which time the amperage will continue to increase.

Stage 3 (T_3): Needle is completely lifted and the inductance is worth L' . The magnetic force is greater than the resistance of the spring and the resistance of the fuel. The needle valve has been lifted completely off the base.

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

At this time, the inductance has reached the value L' , the amperage continues to increase gradually until the saturation value is reached.

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

Stage 4 (T_4): current reaches saturated value, stable over time.

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

Chapter 3: INDUCTIVE ENERGY RECOVERY AND STORAGE SYSTEM DESIGN

3.1 Experimental model design of ignition fuel injection control

The current ignition assembly method ensures the system is compact, but the weakness is that it cannot take advantage of the "excess" inductance energy on the primary coil. To solve the problem of concern, the researcher has proposed to change the structure of the ignition control cluster with igniter and ignition coils as shown in figure 3.6 in accordance with the ability to utilize “excess” inductance energy but still ensure stable, safe and practical operation.

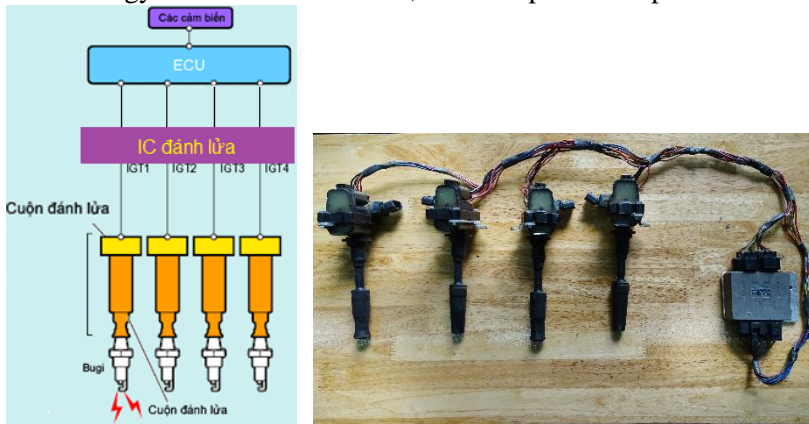


Figure 3.6: Recommended ignition cluster replacing

Experimental model:

The motor control electrical system on a steel frame size: 1320 x 700 x 1690 (mm) with components of the 1TR-FE engine control system incorporating the NI 6009 card for universal data communication between computer and device via USB port, energy storage and regenerative inductance energy recovery circuit as shown in figure 4.1. The model uses a 12V battery source to operate DC motor and its electrical components, with a corresponding engine speed simulator to set the engine speed range from 750 to 6000 rpm according to experimental goals.

3.2 Energy storage analysis and selection

With the goal of choosing the type of device capable of fast charging and discharging, receiving gradually deactivated electrodynamic energies and at the same time as a source of energy storage with a voltage higher than that of the battery and with a capacity large enough to improve improve the responsiveness of the injector. 27V-35F supercapacitor system is connected in series from 10 Maxwell BCAP0350 supercapacitors (figure 3.10), which are selected to meet the criteria of voltage, charge and discharge characteristics, temperature capacity, reason, specific capacity own energy, safety, longevity, environmental friendliness.



Figure 3.10. Supercapacitors 27V-35F

3.3 Construction of inductive energy collection, measurement and control

Regenerative inductance energy recovery circuit is designed and programmed according to the principle of figure 3.12 and the finished product in figure 3.14.

