

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

BÙI QUỐC DUY

**THIẾT KẾ, MÔ HÌNH HÓA VÀ ĐIỀU KHIỂN
HỆ THỐNG GIẢM CHẤN CHO MÁY GIẶT CỬA TRƯỚC
SỬ DỤNG VẬT LIỆU THÔNG MINH**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật
Mã số chuyên ngành: 9520101

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2022

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

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Nguyễn Quốc Hưng

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Mai Đức Đài

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 học
tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày tháng năm

TÓM TẮT

Luận án nghiên cứu và phát triển hệ thống giảm chấn bán chủ động sử dụng vật liệu thông minh (hợp kim nhớ hình và lưu chất từ biến) để có thể hạn chế tốt rung động của máy giặt cửa trước. Nhờ khả năng điều chỉnh linh hoạt đặc tính hoạt động theo kích thích ngoài, hiệu quả và độ tin cậy của hệ thống giảm chấn vật liệu thông minh được cải thiện đáng kể. Hướng nghiên cứu của luận án bao gồm các nội dung chính sau:

- Nghiên cứu một giảm chấn mới dùng hợp kim nhớ hình (SMA): thiết kế và mô hình hóa hiện tượng trễ phi tuyến của giảm chấn.
- Nghiên cứu một giảm chấn mới dùng lưu chất từ biến (MRF): thiết kế, nhận dạng hiện tượng trễ và xây dựng một mô hình động lực học tham số mới dự đoán ứng xử của giảm chấn.
- Thiết kế hệ thống điều khiển bán chủ động cho giảm chấn.
- Phát triển hai giảm chấn MRF tự đáp ứng với kích thích ngoài: giảm chấn MRF tự cấp năng lượng và tự kích hoạt bằng hành trình.
- Đánh giá thực nghiệm các giảm chấn trên máy giặt cửa trước mẫu.

Sự đóng góp sáng tạo của đề tài nghiên cứu gồm có:

1. Các giảm chấn mới kiểu trượt sử dụng vật liệu thông minh SMA và MRF;
2. Mô hình động lực học tham số mới có thể dự đoán chính xác hiện tượng trễ phi tuyến của các giảm chấn;
3. Hệ thống điều khiển giảm chấn với kết cấu đơn giản và chi phí thấp;
4. Giảm chấn MRF tự cấp năng lượng có khả năng tự đáp ứng với kích thích ngoài để điều chỉnh mức giảm chấn hợp lý mà không cần bất kỳ sự điều khiển nào;
5. Sự phát triển của một giảm chấn MRF tự đáp ứng mới với khả năng kích hoạt bằng hành trình, có chi phí thấp và sở hữu đặc tính giảm chấn phụ thuộc chuyển vị rất phù hợp với điều kiện vận hành của máy giặt.

Trước tiên, luận án trình bày tổng quan về hệ thống treo của máy giặt cửa trước và các loại giảm chấn vật liệu thông minh. Dựa trên mô hình giả tĩnh và phương

trình động lực học của khối lồng giặt, các giảm chấn vật liệu thông minh được mô hình hóa. Vật liệu thông minh thứ nhất được nghiên cứu là SMA. Giảm chấn SMA được thiết kế, chế tạo mẫu và thử nghiệm trên một hệ thống kiểm tra đặc tính. Ba mô hình, gồm mô hình Bingham, Bouc–Wen và mô hình đề xuất trong công bố khoa học [3] của tác giả được sử dụng để dự đoán ứng xử trễ phi tuyến của giảm chấn.

MRF là vật liệu thông minh thứ hai được nghiên cứu trong luận án. Để đạt được hiệu năng tốt nhất, thiết kế của giảm chấn MRF được tối ưu hóa xét đến các yếu tố như lực giảm chấn kích hoạt, lực không tải, kích cỡ, không gian lắp đặt và chi phí. Từ lời giải tối ưu, giảm chấn MRF được thiết kế, chế tạo mẫu và thí nghiệm. Một mô hình động lực học mới được xây dựng để dự đoán hiện tượng trễ của giảm chấn. Mô hình được so sánh với mô hình Spencer phổ biến và mô hình Pan gốc. Sau đó, một hệ thống điều khiển bán chủ động đơn giản và chi phí thấp cho máy giặt lắp giảm chấn MRF được thiết kế, mô phỏng và đánh giá.

Từ quan điểm đơn giản hóa kết cấu và giảm chi phí, hai loại giảm chấn MRF tự đáp ứng được phát triển trong phần kế tiếp của luận án. Các giảm chấn này có khả năng tự điều chỉnh lực giảm chấn theo kích thích ngoài để dập tắt rung động mà không cần bất kỳ sự điều khiển nào. Loại đầu tiên là giảm chấn MRF tự cấp năng lượng, xuất phát từ ý tưởng chuyển hóa dao động bị lãng phí của hệ thống thành năng lượng điện tự cấp cho giảm chấn. Loại thứ hai là giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình sở hữu đặc tính giảm chấn phụ thuộc chuyển vị. Cả hai loại giảm chấn đều được tối ưu hóa để đạt hiệu quả tốt nhất. Mẫu thử của cả hai cũng được chế tạo và kiểm tra trên hệ thống thí nghiệm.

Tất cả các giảm chấn được lắp đặt và thử nghiệm trên máy giặt cửa trước mẫu để đánh giá hiệu quả hoạt động. Kết quả thực nghiệm cho thấy rung động của máy giặt lắp giảm chấn vật liệu thông minh được giảm đáng kể so với giảm chấn bị động thương mại, qua đó chứng minh tính khả thi của các giảm chấn đề xuất.

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Rung động của máy giặt luôn là thách thức lớn với các nhà khoa học. Đặc biệt trong máy giặt cửa trước, rung động càng khó kiểm soát do tác dụng trọng lực của khối quần áo giặt mất cân bằng. Các giảm chấn bị động đang dùng trong máy giặt có thể hạn chế được cộng hưởng của máy giặt ở tần số thấp, nhưng lại gây ra sự truyền dẫn lực từ trống giặt sang khung máy ở tần số cao do không thể thay đổi được hệ số giảm chấn. Vì thế, để hạn chế hiệu quả rung động của máy giặt trong suốt quá trình hoạt động, cần phát triển một hệ thống giảm chấn với hệ số giảm chấn có thể kiểm soát được. Cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, các vật liệu thông minh đã ra đời. Vật liệu thông minh cho phép hiệu chỉnh linh hoạt đặc tính của thiết bị sử dụng và là chìa khóa cho hệ thống giảm chấn bán chủ động nêu trên.

2. Mục đích nghiên cứu

Phát triển hệ thống giảm chấn sử dụng vật liệu thông minh có thể kiểm soát hiệu quả rung động của máy giặt cửa trước trong suốt quá trình hoạt động.


3. Nhiệm vụ nghiên cứu

Nhiệm vụ nghiên cứu: thiết kế hệ thống giảm chấn sử dụng vật liệu thông minh, xây dựng mô hình ứng xử, thiết kế hệ thống điều khiển, phát triển hệ thống giảm chấn tự đáp ứng, thử nghiệm trên máy giặt mẫu và so sánh hiệu quả giảm rung động với giảm chấn bị động.


4. Phạm vi nghiên cứu

Hệ thống giảm chấn cho máy giặt cửa trước, hai vật liệu thông minh là SMA và MRF, mô hình giả tĩnh cho thiết kế và mô hình động lực học tham số cho ứng xử của giảm chấn ở trạng thái ổn định, điều khiển thông qua giao tiếp máy tính.

5. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

 *Hướng tiếp cận:*

- Trước tiên phân tích sự ứng dụng của SMA và MRF vào hệ thống giảm chấn, từ đó tìm ra các ưu điểm, khuyết điểm và đề xuất khả năng cải tiến để phù hợp hơn cho việc áp dụng giải quyết vấn đề rung động của máy giặt cửa trước.
- Từ việc xây dựng mô hình toán học, bài toán thiết kế được phân tích, mô phỏng số và tối ưu hóa. Kết quả được kiểm chứng bằng các thực nghiệm.
- So sánh với hệ thống giảm chấn bị động thương mại đang được lắp trong máy giặt và đánh giá kết quả đạt được.

 *Các phương pháp nghiên cứu được sử dụng:*

Phương pháp kế thừa và tham kiến chuyên gia, phương pháp phân tích, phân biện, phương pháp mô hình hóa dùng giải tích và tính toán số, phương pháp thống kê kinh nghiệm, thử sai, phương pháp thực nghiệm.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

 *Ý nghĩa khoa học:*

- SMA và MRF góp phần giải quyết bài toán rung động của máy giặt cửa trước.
- Đóng góp mô hình trễ với độ chính xác cao cho các bài toán điều khiển.
- Giảm chấn MRF tự cấp năng lượng, tự kích hoạt bằng hành trình tối ưu về kết cấu, chi phí và cung cấp khả năng vận hành hiệu quả cho máy giặt.
- Tính khả thi được kiểm chứng bằng các thực nghiệm trên máy giặt mẫu.

