

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

NGUYỄN HUỲNH THI

TÊN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN
NGHIÊN CỨU VÀ CHẾ TẠO THỬ NGHIỆM ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG
KHÔNG TRỰC KHUỖU

Chuyên ngành: Kỹ Thuật Cơ Khí Động Lực
Mã số chuyên ngành: 9520116

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2024

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. Huỳnh Thanh Công

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Nguyễn Văn Trang

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở Trường
Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày tháng năm

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong giai đoạn hiện nay tại Việt Nam, các loại hình phương tiện này còn tồn tại một số bất tiện: Hệ thống bình điện quá nặng, choán không gian chất hành lý. Thời gian chạy với số bình điện đó chỉ đủ cho một cự ly chạy trên dưới 500km, sau một khoảng thời gian nhất định, từ 4 - 6 giờ lại phải nạp điện. Ngoài ra, số trạm điện đáp ứng được yêu cầu nạp điện này cũng còn quá ít. Trong bối cảnh đó, nhiều nhóm nghiên cứu đã và đang tìm kiếm những giải pháp khoa học, công nghệ nhằm phát triển các nguồn động lực có hiệu suất cao tương đương như động cơ đốt trong không trực khuỷu phát điện tuyến tính (Free piston linear engine-FPLE). Đây là một trong những giải pháp thay thế động cơ đốt trong truyền thống. Loại động cơ này có hiệu suất nhiệt cao, ma sát thấp nên được rất nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm nghiên cứu. Loại động cơ này có kết cấu đơn giản và nhỏ gọn nên rất phù hợp dùng để nạp điện cho ô tô chạy điện. Động cơ FPLE có tiềm năng ứng dụng trong việc nạp điện cho ô tô chạy điện. Tuy nhiên, cần tiếp tục nghiên cứu để giải quyết các thách thức về trọng lượng và hiệu suất của động cơ này. Chính vì vậy, đề tài “Nghiên cứu và chế tạo thử nghiệm động cơ đốt trong không trực khuỷu” được đề xuất thực hiện.

2. Mục đích nghiên cứu

Nghiên cứu này sẽ tập trung vào động cơ không trực khuỷu (FPE) loại piston kép hai kỳ đánh lửa cưỡng bức. Một cơ cấu khởi động cơ khí được đề xuất áp dụng, cơ cấu có khả năng đưa piston đi hết hành trình và dao động tuyến tính. Mục đích cụ thể như sau:

- Nghiên cứu tổng quan về động cơ không trực khuỷu;
- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết động cơ không trực khuỷu loại piston kép đánh lửa cưỡng bức;
- Thiết kế chế tạo mô hình động cơ FPE.
- Phát triển mô hình hệ thống khởi động cơ khí và điều khiển FPE;

- Thực nghiệm mô hình đánh giá một số thông số quá trình khởi động và hoạt động của động cơ;

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

Động cơ đốt trong không trực khuỷu loại piston kép, 2 kỳ, cỡ nhỏ (25cc), đánh lửa cưỡng bức, sử dụng nhiên liệu xăng truyền thống.

4. Phạm vi nghiên cứu

Khảo sát và phân tích đặc tính động học, động lực học của động cơ không trực khuỷu 2 kỳ, cỡ nhỏ khoảng 25cc, đánh lửa cưỡng bức.

Thiết kế, chế tạo mô hình FPE và đề xuất cơ cấu khởi động cơ khí.

Mô hình hóa mô phỏng áp suất sau đánh lửa của quá trình khởi động và khảo sát một số thông số cơ bản của quá trình khởi động và hoạt động dựa trên mô hình đã thiết kế.

5. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết thiết kế, kết hợp với mô phỏng và chế tạo thử nghiệm mô hình cụ thể như sau:

Nghiên cứu lý thuyết: Nghiên cứu về động lực học của động cơ đốt trong không trực khuỷu, lý thuyết đánh lửa, lý thuyết khởi động và lý thuyết về quá trình cháy của động cơ

Nghiên cứu tính toán, thiết kế: Tính toán các thông số cơ bản của động cơ, nguyên lý khởi động cơ khí cho động cơ piston tự do, tính toán các thông số của hệ thống khởi động, điều khiển động cơ piston tự do

Nghiên cứu mô phỏng: Từ cơ sở thiết kế sử dụng phần mềm Matlab Simulink mô phỏng để đánh giá quá trình cháy.

Nghiên cứu thực nghiệm: Từ cơ sở lý thuyết và mô phỏng, thực hiện chế tạo mô hình thực nghiệm để đánh giá lại các thông số mô phỏng.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Ý nghĩa khoa học: Bổ sung cơ sở lý luận cho việc nghiên cứu phát triển mô hình động cơ đốt trong không trục khuỷu thay thế cho động cơ đốt trong truyền thống trong tương lai.

Ý nghĩa thực tiễn: Kết quả của đề tài có thể sử dụng trong nghiên cứu, chế tạo và phát triển động cơ đốt trong không trục khuỷu hai kỳ đánh lửa cưỡng bức bằng tia lửa điện nhằm định hướng phát triển để nạp điện cho ô tô điện.

7. Cấu trúc

Chương 1: Tổng quan

Chương 2: Cơ sở lý thuyết

Chương 3: Nghiên cứu phát triển mô hình động cơ thử nghiệm

Chương 4: Mô hình hóa và mô phỏng quá trình đánh lửa

Chương 5: Nghiên cứu thực nghiệm

Chương 6: Kết luận và hướng phát triển

Chương 1: TỔNG QUAN

1.1. Lịch sử ra đời của động cơ không trục khuỷu

Động cơ không trục khuỷu (Free piston engine-FPE) là động cơ hoạt động tuyến tính và loại bỏ trục khuỷu. Loại động cơ này được đề xuất lần đầu tiên vào khoảng năm 1930, FPE đã được sử dụng trong giai đoạn 1930 -1960 như máy nén khí và máy tạo khí. Loại động cơ này đã cung cấp một số lợi thế so với thời điểm hiện nay là đang sử dụng động cơ đốt trong truyền thống và hệ thống tuabin khí [2]. Chúng được biết là có hiệu suất nhiệt cao khoảng (40-50%) so với động cơ đốt trong truyền thống khoảng (30-40%) [3].