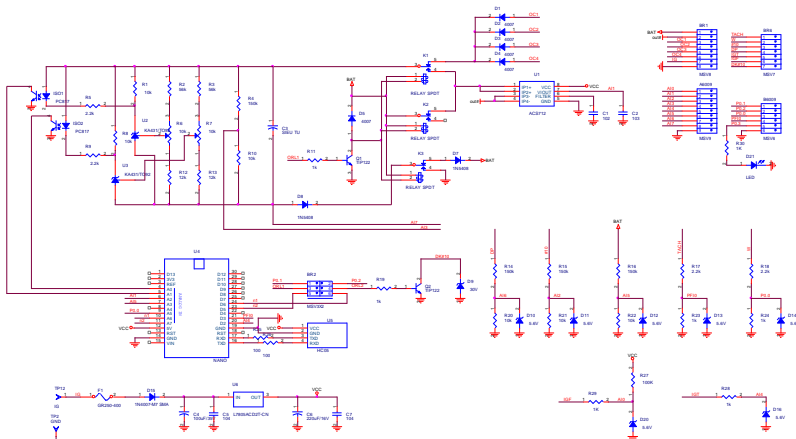


Figure 3.12: Schematic diagram of energy recovery circuit



Figure 3.14: Energy recovery circuit

In order to visualize the parameters during the test, an user interface using LabVIEW software is visually designed as a central dashboard as shown in figure 3.21.



Figure 3.21: Inductance energy data acquisition and control interfaces

The parameters displayed on the main interface:

- Engine speed (TACH).
- Battery voltage (BAT).
- Number of fuel injection times (# 10).
- Number of ignitions (IGT).
- Operation warning light (W).
- Mode using power source: battery or supercapacitors.
- Current energy is stored on supercapacitors.

3.4 Design of injector sensitivity evaluation system

The schematic diagram of the injector sensitivity evaluation circuit is shown in figure 3.25.

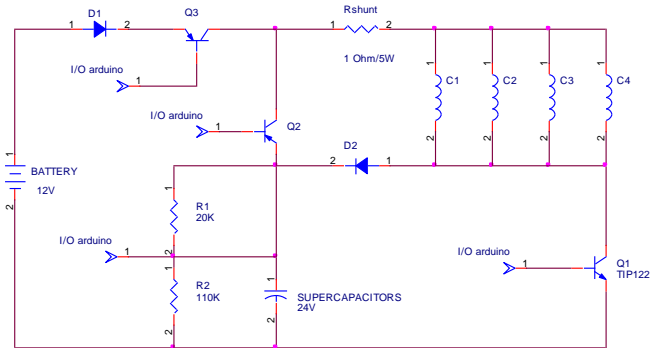


Figure 3.25: Principle of energy recovery and control on injectors

When the supercapacitors are filled with inductance electromotive force on the primary coil (C1, C2, C3, C4), the voltage signal is sent to the microcontroller via a voltage potentiometer. At this time, the microcontroller will control the transistor Q2 open and Q3 is closed, the supercapacitor system will provide operating voltage to the injector instead of the battery. A power resistor of $1\Omega /5W$ is connected in series with the injector to determine the amperage.

An injector control power circuit is constructed as shown in figure 3.26.

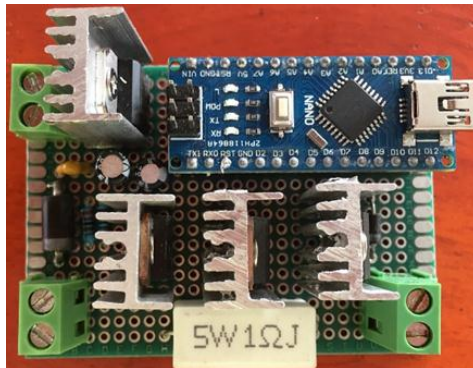


Figure 3.26: Energy recovery and control circuit on injector

The main parts of the power circuit include: 12V power from the battery used as the power supply for the system, Arduino Nano is used as the central controller. The injector is controlled by a power transistor TIP122.

Chapter 4: EXPERIMENT AND EVALUATION

4.1. Experimenting and evaluating inductance energy recovery and storage

To evaluate the ability to recover and store inductance energy of manufactured products that recover and store inductive energy.

Connection of recoverer, accumulator, energy control system in figure 4.1.

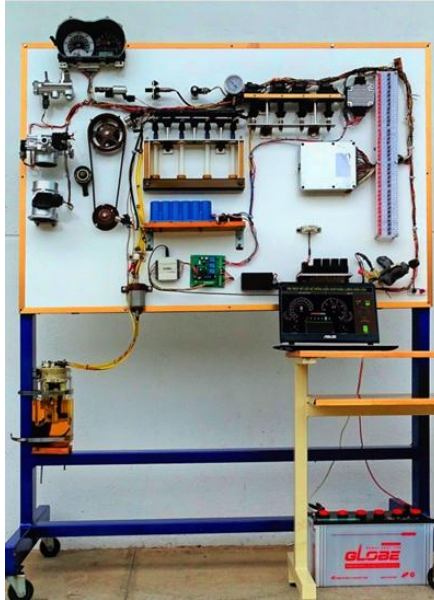


Figure 4.1: Diagram of the connection of the recovery unit, the storage unit, the energy control system on the test model

Operate and adjust the controller so that the engine speed is stable at 750 rpm, simulating the corresponding input signals. Observe and evaluate the information on the data collection interface.