 *Ý nghĩa thực tiễn:*

- Mô hình trễ được đề xuất trong luận án có thể được áp dụng để điều khiển chính xác các cơ cấu phản hồi lực hay cánh tay máy robot.
- Các giảm chấn MRF tự đáp ứng với giá thành khá rẻ sẽ có nhiều khả năng được sử dụng trong thực tế, không chỉ cho máy giặt mà có thể cho xe máy, ô tô, càng đáp máy bay hay các công trình xây dựng.

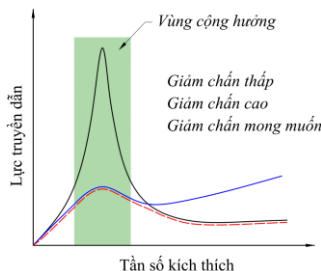
7. Cấu trúc của luận án

Mở đầu, Chương 1: Tổng quan, Chương 2: Cơ sở lý thuyết, Chương 3: Giảm chấn hợp kim nhớ hình, Chương 4: Giảm chấn lưu chất từ biến, Chương 5: Giảm chấn lưu chất từ biến tự đáp ứng, Chương 6: Kết luận và hướng phát triển, Tài liệu tham khảo, Danh mục các công trình đã công bố.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

1.1 Giới thiệu

Rung động của máy giặt luôn là thách thức lớn với các nhà khoa học. Máy giặt thường chịu cộng hưởng ở tần số khá thấp, khoảng 100 – 300 vòng/phút [1–3]. Khi tốc độ quay của trống giặt tăng cao, khoảng trên 900 vòng/phút, lực kích thích được truyền từ khối lồng giặt qua hệ thống giảm chấn sang nền nhà, gây ra rung động và tiếng ồn. Các giảm chấn bị



Hình 1.1: Sự truyền dẫn lực với các mức độ giảm chấn khác nhau.

động có thể giảm rung ở tần số thấp, nhưng lại làm tăng lực truyền dẫn ở tần số cao và gây ra tiếng ồn nhiều hơn. Vì thế, cần phát triển một hệ thống giảm chấn với hệ số giảm chấn có thể kiểm soát được (Hình 1.1). Trong luận án này, hai loại vật liệu thông minh là lưu chất từ biến (MRF) và hợp kim nhớ hình (SMA) sẽ được nghiên cứu ứng dụng vào giảm chấn để kiểm soát hiệu quả rung động.

1.2 Các công trình nghiên cứu khoa học

1.2.1 Các nghiên cứu về kiểm soát rung động của máy giặt

a) *Phương pháp thứ nhất: kiểm soát sự cân bằng thùng giặt.*

Bộ cân bằng động lực học [2, 3] có thể giảm đáng kể rung động. Tuy nhiên, kết cấu trống giặt phức tạp, chi phí sản xuất và bảo trì cao.

b) *Phương pháp thứ hai: giảm rung động nhờ vào hệ thống giảm chấn.*

Nhiều nghiên cứu về SMA đã được thực hiện [5, 6]. Đã có một số nghiên cứu về giảm chấn SMA [7, 8], nhưng hầu hết tập trung vào xây dựng với thiết kế phức tạp, kích cỡ lớn, lực tối đa và lực không tải khá lớn. Việc nghiên cứu và ứng dụng SMA vào hệ thống giảm chấn cho máy giặt chưa được thực hiện.

MRF đang được nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực [9, 10]. Giảm chấn ống xóp MRF [11] chứng tỏ khả năng giảm rung khá tốt, nhưng độ bền và độ mài mòn giảm dần là trở ngại đáng kể. Aydar [12], Nguyen [13] đã đề xuất giảm chấn

MRF kiểu dòng chảy, tuy nhiên lực không tải vẫn khá cao, kết cấu phức tạp, chi phí cao. Bởi vì lực giảm chấn cần thiết cho máy giặt không quá lớn, giảm chấn MRF kiểu trượt sẽ phù hợp hơn. Cha [14], Nguyen [15] đã nghiên cứu giảm chấn MRF kiểu trượt đảm bảo lực yêu cầu và kết cấu đơn giản, nhưng chưa thử nghiệm trên máy giặt để đánh giá hiệu quả. Như vậy, việc nghiên cứu giảm chấn MRF cho máy giặt vẫn còn hạn chế, chưa xây dựng hiệu quả mô hình ứng xử, và đặc biệt cần sự sáng tạo để thoát khỏi lối mòn vận hành phụ thuộc hệ thống điều khiển – trở ngại chính cho mục tiêu giảm chi phí, tăng khả năng thương mại.

1.2.2 Các nghiên cứu về mô hình của giảm chấn

a) *Nhóm thứ nhất: các mô hình giả tĩnh*

Mô hình Bingham [16, 17] và Herschel–Bulkley [18, 19] phù hợp thiết kế giảm chấn, nhưng không mô tả đầy đủ ứng xử phi tuyến dưới tác dụng của tải động.

b) *Nhóm thứ hai: các mô hình động lực học*

Mô hình động lực học phi tham số [20, 21] mô tả linh hoạt ứng xử trễ của giảm chấn, tuy nhiên khá phức tạp và không thể hiện được ý nghĩa tham số. Mô hình động lực học tham số [22–24] thích ứng và được quan tâm nhiều hơn nhờ ý nghĩa rõ ràng, nhưng cần giả thiết ban đầu và ràng buộc phù hợp để lời giải hội tụ. Mô hình Spencer [25] dựa trên mô hình Bouc–Wen được nghiên cứu khá rộng rãi bởi dự đoán tốt ứng xử giảm chấn MRF, tuy nhiên khó thiết lập và giải bài toán mô hình ngược, đồng thời không thể biểu diễn trọn vẹn ứng xử khi kích thích thay đổi liên tục. Vì vậy, cần phát triển mô hình trễ có độ chính xác để dự đoán tốt ứng xử giảm chấn trong trường hợp vận hành khắc nghiệt như máy giặt.

1.2.3 Các nghiên cứu về hệ thống điều khiển giảm chấn

Bộ điều khiển cổ điển [26, 27] thiếu ổn định dưới các nguồn nhiễu nhưng được ưa chuộng bởi đơn giản và chi phí tính toán thấp. Bộ điều khiển hiện đại [28, 29] khắc phục được nhược điểm này, tuy nhiên lại phức tạp và tốn kém. Có thể kết hợp các phương pháp điều khiển [30, 31] cho các hệ thống phức tạp. Nhằm mục tiêu thương mại, luận án cần nghiên cứu bộ điều khiển đơn giản và chi phí thấp cho máy giặt lắp giảm chấn vật liệu thông minh.

1.3 Tính cấp thiết của đề tài

Rung động của máy giặt thường gây ra tiếng ồn khiến người sử dụng khó chịu và giảm tuổi thọ máy. Đề tài nghiên cứu hệ thống giảm chấn dùng vật liệu thông minh để kiểm soát hiệu quả rung động của máy giặt trong suốt quá trình hoạt động, góp phần cải thiện chất lượng cuộc sống của người tiêu dùng.

1.4 Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học: Giải quyết vấn đề rung động của máy giặt. Đóng góp mô hình trễ với độ chính xác cao cho bài toán điều khiển. Giảm chấn tự đáp ứng tối ưu về kết cấu và chi phí. Tính khả thi được kiểm chứng bằng thực nghiệm.

Ý nghĩa thực tiễn: Mô hình trễ có thể áp dụng cho cơ cấu phản hồi lực hay cánh tay máy robot. Giảm chấn tự đáp ứng có nhiều khả năng ứng dụng thực tế.

1.5 Mục đích và đối tượng nghiên cứu

Mục đích nghiên cứu: Phát triển hệ thống giảm chấn dùng vật liệu thông minh có thể kiểm soát hiệu quả rung động của máy giặt cửa trước trong suốt quá trình.

Đối tượng nghiên cứu: hệ thống giảm chấn sử dụng vật liệu thông minh cho máy giặt cửa trước, mô hình ứng xử của giảm chấn dưới tác dụng của tải trọng động, hệ thống điều khiển giảm chấn, hệ thống giảm chấn tự đáp ứng.

1.6 Nhiệm vụ và phạm vi nghiên cứu

Nhiệm vụ nghiên cứu: thiết kế hệ thống giảm chấn sử dụng vật liệu thông minh, xây dựng mô hình ứng xử, thiết kế hệ thống điều khiển, phát triển hệ thống giảm chấn tự đáp ứng, thử nghiệm trên máy giặt mẫu và so sánh hiệu quả giảm rung động với giảm chấn bị động.