1.2. Đánh giá ưu và nhược điểm của động cơ không trục khuỷu

1.2.1. Ưu điểm

Không giống như động cơ đốt trong truyền thống, động cơ đốt trong không trục khuỷu nên các piston chuyển động tự do trong xy lanh. Điều này cho phép động cơ không trục khuỷu dễ dàng điều chỉnh tỷ số nén và tối ưu hóa quá trình cháy. Việc loại bỏ cơ cấu trục khuỷu làm giảm đáng kể số lượng các bộ phận

chuyển động và độ phức tạp của động cơ [17]. Điều này mang lại một số ưu điểm:

- Giảm tổn thất ma sát do tính đơn giản về cơ học và loại bỏ lực ngang piston sinh ra trong động cơ truyền thống;
- Giảm tổn thất truyền nhiệt do mở rộng hành trình công suất nhanh hơn;
- Có khả năng chi phí bảo trì thấp hơn và độ tin cậy cao hơn do thiết kế nhỏ gọn và đơn giản;
- Khả năng đa nhiên liệu do tỷ số nén thay đổi

1.2.2.Nhược điểm

Do loại bỏ cơ cấu trục khuỷu và thanh truyền nên động cơ không trục khuỷu cũng đem lại một số trở ngại và thách thức cho các nhà khoa học về các vấn đề sau:

- Điều khiển đánh lửa
- Điều khiển phun xăng
- Khởi động động cơ
- Điều khiển hành trình piston
- Hoạt động ổn định của động cơ,...

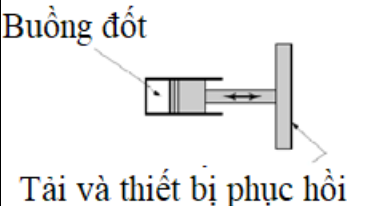
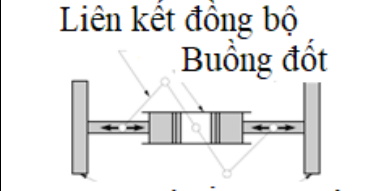
1.3. Động cơ không trục khuỷu phát điện tuyến tính (FPEG)

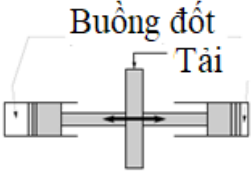
Các ứng dụng của động cơ không trục khuỷu bao gồm: tạo tải để kéo máy phát điện tuyến tính, máy bơm thủy lực và máy nén khí [2].... FPEG được xem xét ở đây bao gồm một FPE được ghép nối với một máy phát điện tuyến tính. Quá trình đốt cháy trong các xy lanh của động cơ làm cho máy phát điện tuyến tính chuyển động qua lại. Máy phát điện tuyến tính chuyển đổi động năng của động cơ thành năng lượng điện, năng lượng này sẽ được lưu trữ hoặc sử dụng để cung cấp năng lượng cho tải bên ngoài.

1.4. Lựa chọn cấu hình và nguyên lý khởi động cho mô hình FPE

Theo các kết quả nghiên cứu, FPE có thể được chia thành ba loại theo cấu hình piston: piston đơn, piston kép và piston đối xứng [39]. Biểu diễn giản đồ của chúng và đánh giá những ưu điểm và nhược điểm được minh họa trong Bảng 1.1. Thông tin chi tiết về từng cấu hình được giới thiệu bên dưới.

Bảng 1.1: Các cấu hình động cơ không trực khuỷu [39]

Cấu hình piston	Cấu tạo	Đánh giá
Piston đơn	 <p>Buồng đốt</p> <p>Tai và thiết bị phục hồi</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Đơn giản và dễ kiểm soát; • Không cân bằng; • Có thể sử dụng đối trọng. • Cần phải có thiết bị phục hồi để duy trì hoạt động
Piston đối xứng	 <p>Liên kết đồng bộ</p> <p>Buồng đốt</p> <p>Tai và thiết bị phục hồi</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cân bằng trọng tâm; • Không dao động với khối lượng piston bằng nhau; • Yêu cầu đồng bộ

		<p>hóa piston.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cần phải có thiết bị phục hồi để duy trì hoạt động
<p>Piston kép</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Mật độ công suất cao hơn; • Hiệu quả tiềm năng cao hơn; • Không cân bằng; • Tự duy trì hoạt động mà không cần thiết bị phục hồi. • Tương đối khó kiểm soát.

Bảng 1.1 thể hiện cấu hình piston kép tuy khó kiểm soát nhưng có ưu điểm là công suất cao hơn, là chủ đề cho nhiều nghiên cứu gần đây về công nghệ động cơ piston tự do. Một số thiết kế piston kép đã được đề xuất và một vài nguyên mẫu đã xuất hiện, với đầu ra thủy lực và điện [40-43]. Cấu hình động cơ piston kép loại bỏ sự cần thiết của thiết bị phục hồi, vì hành trình làm việc của piston này cung cấp công việc dẫn động quá trình nén trong xy lanh kia. Điều này cho phép thiết bị đơn giản và nhỏ gọn hơn với hiệu suất cao hơn.

1.4.1. Lựa chọn nguyên lý khởi động

Qua các nghiên cứu cho thấy có 2 chiến lược khởi động chính hiện nay:

Thứ nhất “chiến lược khởi động lập tức” máy điện tuyến tính hoạt động như một động cơ và tạo ra lực không đổi theo hướng của vận tốc piston, mục tiêu đủ áp suất để đánh lửa chỉ trong một hành trình. Tuy nhiên, hầu hết các trường hợp công suất của máy phát điện tuyến tính không đủ để áp suất trong xy lanh đạt đến áp suất đánh lửa chỉ trong một hành trình.

Thứ hai “Chiến lược khởi động dao động” chiến lược này sử dụng máy phát điện có cường độ thấp cung cấp lực đẩy thay đổi theo thời gian để tích lũy năng lượng khí nén dựa trên đặc tính lò xo không khí bên trong xy lanh. Tuy phương pháp này đạt hiệu quả hơn do “Chiến lược khởi động dao động” áp suất trong xy lanh có thể đạt đến áp suất đánh lửa trong một vài chu kỳ nhưng phương pháp này đặt ra vấn đề điều khiển do tải và hướng dòng điện thay đổi liên tục.

Từ những phân tích trên cho thấy cả hai chiến lược khởi động ở trên vẫn còn nhiều hạn chế. Vì vậy, nghiên cứu này sẽ tập trung vào FPE loại piston kép đánh lửa cưỡng bức. Một cơ cấu khởi động cơ khí được đề xuất áp dụng cả hai chiến lược nêu trên, cơ cấu có khả năng đưa piston đi hết hành trình và dao động tuyến tính.

Chương 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

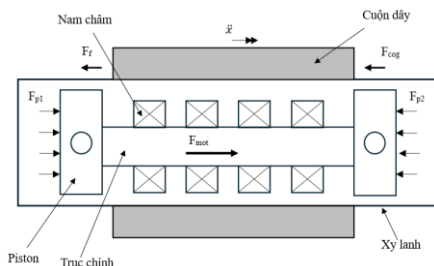
Chương này trình bày mô hình và thông tin cơ bản của động cơ không trục khuỷu, cũng như sự phát triển của các nghiên cứu gần đây về máy phát động cơ piston tự do (FPE). Từ các báo cáo và công trình nghiên cứu trước đây về mô hình số, thiết kế và thử nghiệm nguyên mẫu, cũng như chiến lược điều khiển của FPE, làm nền tảng cho việc đề xuất thiết kế mô hình FPE.