Experimental results

Figure 4.2 shows: Actual inductance energy recovered at engine speed ranges (red line) reaches 570J at 750 rpm and tends to increase gradually as speed increases, energy recovery pole at 1,090J at a speed of 2000 rpm. This energy then tends to decrease gradually as the engine speed increase. It shows that the recovery of inductance energy in the speed range 1500 - 2500 rpm is optimal.

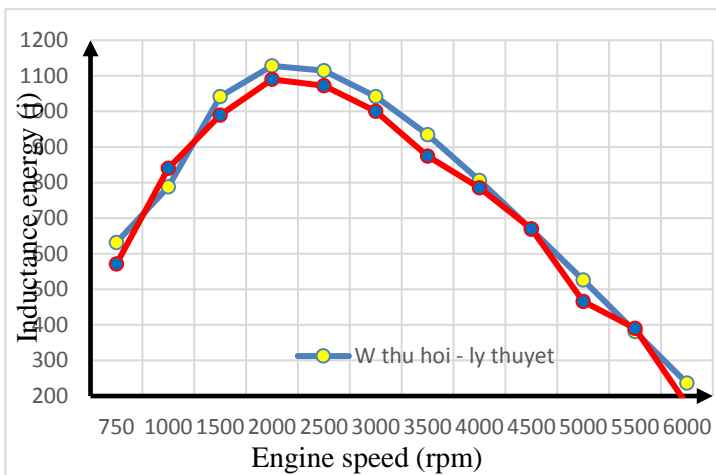


Figure 4.2: Inductance energy can be recovered according to the engine speed. The difference in value is about 4% between the theoretical recoverable inductance energy and the actual recoverable energy.

4.2 Experimentally improving injector responsiveness

Experiment on the injector with two voltage sources: a current 12V battery source and a 24V source from supercapacitors fully charged with inductance electromotive from the ignition coils and injectors as shown in figure 4.3.



Figure 4.3: Experiment on the responsiveness of the injector

The parameters of the injector include: Resistance: $R = 14,5\Omega$, Inductance: $L = 0,02H$. Figure 4.4 and 4.5 show the current and voltage characteristics of the injector at 12V from the battery and when using a 24V supercapacitors.

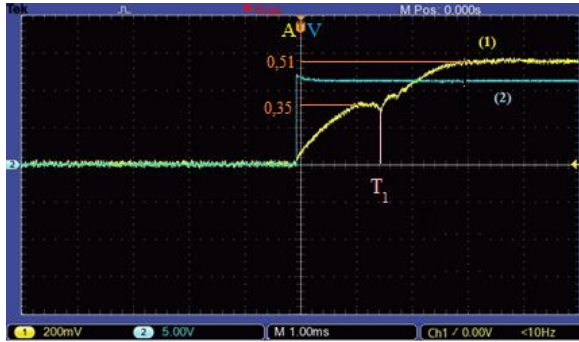


Figure 4.4: Current and voltage characteristics of the injector when using a 12V battery

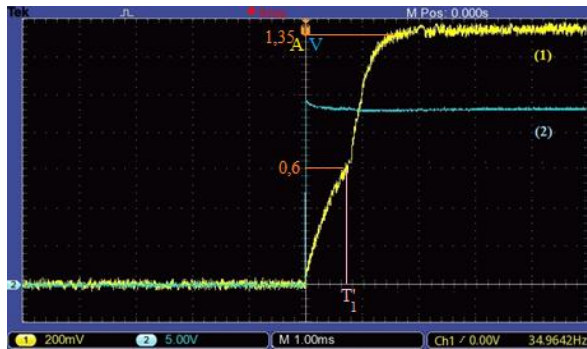


Figure 4.5: Current and voltage characteristics of the injector when using a 24V supercapacitors

Line 1 is the amperage of current through the needle representing increasing from the time the injector is voltageed to the time the current is saturated, line 2 is the voltage across the injector. When the operating voltage of the injector is increased by two times, the response of the injector is increased by two times, or in other words, the delay of the injector is reduced by 2 times.