Phạm vi nghiên cứu: hệ thống giảm chấn cho máy giặt cửa trước, hai vật liệu thông minh là MRF và SMA, mô hình giả tĩnh cho thiết kế và mô hình động lực học tham số cho ứng xử của giảm chấn, điều khiển thông qua giao tiếp máy tính.

1.7 Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp kế thừa và tham kiến chuyên gia, phân tích, phản biện, mô hình hóa dùng giải tích và tính toán số, thống kê kinh nghiệm, thử sai, thực nghiệm.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Hợp kim nhớ hình (SMA)

2.1.1 Giới thiệu

SMA là một dạng vật liệu nhớ hình độc đáo với khả năng phục hồi lại hình dạng gốc khi tăng nhiệt độ, nhờ vậy tạo ra một năng lượng phát động lớn [32].

2.1.2 Hiệu quả nhớ hình (SME)

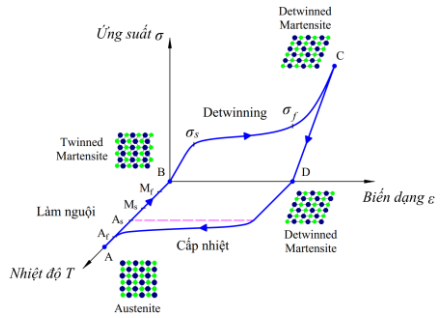
SMA biểu thị hiệu quả nhớ hình khi biến dạng ở trạng thái pha Twinned Martensite và sau đó dỡ tải ở nhiệt độ thấp hơn A_s . Khi được đốt nóng trên A_f , SMA sẽ phục hồi lại hình dạng gốc bằng cách chuyển ngược trở về pha gốc Austenite (Hình 2.4).

2.1.3 Đặc tính giả đàn hồi

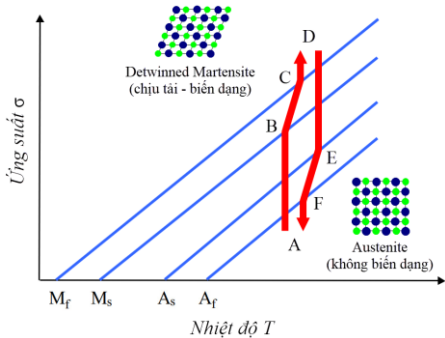
Ứng xử giả đàn hồi của SMA liên quan đến sự chuyển pha gây bởi ứng suất, dẫn đến sự hình thành biến dạng trong quá trình tải và sau đó khôi phục biến dạng khi dỡ tải ở nhiệt độ cao hơn A_f (Hình 2.5).

2.1.4 Ứng xử của bộ phát động lò xo SMA

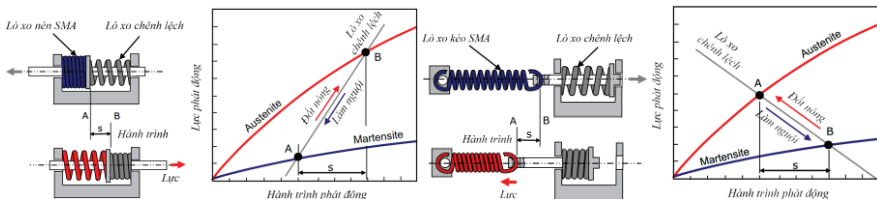
Ứng xử điển hình của lò xo nén và kéo SMA được mô tả trong Hình 2.7.



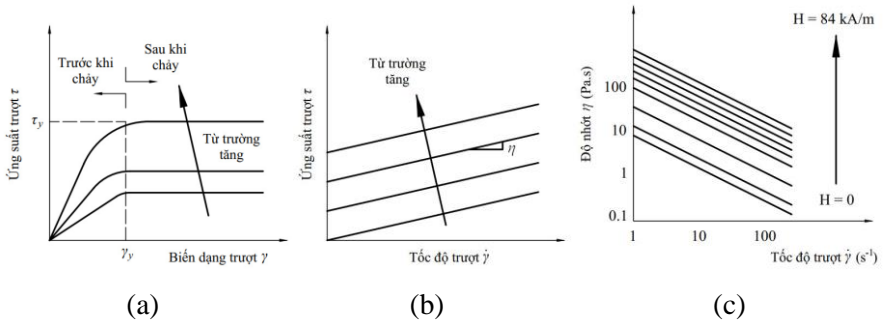
Hình 2.4: Dữ liệu ứng suất – biến dạng – nhiệt độ thể hiện hiệu quả nhớ hình của NiTi SMA [32].



Hình 2.5: Đường tải cơ nhiệt thể hiện đặc tính giả đàn hồi của SMA [32].



Hình 2.7: Ứng xử của lò xo phát động SMA.



Hình 2.10: Ứng xử liên tục của MRF dạng trượt [39]: (a) miền trước và sau khi cháy, (b) ứng xử phi Newton sau khi cháy, (c) độ nhớt biểu kiến.

2.2 Lưu chất từ biến (MRF)

2.2.1 Giới thiệu

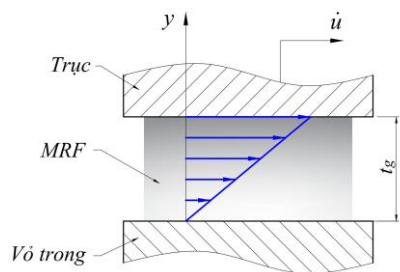
MRF là một dạng chất lỏng không dính chứa các phân tử sắt từ có đường kính khoảng $1 - 10 \mu\text{m}$ [33]. Khi chưa kích hoạt, các hạt chuyển động tự do và MRF biểu hiện thuộc tính Newton. Dưới tác dụng của từ trường, các hạt sắt từ sắp xếp dọc theo đường sức từ, độ nhớt biểu kiến tăng đến điểm tới hạn và MRF trở thành một chất rắn đàn nhớt. Thông thường, MRF có ba kiểu vận hành: kiểu dòng chảy, kiểu trượt và kiểu nén.

2.2.2 Đặc tính lưu biến của MRF

Ứng xử liên tục của MRF dạng trượt được thể hiện trong Hình 2.10. Hai mô hình thường được sử dụng để mô tả đặc tính của MRF là mô hình Bingham plastic [16] và mô hình Herchel–Bulkley [34]. Dựa trên hai mô hình này, Zubieta [35] đã đề xuất mô hình phụ thuộc từ trường.

2.2.3 Phân tích dòng chảy MRF trong khe hở và tính toán lực giảm chấn

Hình 2.13 mô tả đặc tính dòng chảy của MRF trong khe hở giữa trục và thành trong của vỏ giảm chấn. Lực giảm chấn được chia thành ba thành phần



Hình 2.13: Đặc tính dòng chảy của MRF trong khe hở.

$$F_d = F_\tau + F_\eta + F_f \quad (2.7)$$

trong đó F_τ là lực giảm chấn gây bởi ứng suất chảy, F_η là lực giảm chấn nhớt và F_f là lực ma sát

$$F_\tau = A_l \tau_{xy} \quad (2.8)$$

$$F_\eta = A_l \tau_{xy} = A_l \eta \frac{\dot{u}}{t_g} \quad (2.9)$$

với A_l là diện tích chịu lực, τ_{xy} là ứng suất chảy, τ_{xy} là ứng suất trượt nhớt và η là độ nhớt.

2.2.4 Tính toán từ trường cho các thiết bị MRF

a) Phương pháp giải tích

Mật độ từ thông trong vùng MRF kích hoạt [36]

$$B_{mr} = \frac{\mu_0 N_{turns} I}{l_{MR} / \mu_{MR} + 1 / \mu_d \sum_i l_i A_{MR} / A_i} \quad (2.15)$$

trong đó N_{turns} là số vòng quấn dây, l_{MR} và A_{MR} là chiều dài và tiết diện mặt cắt ngang, μ_0 , μ_{MR} và μ_d là độ từ thẩm của không khí, MRF và vật liệu thiết bị.

b) Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)

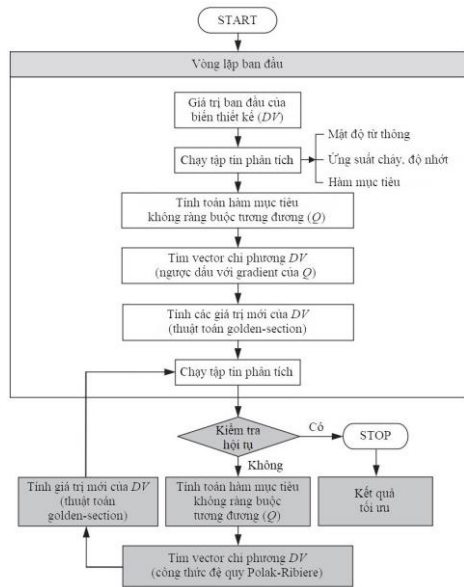
Mạch từ của giảm chấn MRF sẽ được giải bằng FEM tích hợp trong phần mềm ANSYS. Mật độ từ trung bình

$$B_m = \frac{1}{L_{on}} \int_0^{L_{on}} B_m(s) ds \quad (2.17)$$

với L_{on} là chiều dài khe hở MRF kích hoạt. Đặc tính lưu biến của MRF sau đó được tính toán và thông số đầu ra được xác định từ phương trình cơ bản.