2.1. Động lực học động cơ không trục khuỷu

Hình 2.5, Các lực tác dụng lên FPLE bao gồm:

- Lực khí thể tác dụng lên xy lanh 1 F_{p1} và xy lanh 2 F_{p2}

- Lực ma sát do các bề mặt tiếp xúc F_f
- Lực từ trường do cuộn dây máy phát tuyến tính gây ra F_{cog}
- Lực quán tính của các khối lượng chuyển động $m\ddot{x}$



Hình 2.1: Mô hình các lực tác dụng lên cơ cấu chuyển động tịnh tiến

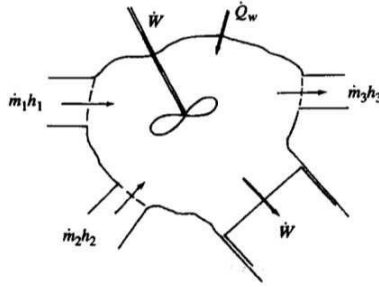
Theo định luật II Newton, phương trình động lực học của khối lượng chuyển động có thể được biểu diễn:

$$m\ddot{x} = \overline{F}_{p1} + \overline{F}_{p2} + \overline{F}_f + \overline{F}_{cog} \quad (2.1)$$

2.2. Lý thuyết quá trình cháy trong động cơ đánh lửa cưỡng bức

2.2.1. Hệ nhiệt động động cơ đốt trong

Chu trình nhiệt động cơ đốt trong là quá trình chuyển hóa năng lượng từ hóa năng thành cơ năng, trong đó năng lượng trung gian là nhiệt năng. Do đó, có thể coi chu trình nhiệt của động cơ đốt trong là một hệ nhiệt động mở, có sự trao đổi chất, nhiệt và công với môi trường bên ngoài, như minh họa trong Hình 2.2.

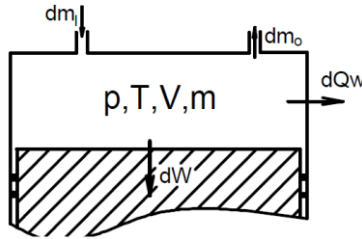


Hình 2.2: Mô hình hệ nhiệt động tổng quát động cơ đốt trong [62]

$$\frac{dU}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum \frac{dQ_i}{dt} + \sum h_i \frac{dm_i}{dt} \quad (2.1)$$

2.2.2. Hệ nhiệt động chu trình nhiệt động cơ đánh lửa cưỡng bức

Mô hình minh họa được thể hiện ở Hình 2.3



Hình 2.3: Mô hình nhiệt động học động cơ đánh lửa cưỡng bức [74]

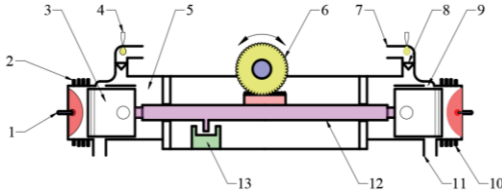
$$\frac{dQ_w}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \sum h_i \frac{dm_i}{dt} = m C_v \frac{dT}{T} \quad (2.2)$$

Chương 3. TÍNH TOÁN, THIẾT KẾ HỆ THỐNG KHỞI ĐỘNG CƠ KHÍ CHO ĐỘNG CƠ KHÔNG TRỤC KHUYỬ

3.1. Các thông số cơ bản của động cơ

Mô hình FPE được thể hiện trong Hình 3.1, sử dụng hai động cơ hai thì với hệ thống đánh lửa bằng tia lửa điện. Các thông số kỹ thuật của nguyên mẫu được tóm tắt trong Bảng 3.1. Một cấu trúc cơ khí được sử dụng để khởi động động cơ bằng cách dẫn động piston với tần số tuyến tính cho đến khi đạt đến áp suất

đánh lửa. Hệ thống đánh lửa bao gồm cuộn dây đánh lửa và bugi đánh lửa. Khi cơ cấu cơ khí vận hành, nhiên liệu được phun vào đường ống nạp để tạo thành hỗn hợp không khí-nhiên liệu. Hỗn hợp này sau đó đi vào buồng phụ trong hành trình nạp qua van một chiều. Trong quá trình quét, hỗn hợp được chuyển từ buồng phụ đến xy lanh, nơi diễn ra các quá trình nén, đốt và xả. Hệ thống đánh lửa và hệ thống phun nhiên liệu được điều khiển điện tử thông qua NI-USB 6212 để đảm bảo tỷ lệ không khí-nhiên liệu và vị trí đánh lửa chính xác.



Hình 3.1: Sơ đồ của FPE

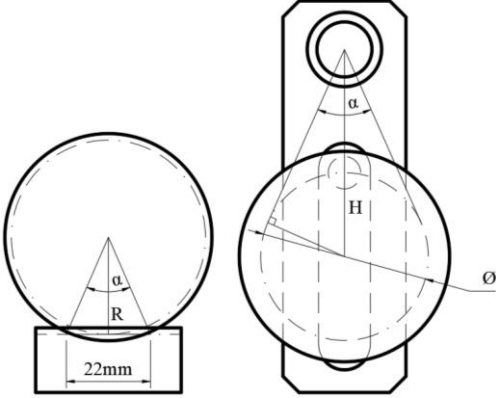
1. Bugi; 2. Xylanh trái; 3. Piston; 4. Vòi phun nhiên liệu; 5. Buồng chứa phụ; 6. Khởi động cơ khí; 7. Cửa nạp khí; 8. Van một chiều; 9. Cửa quét; 10. Xylanh phải; 11. Cửa xả; 12. Trục kết nối chính; 13. Giới hạn hành trình piston.

Số xylanh	2
Loại động cơ	2 kỳ
Đường kính xylanh	34 mm
Hành trình khởi động	22mm
Hành trình tối đa	30 mm
Khối lượng dịch chuyển	0.5 kg
Tỉ số nén tối đa	10.5:1
Nhiên liệu	xăng

3.2. Nguyên lý khởi động cơ khí cho mô hình FPE

Nguyên lý khởi động cơ khí cho mô hình động cơ piston tự do như sau: Về cơ bản, hệ thống khởi động cơ khí cho FPE là một cơ cấu Culit, được tính toán để đảm bảo khoảng dịch chuyển 22mm, thể hiện qua Hình 3.2. Bánh răng bị động luôn ăn khớp với thanh răng trên trục chính và có nhiệm vụ định vị vị trí của trục chính khi di chuyển. Bánh răng chủ động liên kết với tay quay, bánh lệch tâm và bánh răng truyền động từ mô tơ. Khi khởi động bánh răng chủ động sẽ liên kết với bánh răng bị động thông qua chốt liên kết điều khiển bởi role cài khớp. Lực quay từ motor thông qua truyền động xích đến bánh răng truyền

động trên trục bánh lệch tâm thông qua bánh lệch tâm tới tay quay dẫn động trục khởi động. Như vậy bánh răng sẽ dịch chuyển trên thanh răng theo một khoảng được tính toán trước, chuyển đổi chuyển động quay của motor thành chuyển động tịnh tiến của trục chính. Ngoài ra việc điều khiển tốc độ quay của motor sẽ cho phép FPE khởi động ở nhiều tốc độ khác nhau.