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

Specifically, the experimental results showed that with a voltage of 24V applied to the injector, the response time of the needle increased by 2 times from $1,59 \times 10^{-3}$ s at 12V to $0,8 \times 10^{-3}$ s at 24V.

4.3 Experiment on automobile

In order to consider the power curve and the torque characteristic of the engine installed on the test car, it is expected that these two characteristic curves will not change when the vehicle is equipped with an energy recovery unit as shown in figure 4.8. Thereby proving the stability of product research and application.



Figure 4.8: Research products are mounted on test automobile

7-seater car tested on Mustang Dyanometer MD-500 capacity test tape according to ECE R15 cycle at automotive laboratory at Cu Chi Motor Sport.

Experimental results

The results of collecting data from the PowerDyne system during the test are shown in figure 4.14.

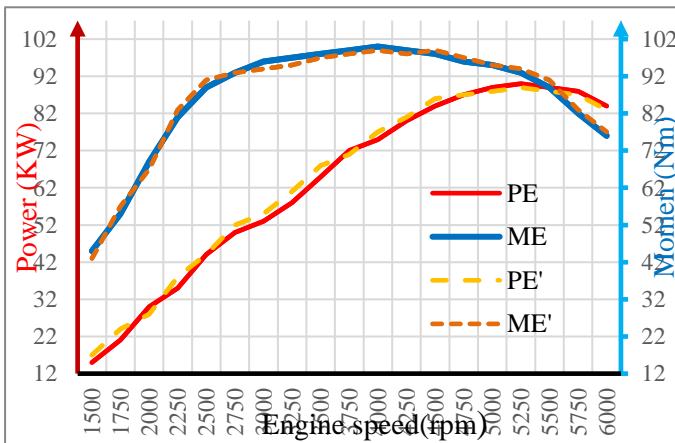


Figure 4.14: Features comparing engine power and torque with traditional ignition system and ignition system fitted with inductive energy recovery

Experimentation when a car operates with a traditional ignition system shows that the maximum useful power reaches 90,2 kW at a speed of 5250 rpm and a maximum torque of 100,7 Nm at a speed of 4000 rpm (PE and ME curves in figure 4.14).

Experimental results when a car operates with an ignition system fitted with an inductive energy recovery: maximum useful power reaches 89,6 kW at a speed of 5250 rpm and a maximum torque of 99,8 Nm at 4000 rpm (PE', ME' in figure 4.14). The deviation of the values of the respective power and moment in different speeds of the whole characteristic is <5% (in figure 4.14).

Test data characteristics (figure 4.15) exported and printed from the PowerDyne data collection system showed product stability in 3 tests.