2.2.5 Phương pháp tối ưu hóa thiết kế của giảm chấn MRF

Quá trình tối ưu hóa được mô tả trong Hình 2.15.



Hình 2.15: Lưu đồ tối ưu thiết kế của giảm chấn MRF.

2.3 Mô hình động lực học của máy giặt

Hình 2.16 biểu diễn sơ đồ 2D đơn giản để phân tích động lực học của máy giặt. Từ hình vẽ, phương trình dao động được thiết lập

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) \left[\sin^2(\varphi + \beta_2) + \sin^2(\varphi - \beta_1) \right]^{1/2} + ku(t) \left[\sin^2(\varphi + \alpha_1) + \sin^2(\varphi - \alpha_2) \right]^{1/2} = f_u(t) \quad (2.24)$$

trong đó $f_u(t)$ là lực kích thích gây ra chuyển vị

$u(t)$ theo phương u bất kỳ, m là khối lượng của khối lồng giặt, c là hệ số giảm chấn của mỗi giảm chấn và k là độ cứng của mỗi lò xo. Trong trường hợp tối ưu $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 45^\circ$, phương trình (2.24) được đơn giản hóa thành

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f_u(t) \quad (2.28)$$

2.4 Sự truyền lực từ khối lồng giặt sang thùng máy

Khả năng truyền lực của khối lồng giặt được xác định

$$T_f = D_m \sqrt{1 + (2\xi r_\omega)^2} \quad (2.37)$$

trong đó D_m là hệ số động, r_ω là tỉ lệ giữa tần số góc kích thích và tự nhiên, $r_\omega = \omega/\omega_n$. Tỉ số cản 0,7 được chọn để thiết kế trong nghiên cứu này.

2.5 Tính toán lực giảm chấn cần thiết cho máy giặt

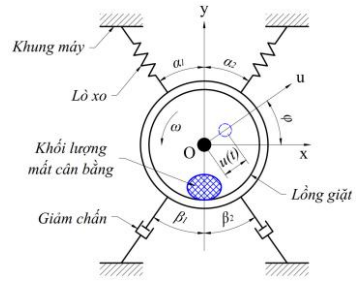
Lực giảm chấn cần thiết được tính

$$|F_r| = \frac{kX \pi \xi r_\omega}{2} \quad (2.42)$$

với X là biên độ dao động. Để đạt tỉ số cản $\xi = 0,7$ khi cộng hưởng $r_\omega = \sqrt{1 - \xi^2}$, lực giảm chấn cần thiết tương đương được tính toán từ phương trình (2.42) là 78,7 N. Do vậy, lực giảm chấn mục tiêu được thiết lập là 80 N.

2.6 Tổng kết

Trong chương này, cơ sở khoa học làm nền tảng để phát triển nội dung luận án ở các chương tiếp theo đã được trình bày. SMA và MRF đã được giới thiệu, nghiên cứu và mô hình động lực học của máy giặt cửa trước được phân tích.

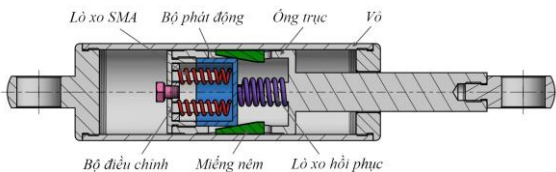


Hình 2.16: Mô hình 2D đơn giản của máy giặt cửa trước.

CHƯƠNG 3 GIẢM CHẤN HỢP KIM NHỚ HÌNH

3.1 Giới thiệu

Đề tài này đề xuất một giảm chấn mới. Bộ phát động lò xo SMA được khảo sát thực nghiệm, sau đó giảm chấn được thiết kế và thử nghiệm.



Hình 3.1: Thiết kế 2D của giảm chấn SMA.

3.2 Cấu hình và nguyên lý hoạt động giảm chấn SMA

Khi được cấp nhiệt, lò xo SMA giãn dài ra và đẩy bộ phát động trượt về phía phải ép bốn miếng nêm di chuyển ra phía ngoài tiếp xúc với mặt trong của vỏ hộp, sinh ra lực giảm chấn (Hình 3.1). Trong quá trình nguội đi, lò xo SMA co lại hình dạng gốc và lò xo hồi phục đẩy bộ phát động về vị trí ban đầu.

3.3 Mô hình hóa giảm chấn SMA

3.3.1 Đặc tính lò xo SMA

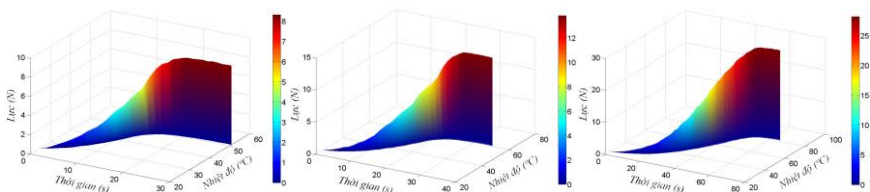
Ba mẫu lò xo SMA sản xuất bởi SAES® Getters Group được thử nghiệm. Kết quả được trình bày trong Hình 3.3.

3.3.2 Thiết kế giảm chấn SMA

Lực giảm chấn F_d được tính toán

$$F_d = \mu \left(F_{SMA} - k_{spr} \frac{\Delta_w}{\text{tg} \alpha} \right) \text{ctg} \alpha \quad (3.5)$$

trong đó F_{SMA} là lực phát động, μ là hệ số ma sát, k_{spr} là độ cứng của lò xo hồi phục, Δ_w là chuyển vị của các miếng nêm, α là góc côn của miếng nêm. Hai lò xo 2 được chọn cho thiết kế. Lực giảm chấn kích hoạt có thể đạt đến 80,8 N.



Hình 3.3: Ứng xử thực nghiệm ba mẫu lò xo SMA.

3.4 Đánh giá thực nghiệm giảm chấn SMA

Hình 3.7 biểu thị ứng xử thực nghiệm của giảm chấn mẫu SMA ở tần số 2 Hz. Kết quả khá phù hợp với lý thuyết. Ứng xử lực – chuyển vị trong hình cho thấy hiện tượng trễ của giảm chấn SMA, đặc biệt ở cuối hành trình.

3.5 Mô hình trễ phi tuyến của giảm chấn SMA

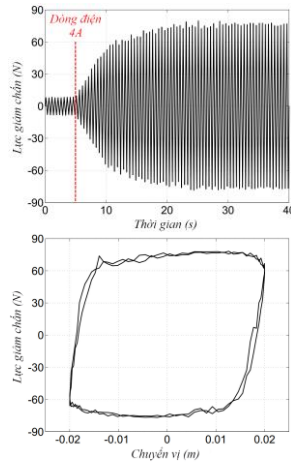
Ba mô hình trễ gồm Bingham [22], Bouc–Wen [23, 24] và mô hình đề xuất [37] được sử dụng để dự đoán hiện tượng trễ của giảm chấn SMA. Hình 3.10 cho thấy ba mô hình đều dự đoán tốt, nhưng mô hình Bouc–Wen và mô hình đề xuất có độ chính xác cao hơn mô hình Bingham.

3.6 Thử nghiệm trên máy giặt cửa trước

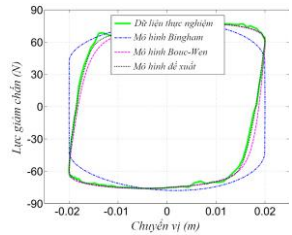
Kết quả thực nghiệm được biểu thị trong Hình 3.14 cho thấy tính khả thi của giảm chấn SMA. Tuy nhiên thời gian chuyển đổi trạng thái khá lớn (khoảng 25 giây) khiến cho giảm chấn bước đầu chỉ phù hợp để điều khiển on–off.