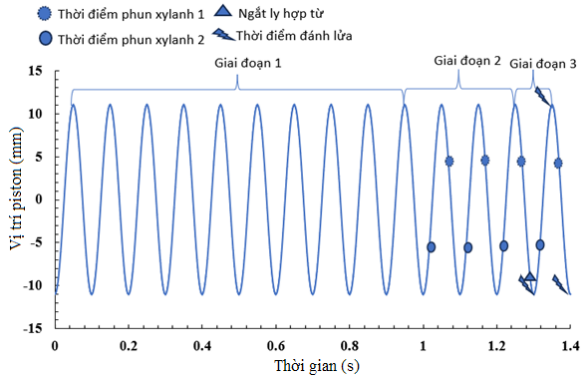


Hình 3.2: Cơ cấu Culit

3.3. Điều khiển mô hình FPE

3.3.1. Hệ thống điều khiển

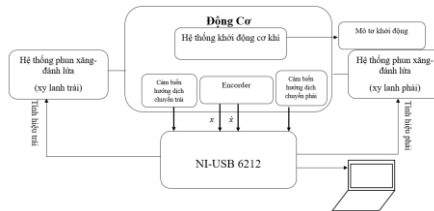
Quá trình khởi động có thể được chia thành ba giai đoạn: Ở giai đoạn một, cơ cấu khởi động vẫn sử dụng nguyên lý khởi động cộng hưởng, piston được dẫn động ở tốc độ tuyến tính cao nhất khoảng 0.7 m/s với lực khởi động không đổi 500N bằng một động cơ điện thông qua cơ cấu truyền động xích. Piston dịch chuyển trong quá trình này có biên độ không đổi là 22mm với tỷ số nén thấp $\epsilon = 3.3$. Ở giai đoạn thứ hai, nhiên liệu được phun vào đường ống nạp để tạo thành hòa khí, nhờ áp suất trong xy lanh hòa khí được hút vào buồng nạp dưới và được giữ lại nhờ cơ cấu van một chiều, ở giai đoạn này piston vẫn có dịch chuyển tuyến tính làm cho hòa khí đưa vào buồng cháy qua cửa quét. Cuối cùng, ly hợp từ trong cơ cấu khởi động cơ khí tách trục chính, và sau đó tia lửa xuất hiện, động cơ chuyển sang giai đoạn hoạt động tự do. Tất cả các giai đoạn được thể hiện trong Hình 3.3.



Hình 3.3: Chiến lược điều khiển mô hình FPE

3.3.2. Điều khiển hệ thống phun nhiên liệu - đánh lửa điện tử

Hệ thống phun xăng và đánh lửa trong mô hình này được điều khiển điện tử. Tất cả các hệ thống hoạt động theo phản hồi từ các cảm biến. Sau khi kết thúc quá trình khởi động, động cơ lập tức chuyển sang quá trình hoạt động tự do, trong cả hai quá trình thời điểm đánh lửa và thời điểm phun đều cố định.



Hình 3.4: Hệ thống điều khiển phun xăng – đánh lửa

Tương tự như hệ thống nhiên liệu vẫn sử dụng hai cảm biến tiệm cận để xác định hướng dịch chuyển. Bên cạnh đó, một encoder sẽ thu thập vị trí của piston để xác định vị trí đánh lửa. Hệ thống đánh lửa hệ thống đánh lửa điện cảm (TI- Transistorized ignition system) đang sử dụng có khả năng đưa điện 12V từ acquy lên đến 20kV-40kV. Các thành phần IC, bugi có sẵn bên ngoài thị trường. Hiện tại, bugi được sử dụng được tích hợp bởi cảm biến AVL-ZF43 để khảo sát áp suất trong xy lanh. Giao diện điều khiển phần mềm Labview, Hình 3.4.

Chương 4. MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG

4.1. Mục đích và phạm vi mô phỏng

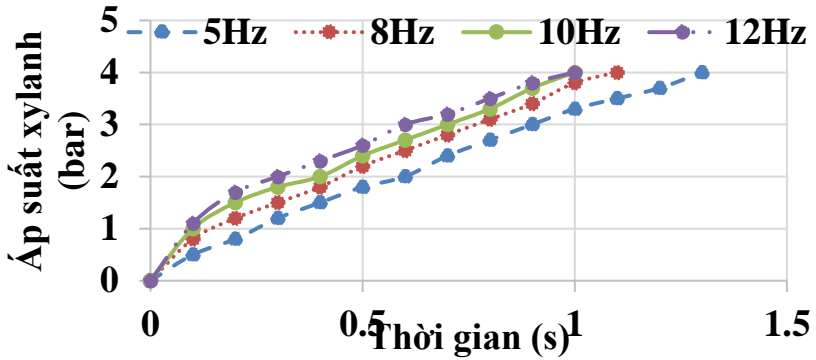
Mô phỏng là cơ sở ban đầu để đánh giá đề xuất khởi động cơ khí có phù hợp với mô hình động cơ FPE hay không. Ở chế độ khởi động lần đánh lửa đầu tiên được xem là quyết định động cơ có thể khởi động thành công. Vì thế, mô phỏng chỉ khảo sát các yếu tố ảnh hưởng ở lần đánh lửa đầu tiên. Tốc độ mô phỏng ở 10Hz, thời điểm đánh lửa khi piston dịch chuyển đến 22mm tính từ đỉnh xy lanh, lượng phun nhiên liệu thay đổi 2mg, 3mg và 4mg trên mỗi chu kỳ, thời gian cháy thay đổi từ 2ms-5ms [75], áp suất của quá trình giải phóng nhiệt là thông số đầu ra của khảo sát. Sau quá trình khởi động ngay lập tức động cơ chuyển sang quá trình hoạt động, vì FPE không có ĐCT cố định nên quá trình hoạt động của động cơ rất khó khảo sát bằng mô phỏng mà cần có các thực nghiệm cụ thể để điều tra, khảo sát qua trình này.

Bảng 4.1: Các thông số mô phỏng được thể hiện dưới bảng sau

<i>Thông số kỹ thuật</i>	<i>Kí hiệu</i>	<i>Giá trị</i>
Tốc độ	n	10Hz≈0,7m/s
Tỷ số nén khởi động	ϵ	≈3,33
Áp suất cuối quá trình nén khởi động	p_c	4bar
Thời gian cháy	t-ts	2ms-5ms
Lượng nhiên liệu đầu vào	mf	2mg-3mg
Tỷ lệ nhiệt riêng	γ	1,4
Nhiệt trị riêng của xăng	LHV	43.960000 (MJ/kg)

4.2. Thực nghiệm áp suất cuối quá trình nén khởi động

Thực nghiệm với bốn tần số tuyến tính 5Hz, 8Hz, 10Hz và 12 Hz, thay đổi tần số bằng cách thay đổi tỷ số truyền giữa mô tơ điện đến bộ phận khởi động, thể hiện ở Hình 4.1.