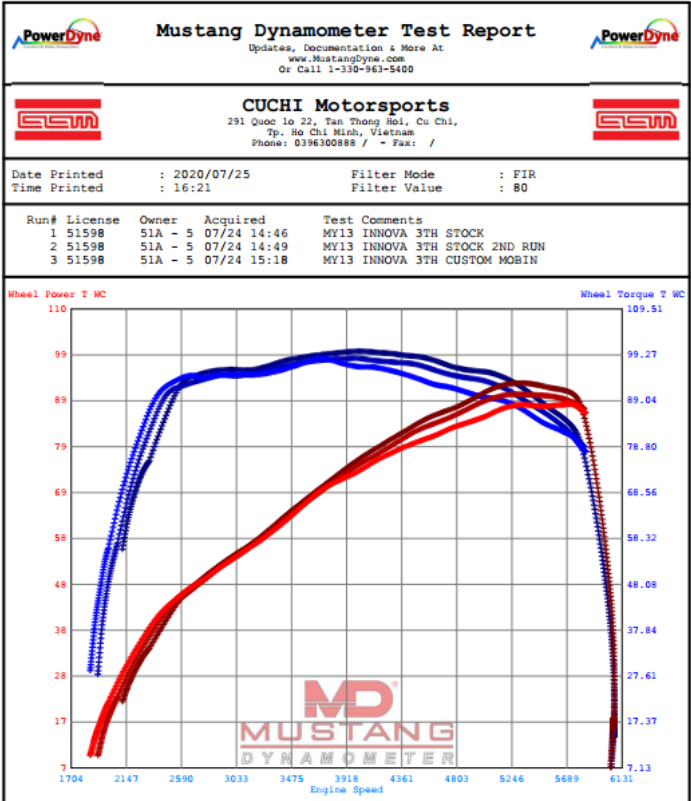


Figure 4.15: Characteristics to compare engine power and torque with ignition system fitted with inductance energy recovery in 3 tests.

Chapter 5: CONCLUSION

5.1 Conclusion

Research results of the thesis allow the following conclusions to be drawn:

- Building a physical and mathematical model for the system to recover inductance energy on the injector using the supercapacitor system.
- Designing and manufactured models to recover inductive energy ignition coils.
- Designing and constructing the regenerative inductive energy monitoring system with microcontroller application to ensure energy saving requirements. Although the energy savings in each operation cycle are not large, with a lot of cars and continuous operation, the energy savings are not small and this is a suitable study for future trends.
- The actual recovered inductance energy is 4% smaller than theoretical calculation.

Regenerative inductance energy is stored on the supercapacitor at 24V, increasing the sensitivity of the injector up to 2 times compared to the original.

- Researched product is an energy recovery and storage unit, when mounted on a real car, does not affect the vehicle's kinetics. Motor capacity and torque characteristics are not significantly reduced (less than 5%) when installed with a collector, storage, and application of inductive energy.
- Inductive energy researched and applied in cars has achieved initial efficiency, contributing to an important foundation for the next researches on this issue.

5.2 Recommendation and future works

The researcher suggests that the topic can be developed in the following directions:

- Study to evaluate efficiency as well as injection timing of high-resistor injectors at a voltage of 24V to improve fuel mixture mixing and engine combustion.
- Calculate reduction of battery capacity and size when applying supercapacitors.
- Develop algorithm and programmed load distribution between alternator, accumulators, supercapacitors.
- Calculate the energy from the phase of the alternator to charge the supercapacitor system.

CONFERENCES

- [1] John Smart, Jim Francfort, Donald Karner. and paners, Advanced Vehicle Testing Activity, Idaho National Laboratory, EVS24, Stavanger, pp. 1-13 , 2009.
- [2] Cieřlik 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. and paners, Research Review of a Vehicle Energy-Regenerative Suspension System, Energies, 13; doi:10.3390/en13020441, 2020.
- [4] Pasquier A., Plitz I., and partners, 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] Do Quoc Am. Research, calculation and making of hybrid ignition system. Doctoral thesis of Ho Chi Minh City University of Technology. HCM, pp. 1-21, pp. 44-49, pp. 115-116, 11/2020.
- [16] Huynh Xuan Thanh. Experimental evaluation of the ability to accumulate energy on the Hybrid ignition system. Master thesis of Ho Chi Minh City University of Technology. HCM, pp. 49-85, 2018.
- [17] Duong Tuan Tung. Research on improving the energy recovery efficiency of the regenerative brake system in automobile. Doctoral thesis of Ho Chi Minh City University of Technology. HCM, pp. 82-98, 2020.
- [18] Nguyen Do Minh Triet. Simulation, testing and evaluation of inductive energy recovery equipment on automotive electrical systems, Master thesis of Ho Chi Minh City University of Technology. HCM, pp. 21-63, 2016.
- [19] Do Van Dung. *Automotive electronics and engine control*. National University Publisher, Ho Chi Minh City, pp. 129-132, 2013.
- [20] Le Khanh Tan. Applying arduino and labview platform in automotive engine data acquisition. *Journal of Technical Education Science* No.51, pp. 44-49, 2019.
- [21] Nguyen Thanh Luan, Le Thi Hong Nhung, Lai Hoai Nam. Measurement and controls dryer by Labview. *Journal of Technical Education Science* No. 58, pp. 60-66, 2020.