3.7 Tổng kết

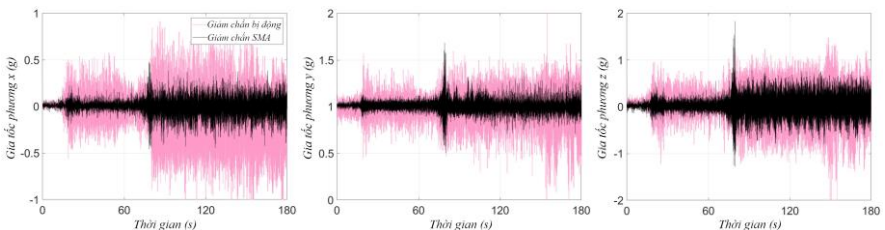
Trong chương này, giảm chấn SMA đã được phát triển cho máy giặt cửa trước. Ba mô hình được sử dụng để dự đoán ứng xử giảm chấn. Kết quả nghiên cứu đã được tác giả công bố trên 2 tạp chí Scopus [38, 39].



Hình 3.7: Ứng xử thực nghiệm của giảm chấn SMA ở tần số 2 Hz.



Hình 3.10: So sánh ứng xử của ba mô hình.



Hình 3.14: Ứng xử thực nghiệm của máy giặt lắp giảm chấn SMA.

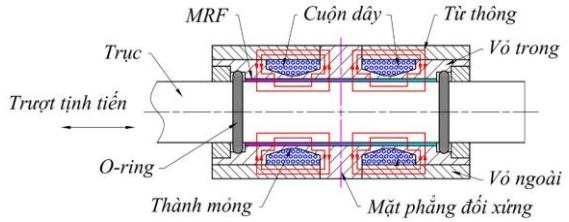
CHƯƠNG 4 GIẢM CHẤN LƯU CHẤT TỪ BIẾN

4.1 Giới thiệu

Đề tài tập trung vào phát triển một loại giảm chấn MRF kiểu mới với thiết kế tối ưu đảm bảo các yêu cầu về lực giảm chấn, không gian lắp đặt trong máy giặt và kết cấu đơn giản nhằm giảm thiểu chi phí sản xuất. Mô hình ứng xử của giảm chấn sẽ được phân tích và một bộ điều khiển hệ thống bán chủ động được thiết kế. Thực nghiệm trên máy giặt mẫu cũng được tiến hành để đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống.

4.2 Cấu hình và nguyên lý hoạt động giảm chấn MRF

Hình 4.1 biểu diễn cấu hình 2D của giảm chấn MRF kiểu trượt. Trong thiết kế này, hai cuộn dây được quấn trực tiếp trên các rãnh của vỏ trong. MRF được đổ đầy vào khe hở giữa trục và thành trong. Tiết diện mặt cắt ngang của phần thành mỏng giữa rãnh quấn dây và khe hở MRF được thiết kế đủ nhỏ sao cho từ thông đi qua nó nhanh chóng bão hòa và do vậy buộc phải đi xuyên qua khe hở MRF. Các cạnh vát được thêm vào mặt cắt ngang rãnh quấn dây để tối đa chiều dài hiệu quả khe hở MRF. Dưới tác dụng của từ trường ngoài, MRF hóa rắn ngăn cản chuyển động tương đối giữa trục và vỏ, sinh ra lực giảm chấn.



Hình 4.1: Thiết kế 2D của giảm chấn MRF kiểu trượt.

Các cạnh vát được thêm vào mặt cắt ngang rãnh quấn dây để tối đa chiều dài hiệu quả khe hở MRF. Dưới tác dụng của từ trường ngoài, MRF hóa rắn ngăn cản chuyển động tương đối giữa trục và vỏ, sinh ra lực giảm chấn.

4.3 Mô hình hóa giảm chấn MRF

Lực giảm chấn F_d và lực không tải F_0 lần lượt được xác định

$$F_d = A_{l,on} \left(\tau_y + \eta \frac{\dot{u}}{t_g} \right) + A_{l,off} \left(\tau_{y0} + \eta_0 \frac{\dot{u}}{t_g} \right) + 2F_{or} \quad (4.1)$$

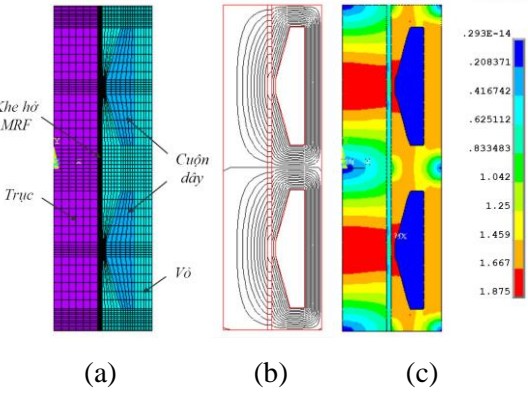
$$F_0 = A_l \left(\tau_{y0} + \eta_0 \frac{\dot{u}}{t_g} \right) + 2F_{or} \quad (4.2)$$

trong đó τ_y và η là ứng suất chảy và độ nhớt của MRF, ký hiệu 0 dưới dòng tương ứng với trạng thái không kích hoạt, u là vận tốc tương đối giữa trục và vỏ, t_g là bề dày khe hở MRF, A_l là diện tích của toàn bộ phần trục tiếp xúc với MRF trong khe hở, $A_{l,on}$ và $A_{l,off}$ lần lượt là diện tích của phần trục tiếp xúc với MRF kích hoạt và không kích hoạt, F_{or} là lực ma sát Coulomb giữa trục và O-ring, được tính toán bởi [40]. Lưu chất MR 132–DG sản xuất bởi Lord Corporation được sử dụng cho thiết kế. Dựa trên mô hình Bingham, thuộc tính lưu biến của MRF phụ thuộc vào từ trường ngoài và được ước lượng bởi [35].

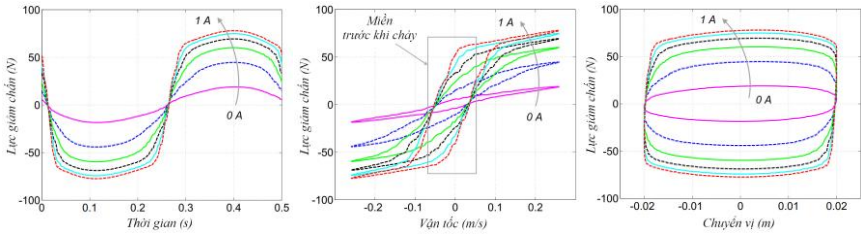
Bảng 4.1: Các thông số tối ưu của giảm chấn MRF.

Thông số thiết kế			
Chiều cao rãnh h_c (mm)	5,11	Bề dày thành mỏng t_w (mm)	0,8
Chiều rộng rãnh w_c (mm)	22,16	Bề dày vỏ trượt t_o (mm)	3
Chiều cao vát h_{ch} (mm)	2,58	Bán kính trục r_s (mm)	8,25
Chiều rộng vát w_{ch} (mm)	9,77	Bán kính ngoài R (mm)	17,96
Chiều dài cực từ l_p (mm)	4,23	Cường độ dòng điện I (A)	1
Chiều dài khe MRF L (mm)	61,24	Lực giảm chấn cực đại F_d (N)	80
Bề dày khe MRF t_g (mm)	0,8	Lực ma sát không tải F_0 (N)	18,4

Bài toán tối ưu: *Tìm các giá trị kích thước hình học cơ bản của giảm chấn MRF để tối thiểu hóa lực ma sát không tải F_0 , với các ràng buộc lực giảm chấn cực đại $F_d > 80$ N, chiều dài của khe hở MRF $L < 80$ mm, bán kính ngoài của giảm chấn $R < 20$ mm và chiều cao của rãnh quán dây $h_c > 4,65$ mm. Mô hình phân tích phần tử hữu hạn (FE) giảm chấn MRF được thực hiện trên ANSYS, kết quả được trình bày trong Bảng 4.1 và Hình 4.4.*



Hình 4.4: Mô hình hóa giảm chấn MRF trên ANSYS: (a) mô hình FE, (b) đường sức từ, (c) mật độ từ thông



Hình 4.7: Ứng xử thực nghiệm của giảm chấn MRF ở tần số 2 Hz, biên độ 20 mm với các dòng điện khác nhau.

4.4 Đánh giá thực nghiệm giảm chấn MRF

Ứng xử thực nghiệm của giảm chấn MRF ở tần số 2 Hz, biên độ 20 mm với các dòng điện khác nhau được thể hiện trong Hình 4.7. Có thể thấy lực giảm chấn phụ thuộc nhiều vào từ trường ngoài. Khi không cấp điện cho các cuộn dây ($I = 0$), đường cong lực – chuyển vị hầu như giống hình ellipse và mối quan hệ lực – vận tốc gần như tuyến tính, chứng tỏ giảm chấn giống như giảm chấn nhớt thuần túy. Tuy nhiên lực giảm chấn trong trường hợp này không tập trung lân cận gốc tọa độ do sự hiện diện của lực ma sát giữa trục và O–ring. Ngoài ra, hình vẽ cho thấy ứng xử lực – vận tốc của giảm chấn MRF được chia thành hai miền lưu biến: miền trước khi chảy (vùng hình chữ nhật) và sau khi chảy. Miền trước khi chảy là miền lân cận gốc tọa độ khi lực và vận tốc đảo chiều, biểu thị hiện tượng trở mạnh. Miền sau khi chảy là phần còn lại của đường cong, hầu như thể hiện mối quan hệ tuyến tính. Trong miền trước khi chảy, lực giảm chấn tăng/giảm đột ngột khi vận tốc bé.