Hình 4.1: Đồ thị thời gian đạt áp suất khởi động với các tần số khác nhau

Qua khảo nghiệm ban đầu cho thấy ở các tần số khác nhau áp suất đều đạt 4 bar nhưng thời gian đạt được là khác nhau, tốc độ càng nhanh thời gian đạt được áp suất đánh lửa càng ngắn. Ở tốc độ 10Hz và 12Hz không có sự khác biệt lớn giữa thời gian hình thành áp suất trong xy lanh và ở các tốc độ cao hơn. Vì thế, tần số 10Hz với thời gian 1s để đạt áp suất 4 bar được chọn để khởi động mô hình FPE.

4.3. Mô hình mô phỏng

4.3.1. Mô hình động lực học

Piston được điều khiển dao động từ ĐCT đến ĐCD hoặc ngược lại với khoảng cách cố định. Có thể xem như piston dao động dưới dạng hình Sin, được biểu diễn dưới dạng:

$$x = A \times \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) \sin(2\pi f \times t) \quad (4.1)$$

Trong đó x là độ dịch chuyển của piston khi động cơ khởi động (mm), A là chiều dài nửa hành trình (mm), ϵ là tỉ số nén ban đầu của động cơ khi khởi động và f là tần số hoạt động (Hz). Tỷ số nén khởi động của động là 3.33, tần

số khối động không đổi của piston là 10Hz. Động lực học của piston có thể được xác định bằng định luật Newton II.

$$F_{st} - F_{sl} - F_{sr} - F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \text{ (quá trình khởi động)} \quad (4.2)$$

$$F_{cyl} - F_{cyr} - F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \text{ (quá trình hoạt động)} \quad (4.3)$$

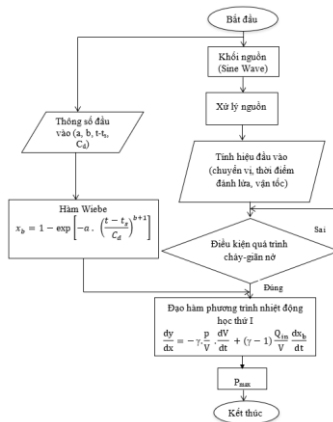
$$F_{cyl} = P_{cyl} \times S \quad (4.4)$$

$$F_{cyr} = P_{cyr} \times S \quad (4.5)$$

F_{cyl} , F_{cyr} là lực khí thể tạo ra từ quá trình giải phóng nhiệt trong cylinder trái và phải, P_{cyl} , P_{cyr} là áp suất trong xy lanh trái và phải, S là diện tích đỉnh piston. F_f là lực ma sát, m là khối lượng của chuyển động, a là gia tốc của piston, F_{sl} , F_{sr} lần lượt là lực nén ở bên trái và bên phải. F_{st} lực được nhận từ thiết bị khởi động.

4.3.2. Mô hình áp suất trong xy lanh sau thời điểm đánh lửa

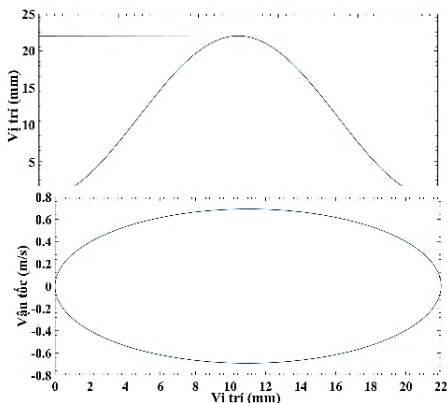
Sự thay đổi áp suất trong xy lanh do quá trình đốt cháy của FPLe có thể thu được với dạng đạo hàm của phương trình nhiệt động lực học thứ nhất. Lưu đồ mô phỏng và mô hình mô phỏng Matlab Simulink thể hiện ở Hình 4.2.



Hình 4.2: Lưu đồ mô phỏng áp suất trong xy lanh sau thời điểm đánh lửa

4.4. Kết quả mô phỏng

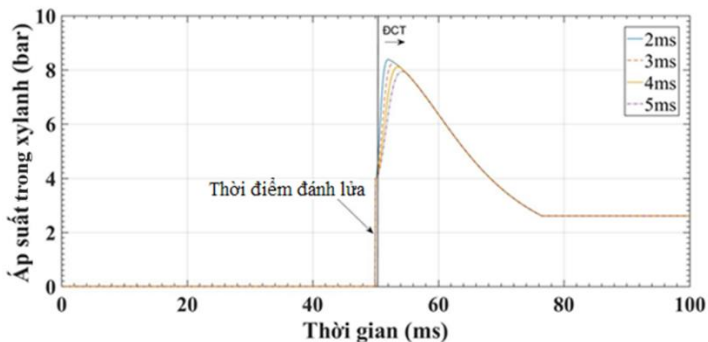
Sau khi tia lửa xuất hiện động cơ ngắt ly hợp từ ngay lập tức. Trong giai đoạn này piston vẫn tiếp tục dịch chuyển do lực quán tính nhưng không đáng kể do không còn động lực từ cơ cấu khởi động và piston đang chịu phản lực từ áp suất nén. Do đó, thời điểm đánh lửa được xem là 22mm ứng với thời gian dịch chuyển của piston hơn 50 ms thể hiện Hình 4.3. Tốc độ khởi động 10 Hz khoảng 0,7m/s thể hiện Hình 4.4.



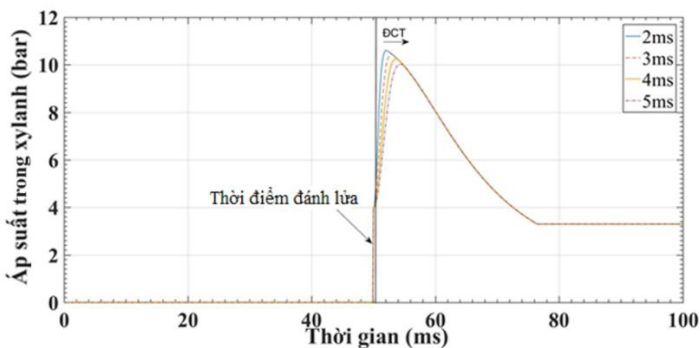
Hình 4.3: Đồ thị thời gian chuyển động của piston

Hình 4.4: Đồ thị vận tốc và vị trí của piston trong một chu kỳ ứng với vị trí dịch chuyển ở quá trình hoạt động