4.5 Mô hình trễ phi tuyến của giảm chấn MRF

4.5.1 Thiết lập mô hình

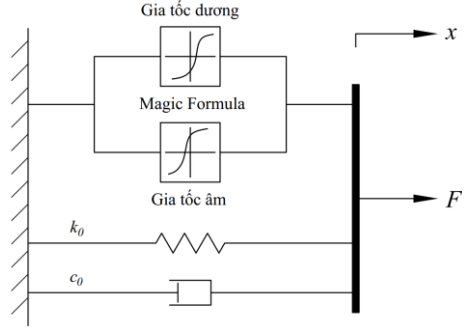
Trong nghiên cứu này, một mô hình trễ mới được đề xuất dựa trên mô hình Magic Formula [41] và mô hình Pan [42]. Hình 4.9 mô tả sơ đồ hệ thống của mô hình mới. Hai tham số độc lập mới S_a và S_b được thêm vào hệ thống để dự đoán chính xác hơn mỗi nhánh đường cong trễ. Tham số mới H cũng được giới thiệu để kiểm soát linh hoạt hơn độ sắc của đường cong. Lực giảm chấn khi đó được biểu diễn

$$F_d = c_0 \dot{u} + k_0 u + D \sin \left\{ C \arctan \left[\begin{array}{l} B(1-E)z \\ +E \arctan(Bz) \\ +H \arctan^7(Bz) \end{array} \right] \right\} + f_0 \quad (4.6a)$$

trong đó z là biến độc lập xác định bởi

$$z = \begin{cases} \dot{u} + S_a u, & \ddot{u} \geq 0 \\ \dot{u} + S_b u, & \ddot{u} < 0 \end{cases} \quad (4.6b)$$

Trong mô hình, hệ số giảm chấn c_0 đặc trưng cho lực cản nhớt và hệ số độ cứng k_0 minh họa cho hiệu quả đàn hồi do sự trượt trực tiếp của MRF. Ý nghĩa của các tham số cơ bản được thể hiện rõ trong [41]. S_{bx} là đoạn dịch



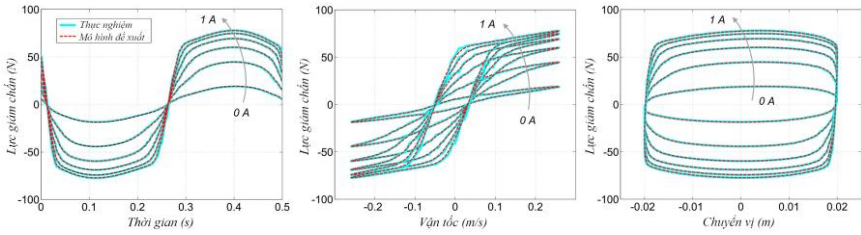
Hình 4.9: Sơ đồ mô hình trễ đề xuất.

chuyển ngang cho phép đường cong dịch chuyển song song với gốc tọa độ (tương tự với S_{ax} cho nhánh dưới), cho biết đoạn đường trễ của lực giảm chấn trễ so với vận tốc 0. Tham số độ cứng B định nghĩa độ dốc tại gốc tọa độ, đặc trưng cho khoảng thời gian chuyển đổi trạng thái giảm chấn tại các điểm đầu và cuối hành trình. Giá trị B càng lớn, trạng thái lực không tải xảy ra càng nhanh. D là lực đỉnh trong vùng trễ chữ “S” của đường cong, đồng thời biểu thị sự bão hòa từ của lực giảm chấn. C là tham số hình dạng kiểm soát hình chữ “S” và E xác định độ cong tại đỉnh. Trong nghiên cứu này, $f_0 = 0$ và sự biến thiên của các tham số còn lại được đề xuất từ dữ liệu thực nghiệm

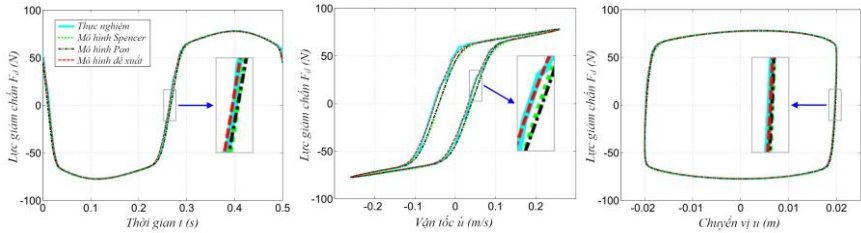
$$\begin{aligned} c_0 &= c_1 - c_2 e^{(-c_3 I)}; \quad k_0 = \left[k_1 - k_2 e^{(-k_3 I)} \right] \left[k_4 - k_5 e^{(-k_6 f)} \right]; \\ S_a &= (S_{a1} + S_{a2} I)(-S_{a3} + S_{a4} f); \quad S_b = (S_{b1} + S_{b2} I)(S_{b3} + S_{b4} f); \\ B &= (B_1 + B_2 I)(B_3 - B_4 f); \quad C = C_1 + C_2 I; \quad D = \left[D_1 - D_2 e^{(-D_3 I)} \right] \left[D_4 + D_5 e^{(-D_6 f)} \right]; \\ E &= E_1 - E_2 I; \quad H = (H_1 + H_2 I)(H_3 - H_4 f) \end{aligned} \quad (4.7 - 4.15)$$

4.5.2 Kết quả và nhận xét

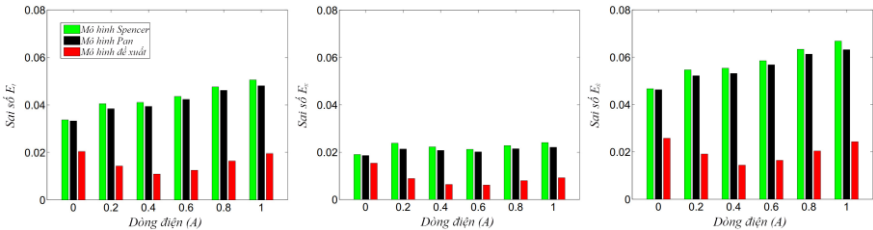
Hình 4.14 trình bày kết quả so sánh ứng xử của mô hình đề xuất với thực nghiệm. Có thể thấy đường cong trễ mô phỏng bởi mô hình rất khớp với ứng xử đo đạc



Hình 4.14: So sánh ứng xử của mô hình đề xuất với thực nghiệm ở tần số 2 Hz, biên độ 20 mm với các kích thích dòng điện khác nhau.



Hình 4.15: So sánh ứng xử của ba mô hình với thực nghiệm ở tần số 2 Hz, biên độ 20 mm với các kích thích dòng điện khác nhau.



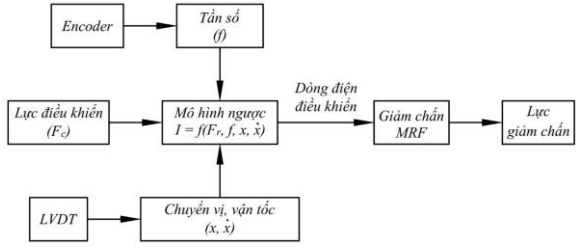
Hình 4.18: Sai số của ba mô hình với thực nghiệm ở tần số 2 Hz, biên độ 20 mm với các kích thích dòng điện khác nhau.

thực nghiệm, chứng tỏ mô hình đề xuất có thể dự đoán hiệu quả hiện tượng trễ phi tuyến của giảm chấn MRF.

Hình 4.15 so sánh độ chính xác của mô hình đề xuất với mô hình Spencer và Pan. Cả ba mô hình đều tương thích với dữ liệu thực nghiệm. Tuy nhiên ứng xử lực – vận tốc trong hình vẽ chỉ ra rằng mô hình đề xuất có độ chính xác cao hơn, nhất là trong miền trước khi chảy khi lực – vận tốc đảo chiều.