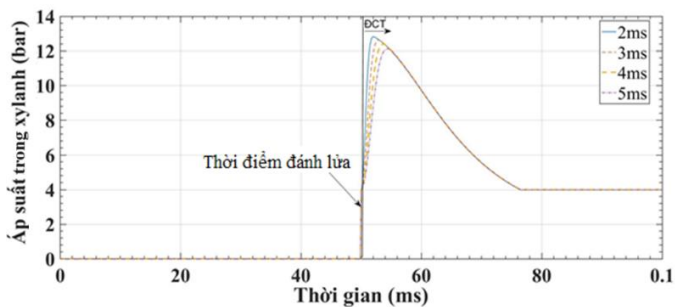
Áp suất sau khi đánh lửa thể hiện ở Hình 4.5, Hình 4.6 và Hình 4.7 áp suất cháy đạt được từ 8 bar đến 12 bar tùy thuộc vào thời gian cháy và lượng nhiên liệu phun. Thời gian cháy là một biến phức tạp nên được mô phỏng từ 2 ms đến 5 ms với thời điểm đánh lửa cố định và nhiên liệu đầu vào 2 mg, 3 mg và 4 mg trên mỗi chu kỳ, áp suất cực đại từ 8 bar đến 12 bar. Điểm chết trên phụ thuộc vào lực quán tính khi tách ly hợp từ, chỉ cần áp suất cháy lớn lực quán tính lập tức piston đổi chiều. Trong giai đoạn này piston đổi chiều trước khi áp suất đạt cực đại, điều này sẽ được chứng minh ở Chương 5 nghiên cứu thực nghiệm.



Hình 4.5: Áp suất xy lanh với lượng phun nhiên liệu 2mg và thời gian cháy 2ms-5ms



Hình 4.6: Áp suất xy lanh với lượng phun nhiên liệu 3mg và thời gian cháy 2ms-5ms



Hình 4.7: Hình Áp suất xy lanh với lượ ng phun nhiên liệu 4mg và thời gian cháy 2ms-5ms

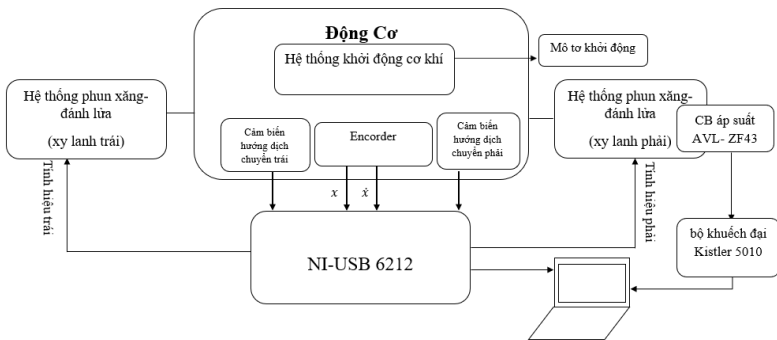
Chương 5. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

5.1. Mục đích và phạm vi thực nghiệm

Thực nghiệm nghiên cứu khảo sát các thông số ở hai quá trình quá trình hoạt động và quá trình hoạt động. Ở quá trình khởi động, lần đánh lửa đầu tiên sau khi tách ly hợp là giai đoạn quyết định, trong giai đoạn này cần có sự chính xác vì nếu ly hợp không tách hoàn toàn piston không thể đổi chiều. Bên cạnh đó áp suất sau khi đánh lửa phải lớn hơn lực quá tính từ mô tơ khởi động. Ở quá trình hoạt động, vận tốc động cơ tăng cao và do không có điểm đổi chiều cố định nên quá trình hoạt động không ổn định. Vì vậy, thực nghiệm tập trung đánh giá giai đoạn động cơ đánh lửa lần đầu tiên và đánh giá một số thông số khi động cơ hoạt động.

5.2. Bố trí mô hình thực nghiệm

Khi động cơ hoạt động hệ thống thu thập dữ liệu của FPE được phát triển trong phần mềm LabView. Cảm biến áp suất được sử dụng để thu thập áp suất cháy trong xy lanh AVL-ZF43 với amplifier Kistler 5010, thu thập dữ liệu bởi PicoScope 4425. Một encoder 200 μm được tích hợp để cung cấp dữ liệu về độ dịch chuyển và vận tốc của động cơ. Các tính hiệu điều khiển và thu thập dữ liệu từ cảm biến thông qua NI-USB 6212.



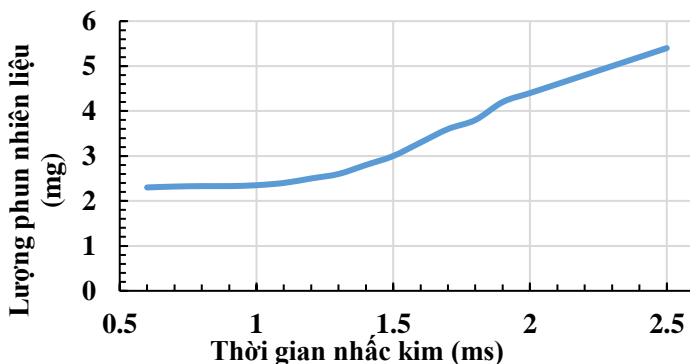
Hình 5.1: Sơ đồ bố trí thí nghiệm

5.3. Xác định lượng phun nhiên liệu

5.3.1. Thực nghiệm phun nhiên liệu qua kim phun

Điều khiển và thu thập dữ liệu qua NI-USB 6212 và cân đo tiêu ly có độ nhỏ nhất 0,001g. Khi tính hiệu từ bộ điều khiển đến bộ chấp hành (kim phun) phải có thời gian đáp ứng nên thời gian nhắc kim từ bộ điều khiển và thời gian nhắc kim thực tế khác nhau. Vì vậy, cần thực nghiệm để có thông số lượng phun thực tế ứng so với thời gian nhắc kim.

Kết quả đo được lượng nhiên liệu phun được trong thời gian 5s, với 480 lần phun, ở thời gian 0,6 ms cho một lần phun là 1,143 g nhiên liệu, như vậy một lần kim phun nhắc lên sẽ phun được là 2,3 mg nhiên liệu. Tiến hành thực nghiệm thay đổi thời gian phun để thu thập lấy kết quả so sánh, Hình 5.2.



Hình 5.2: Đồ thị khối lượng nhiên liệu cho một lần phun

5.3.2. Tính toán tỷ lệ A/F

Trong động cơ đánh lửa cưỡng bức hai kỳ, hỗn hợp trong xi-lanh bị giữ lại trước khi quá trình cháy diễn ra sẽ quyết định sự áp suất cháy trong xy lanh. Hỗn hợp gồm hai thành phần là không khí và nhiên liệu với một tỷ lệ nhất định hay tỷ lệ nhiên liệu trên không khí AFR (air-fuel ratio). Trong mô hình này AFR trong quá trình khởi động được xác định bằng cách sử dụng phương trình khí lý tưởng để tính toán lượng khối lượng không khí được chứa trong buồng cháy và lượng nhiên liệu đã được xác định qua thực nghiệm.