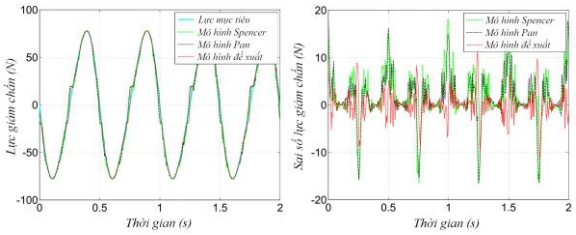
Sai số chuẩn hóa của ba mô hình so với thực nghiệm ở tần số 2 Hz, biên độ 20 mm với các kích thích dòng điện khác nhau được biểu thị trong Hình 4.18. Hình

vẽ cho thấy mô hình Pan chính xác hơn mô hình Spencer một ít, còn mô hình đề xuất vượt trội so với cả hai mô hình kia, đặc biệt trong miền lực – vận tốc.



Hình 4.20: Sơ đồ khối hệ thống điều khiển lực giảm chấn.

Hình 4.20 mô tả sơ đồ khối của hệ thống điều khiển vòng lặp hở. Lực giảm chấn mong muốn được thiết lập dựa trên điều khiển skyhook có dạng $F_c = C_{sky} \dot{u}$ với C_{sky} là hệ số điều khiển, $C_{sky} = 300$. Hình 4.21 thể hiện khả năng kiểm soát lực giảm chấn của bộ điều



Hình 4.21: Ứng xử lực giảm chấn của ba mô hình so với lực mục tiêu ở tần số 2 Hz và biên độ 20 mm.

khiển sử dụng mô hình đề xuất, Spencer và Pan khi giảm chấn mẫu MRF hoạt động ở tần số 2 Hz và biên độ 20 mm. Cả ba mô hình đều kiểm soát tốt lực giảm chấn theo lực mục tiêu, tuy nhiên sai số lực giảm chấn của mô hình đề xuất thấp hơn nhiều so với hai mô hình kia.

4.6 Hệ thống kiểm soát rung động của máy giặt lắp giảm chấn MRF

4.6.1 Thiết kế hệ thống

Phương trình (2.28) được viết lại

$$m\ddot{u}(t) + F_d + ku(t) = f_u(t) \tag{4.19}$$

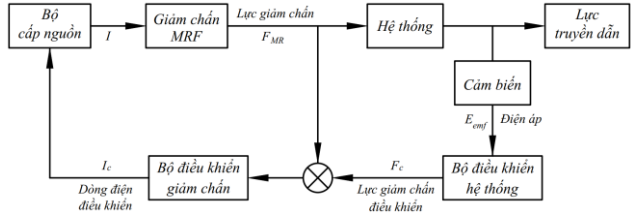
Lực giảm chấn F_d của hệ thống gồm hai thành phần: lực giảm chấn bị động F_{pass} và lực giảm chấn kích hoạt F_{MR} .

$$F_{pass} = c_{pass} \dot{u}(t) \tag{4.20}$$

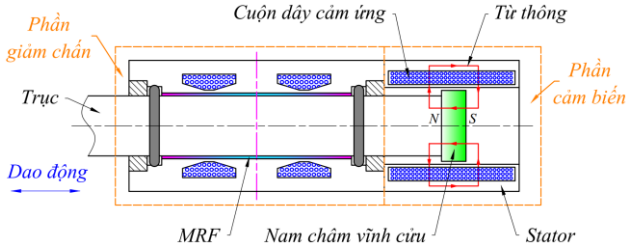
$$F_{MR} = f_1 \left[1 - e^{(-f_2 t)} \right] \left[1 - e^{(-f_3 t)} \right] \tag{4.21}$$

trong đó C_{pass} là hệ số giảm chấn bị động tương đương của mỗi giảm chấn, f_1, f_2 và f_3 là các hệ số được xác định từ dữ liệu thực nghiệm, lần lượt nhận giá trị là 64,28 N, 2,65 A⁻¹ và 12,5 s⁻¹.

Sơ đồ khối hệ thống kiểm soát rung động của máy giặt lắp giảm chấn MRF được minh họa trong Hình 4.23. Thành phần cảm biến



Hình 4.23: Sơ đồ khối hệ thống điều khiển rung động của máy giặt sử dụng giảm chấn MRF.



Hình 4.24: Thành phần cảm biến tích hợp vào giảm chấn MRF.

của hệ thống điều khiển được tích hợp vào phía sau của giảm chấn, như mô tả trong Hình 4.24. Điện áp cảm ứng E_{emf} tạo ra bởi chuyển động của nam châm trong cuộn dây cảm ứng được cho bởi [43]. Lực giảm chấn mong muốn F_c của bộ điều khiển hệ thống được thiết lập dựa trên thuật toán điều khiển sky–hook có dạng $F_c = C_s E_{emf}$ với C_s là hệ số điều khiển, $C_s = 0,1265$. Để bù hiện tượng trễ của MRF, thành phần hiệu chỉnh sớm pha được sử dụng trong bộ điều khiển giảm chấn, có dạng

$$G_c(s) = K_c \frac{s + T_c^{-1}}{s + (\alpha_c T_c)^{-1}}, \quad (\alpha_c < 1) \quad (4.26)$$

trong đó s là biến Laplace và K_c, T_c, α_c là các hệ số điều khiển. $K_c = 6,425, T_c = 0,0258$ và $\alpha_c = 0,4181$.

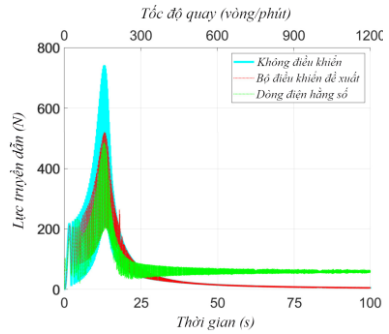
4.6.2 Kết quả và nhận xét

Hình 4.25 mô tả sự truyền dẫn lực của hệ thống ở các trạng thái điều khiển khác nhau. Từ hình vẽ, có thể thấy so với hai chế độ điều khiển còn lại, rung động của

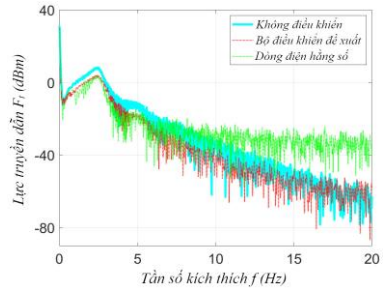
máy giặt sử dụng hệ thống điều khiển đề xuất được kiểm soát tốt trong suốt quá trình hoạt động. Hình 4.27 biểu thị chỉ số gia tốc đo đạc thực nghiệm theo ba phương của máy giặt lắp giảm chấn MRF với các chế độ điều khiển khác nhau. Với hệ thống điều khiển bán chủ động đề xuất, hiệu quả giảm rung động được cải thiện trong suốt quá trình. Có thể thấy bộ điều khiển đề xuất chính là sự kết hợp thể mạnh của hai bộ điều khiển kia.

4.7 Tổng kết

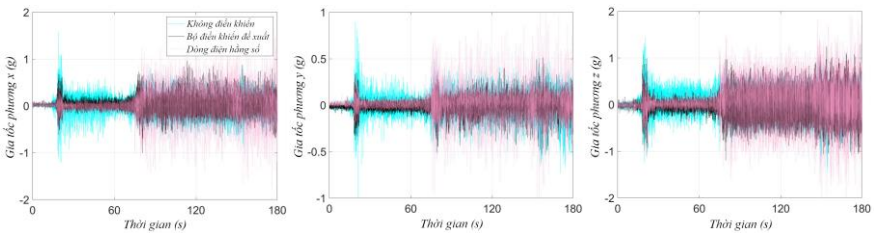
Trong chương này, giảm chấn MRF đã được thiết kế tối ưu và chế tạo mẫu cho máy giặt cửa trước. Dựa trên mô hình Magic Formula và Pan, một mô hình động lực học tham số mới đã được xây dựng để dự đoán ứng xử trễ của giảm chấn. Một hệ thống kiểm soát rung động cũng được phát triển và thử nghiệm trên máy giặt mẫu lắp giảm chấn MRF. Kết quả nghiên cứu đã được tác giả công bố trên 2 tạp chí ISI [37, 44], 1 tạp chí Scopus [45] và 1 Kỷ yếu hội nghị khoa học [46].



Hình 4.25: Ứng xử mô phỏng của hệ thống trong miền thời gian và tốc độ quay.



Hình 4.26: Ứng xử mô phỏng của hệ thống trong miền tần số.



Hình 4.27: Ứng xử thực nghiệm của máy giặt lắp giảm chấn MRF.