Phương trình trạng thái khí lý tưởng được viết như sau:

$$pV=(m/M)RT \quad (5.1)$$

Tỷ lệ AFR được tính như sau:

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{0,0376}{0,003} = 12,5 \quad (5.2)$$

m_a : Khối lượng không khí (g)

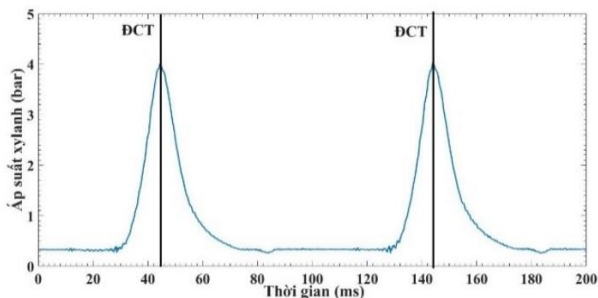
m_f : Khối lượng nhiên liệu (g)

Như vậy, tỷ lệ không khí trên nhiên liệu trong quá trình khởi động 12,5. Trong quá trình động cơ hoạt động tỷ lệ này luôn thay đổi do lượng nhiên liệu phun nhiên liệu phun thay đổi và lượng không khí nạp luôn thay đổi do hành trình piston không ổn định. Vì thế, tính toán AFR trong quá trình động cơ hoạt động rất phức tạp nên trong giai đoạn hoạt động, các thay đổi thông số của động cơ sẽ dựa trên khối lượng phun nhiên liệu.

5.4. Kết quả thực nghiệm

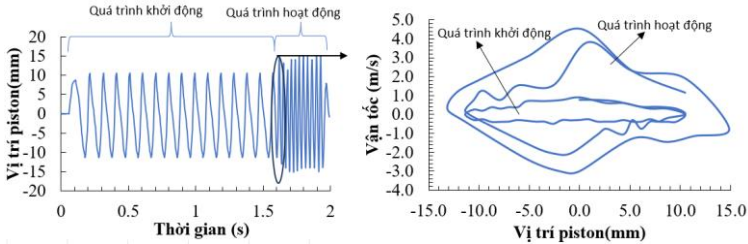
5.4.1. Kết quả thực nghiệm khi động cơ ở chế độ khởi động

Khi bắt đầu khởi động tín hiệu sẽ được chuyển đến bộ điều khiển, Piston được dẫn động đến vị trí dịch chuyển cao nhất không đổi là 22 mm, tần số cố định 10 Hz. Áp suất nén ban đầu 4 bar với áp suất này động cơ đủ khả năng đánh lửa thành công. Thể hiện ở Hình 5.3.



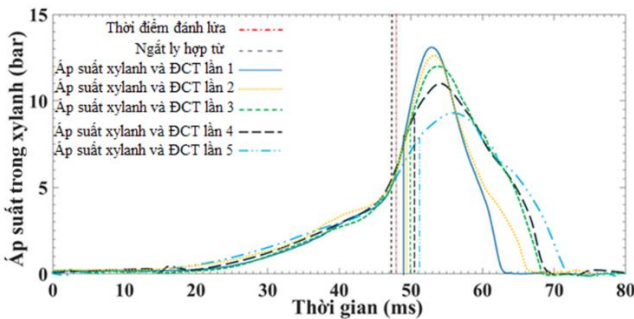
Hình 5.3: Áp suất khởi động

Chuyển tiếp giữa hai quá trình khởi động và quá trình hoạt động thể hiện ở Hình 5.4. Trong 1,4s đầu vị trí dịch chuyển tuyến tính của piston 22mm do cơ cấu khởi động cơ khí đang hoạt động nên vị trí dịch chuyển của piston tương đối ổn định. Trong hơn 0,5s còn lại động cơ chuyển sang chế độ hoạt động tự do, giai đoạn này vị trí piston không ổn định, vị trí cao nhất của piston 30mm. Tốc độ cao nhất của động cơ thay đổi giữa hai giai đoạn từ 0,7 m/s lên 5 m/s.



Hình 5.4: Quá trình chuyển giao chế độ khởi động và hoạt động

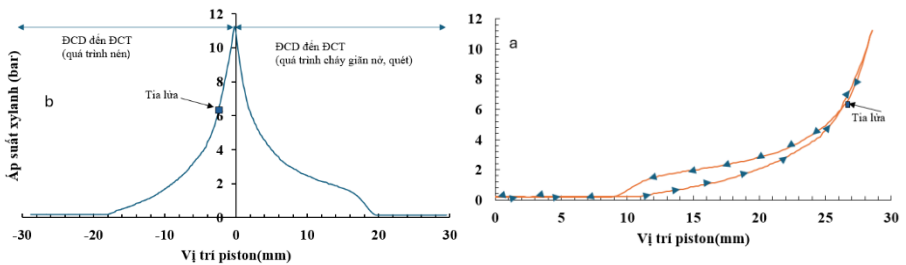
Áp suất trong xy lanh ở chu kỳ đầu tiên dao động từ 8 bar đến 14 bar với khối lượng nhiên liệu phun là 3 mg mỗi lần phun và tỷ lệ nhiên liệu trên không khí (A/F) là 12,5, như thể hiện trong Hình 5.5. Thời gian dịch chuyển của piston đến điểm chết trên (ĐCT) khoảng 50ms. Sau khi đánh lửa, áp suất cháy tăng, làm giảm thời gian dịch chuyển còn 10ms đến 20ms, tức là tốc độ dịch chuyển của piston tăng lên. Thời gian từ lúc xuất hiện tia lửa đến khi đạt áp suất cực đại khoảng 8ms đến 10ms. Tuy nhiên, áp suất và thời gian dịch chuyển không ổn định trong các lần thực nghiệm khác nhau.



Hình 5.5: Áp suất xy lanh sau khi đánh lửa ở 5 lần đánh lửa đầu tiên

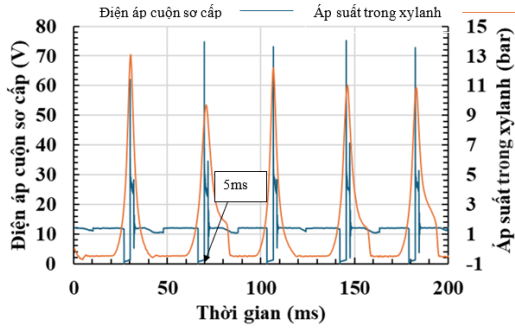
5.4.2. Kết quả thực nghiệm khí động cơ ở chế độ hoạt động

Khác với động cơ truyền thống, việc loại bỏ cơ cấu trục khuỷu-thanh truyền làm cho FPE không có khoảng dịch chuyển cố định mà phụ thuộc vào lực khí thể ở hai phía xy lanh. Hình 5.6 cho thấy áp suất xy lanh và vị trí dịch chuyển của piston, áp suất quá trình cháy giãn nở khoảng 12 bar. Áp suất cực đại hình tại điểm đổi chiều, do piston chuyển động theo chiều ngược lại dựa vào lực khí thể, tức là khi lực khí thể sinh ra đủ lớn để thắng lực quán tính từ phía đối diện.



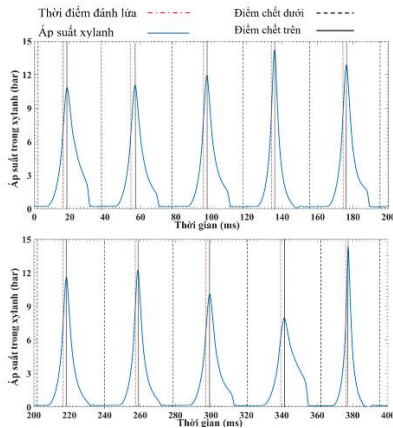
Hình 5.6 (a,b): Áp suất trong xy-lanh và vị trí dịch của piston

Thời gian từ thời điểm đánh lửa đến hình thành áp suất cực đại là không ổn định, dao động từ 1 ms đến 2 ms. Tại thời điểm đánh lửa áp suất nén dao động từ 6 bar đến 8 bar, do chế độ hoạt động tốc độ piston tăng rất nhanh nhưng thời gian tích trữ năng lượng không thay đổi nên vẫn diễn ra đến khi xuất hiện tia lửa, ngoài ra áp suất tăng do một phần khí sót trong quá trình cháy giãn nở ở chu kỳ trước. Thời gian tích trữ năng lượng không thay đổi 5ms nếu tốc độ piston càng nhanh thời điểm xuất hiện tia lửa càng trễ và ngược lại, dẫn đến thời điểm xuất hiện tia lửa và áp suất cực đại ở mỗi chu kỳ là khác nhau, như vậy khoảng dịch chuyển là khác nhau tại mỗi chu kỳ, Hình 5.7.



Hình 5.7: Điện áp cuộn thứ cấp và áp suất xy lanh

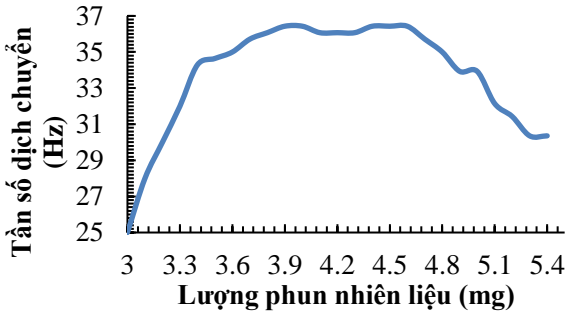
Thời điểm phun, thời điểm đánh lửa, điểm thay đổi chiều chuyển động (ĐCT, ĐCD) và áp suất quá trình cháy trong cylinder, thể hiện Hình 5.8. Áp suất cực đại dao động từ 10 bar tới 15 bar trong 10 chu kỳ liên tiếp, tần số dao động tuyến tính của piston khoảng 25 Hz.



Hình 5.8: Áp suất trong xy lanh trong 10 chu kỳ liên tục

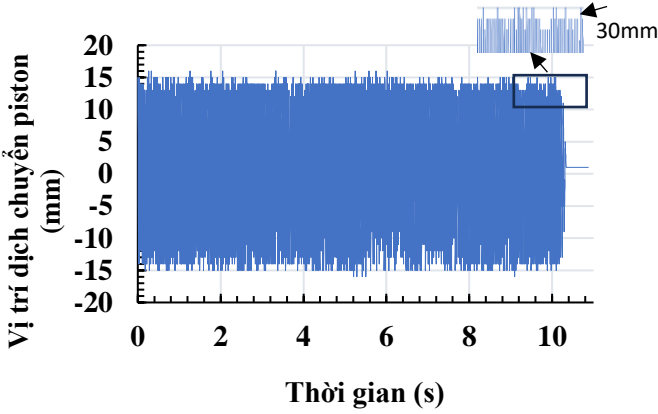
Lượng nhiên liệu được thay đổi để điều tra khả năng khởi động và tốc độ tối đa có thể đạt được thể hiện ở Hình 5.9. Tốc độ hoạt động tối đa của động cơ có thể đạt được 35 Hz với khối lượng nhiên liệu trên một lần phun từ 4 mg đến 4,5 mg và thấp nhất 25 Hz với lượng phun 3mg. Với lượng nhiên liệu phun thấp dưới 3mg động cơ áp suất cháy vẫn hình thành nhưng áp suất quá nhỏ vì thế không đủ lực để piston đến vị trí đánh lửa của bên xy lanh còn lại. Ngược

lại, khi lượng phun nhiên liệu lớn hơn 5 mg dẫn đến áp suất sinh ra quá lớn làm cho lực khí thể ở xy lanh đối diện không thắng được lực quá tính của piston. Khối lượng nhiên liệu trên một lần phun từ 3 mg đến 5,4 mg tốc độ có tăng nhưng không đáng kể



Hình 5.9: Khối lượng phun nhiên liệu và tần số ở chế độ hoạt động

Động cơ hiện nay chưa hoàn thiện về hệ thống bôi trơn, làm mát. Vì vậy, để tránh hư hỏng thời gian thực nghiệm động cơ ở chế độ hoạt động trong khoản thời gian 10s, thể hiện Hình 3.10. Hành trình tối đa của piston lên đến 30 mm, vị trí này được giới hạn bởi cấu giới hạn hành trình, khoảng dịch chuyển của piston phần lớn từ 26 mm - 29 mm.



Hình 5.2: Quá trình hoạt động trong 10s của mô hình FPE

5.5. So sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Bảng 5.1: So sánh giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng

	Kết quả thực nghiệm	Kết quả mô phỏng	Sai số giới hạn
Tốc độ khởi động	0,8 m/s	0,7 m/s	3 %
Áp suất cực đại	9 bar – 12 bar	8,5 bar – 12 bar	0 % – 5 %
Lượng phun nhiên liệu	2,98 mg	3 mg	0,6 %
Thời điểm đánh lửa	48 ms	50 ms	4 %
Thời điểm piston đổi chiều	48 – 53 ms	51 ms – 53 ms	0 % – 3 %

Chương 6. KẾT LUẬN

L luận án này đề xuất mô hình FPE kép hai kỳ sử dụng nhiên liệu xăng và đánh lửa cưỡng bức. Thay vì dùng motor điện tuyến tính như các nghiên cứu trước, mô hình này sử dụng cơ cấu cơ khí tự phát triển để khởi động. Kết quả mô phỏng cho thấy với tỷ số nén khởi động 3,33, FPE có thể đánh lửa với áp suất từ 9 bar đến 11 bar trong 5-10 ms. Thực nghiệm chiến lược khởi động dao động cơ học với lực motor cố định 400 N trong 1,4 giây, tốc độ piston 0,7 m/s đạt tỷ lệ nén mong muốn và áp suất khởi động 4 bar với áp suất cháy cực đại 15 bar. Trong hoạt động, piston chạy với tốc độ 5 m/s nhưng khoảng dịch chuyển không ổn định do khó kiểm soát áp suất giữa hai bên xy lanh. Tần số hoạt động từ 25 Hz đến 35 Hz khi thay đổi lượng nhiên liệu phun từ 3 mg đến 5,4 mg.