CHƯƠNG 5 GIẢM CHẤN LƯU CHẤT TỪ BIẾN TỰ ĐÁP ỨNG

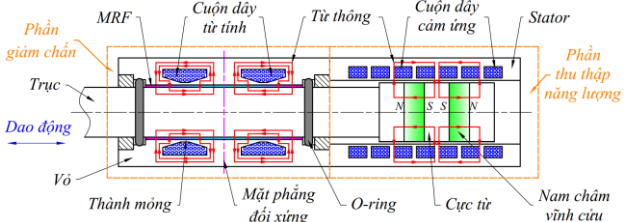
5.1 Giảm chấn MRF tự cấp năng lượng

5.1.1 Giới thiệu

Đề tài mở rộng và phát triển một loại giảm chấn MRF tự cấp năng lượng, tích hợp công nghệ giảm chấn MR và thu thập năng lượng vào một thiết bị duy nhất để có thể tái sử dụng năng lượng dao động dư thừa cho nguồn cấp giảm chấn.

5.1.2 Cấu hình và nguyên lý hoạt động giảm chấn MRF tự cấp năng lượng

Cấu hình của giảm chấn MRF tự cấp năng lượng được mô tả trong Hình 5.1. Bộ phận giảm chấn MR có thiết kế tương tự giảm chấn MRF truyền thống ở Chương 4. Bộ phận thu thập năng lượng



Hình 5.1: Thiết kế 2D của giảm chấn MRF tự cấp năng lượng.

lượng gồm các nam châm vĩnh cửu lắp xen kẽ với các cực từ vào đoạn cuối trục, phía ngoài là một lõi stator được xẻ các rãnh quấn dây. Dao động khiến cho trục chuyển động và dòng điện cảm ứng được sinh ra. Năng lượng này được cấp vào các cuộn dây từ tính của bộ phận giảm chấn MR để tạo ra lực giảm chấn tương ứng chống lại rung động.

5.1.3 Mô hình hóa giảm chấn MRF tự cấp năng lượng

a) Bộ phận thu thập năng lượng (EH)

Từ thông xuyên qua khe hở giữa các nam châm và stator được cho bởi [47]

$$\Phi_g = \lambda \frac{B_{rem} l_m \mu_0 H_{coe} A_{gm}}{2t_{gm} B_{rem} + l_m \mu_0 H_{coe} (A_{gm}/A_m)} \quad (5.1)$$

trong đó λ là hiệu suất từ thông, B_{rem} là mật độ từ thông dư, H_{coe} là độ kháng từ của nam châm, μ_0 là độ từ thẩm tương đối, l_m là chiều dài nam châm, t_{gm} là bề dày khe hở không khí, A_{gm} là diện tích bề mặt trụ của khe hở không khí, A_m là tiết

diện mặt cắt ngang của nam châm. Công suất của 4 cuộn dây hoạt động P [48]

$$P = 2(P_1 + P_2) = 2 \frac{(N\Phi_g \pi / \rho_m)^2}{R_c} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \quad (5.9)$$

trong đó P_1 và P_2 là công suất của cuộn 1 và 2, R_c là điện trở của mỗi cuộn dây.

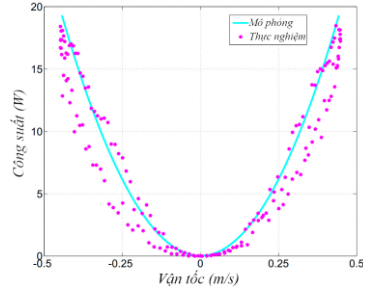
b) *Bộ phận giảm chấn MR*

Thiết kế giống giảm chấn MRF truyền thống.

5.1.4 Đánh giá thực nghiệm giảm chấn MRF tự cấp năng lượng

a) *Hiệu năng bộ phận thu thập năng lượng*

Hình 5.7 so sánh kết quả mô phỏng và đo đạc thực nghiệm của công suất. Có thể thấy công suất phân bố bậc hai theo vận tốc, tương đồng với phân tích mô phỏng.



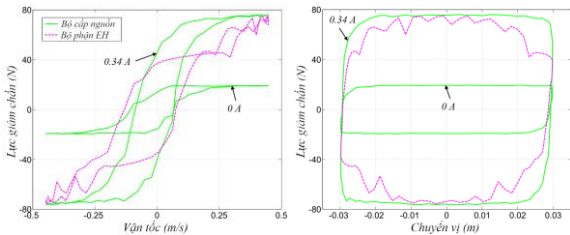
Hình 5.7: Công suất của bộ phận EH.

b) *Hiệu năng giảm chấn dưới từ trường không đổi*

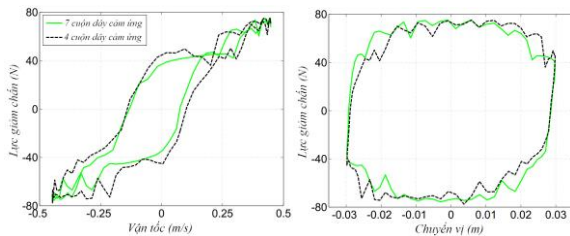
Tương tự giảm chấn MRF truyền thống.

c) *Khả năng tự đáp ứng lực giảm chấn*

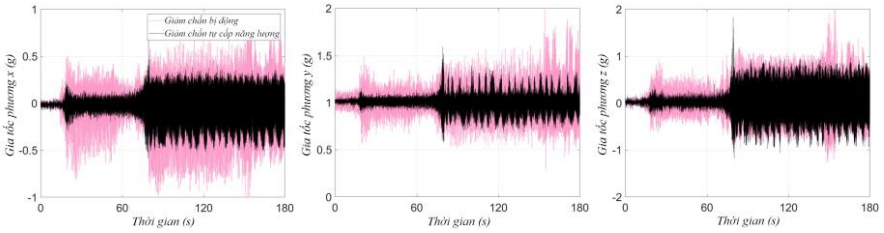
Ứng xử thực nghiệm được trình bày trong Hình 5.9. Giảm chấn tự cấp năng lượng có lực cực đại tương đương với cấp dòng điện hằng số và tiêu tán năng lượng thấp hơn giảm chấn MRF truyền thống.



Hình 5.9: Ứng xử thực nghiệm của giảm chấn MRF với bộ phận EH ở tần số 2,4 Hz.



Hình 5.11: So sánh ứng xử thực nghiệm của giảm chấn MRF 7 cuộn dây với 4 cuộn dây cảm



Hình 5.12: Ứng xử của máy giặt lắp giảm chấn MRF 4 cuộn dây.

5.1.5 Cải tiến giảm chấn MRF tự cấp năng lượng với 4 cuộn dây cảm ứng

Số nam châm và cuộn dây cảm ứng được xác định tối ưu lần lượt là 2 và 4. Thiết kế mới dễ kết nối, giảm kích cỡ và cải thiện hiệu năng giảm chấn. Ứng xử thực nghiệm được so sánh với giảm chấn 7 cuộn dây trong Hình 5.11. Kết quả thử nghiệm trên máy giặt trong Hình 5.12 thể hiện khả năng giảm rung khá tốt so với giảm chấn bị động.

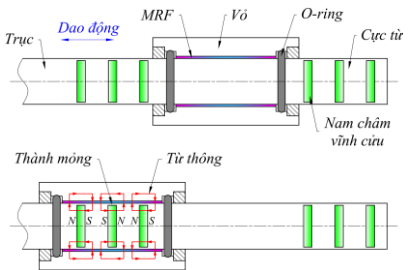
5.2 Giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình

5.2.1 Giới thiệu

Giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình có đặc tính giảm chấn phụ thuộc chuyển vị, rất phù hợp với điều kiện vận hành của máy giặt. So với các giảm chấn MRF khác, giảm chấn đề xuất có kết cấu đơn giản và chi phí cực thấp bởi không cần bất kỳ sự điều khiển nào.

5.2.2 Cấu hình và nguyên lý hoạt động

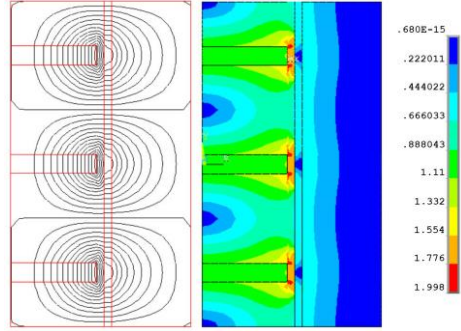
Hình 5.14 mô tả kết cấu và nguyên lý làm việc của giảm chấn. Khi dao động nhỏ, chưa có nam châm nào tương tác với MRF và vì vậy giảm chấn ở trạng thái nghỉ. Dưới các biên độ dao động lớn hơn, các nam châm bắt đầu di chuyển vào vùng MRF, từ trường được hình thành xuyên qua lưu chất và kích hoạt giảm chấn. Biên độ kích thích càng lớn, càng nhiều MRF được kích hoạt và lực giảm chấn càng lớn được sinh ra.



Hình 5.14: Kết cấu và nguyên lý hoạt động của giảm chấn.

5.2.3 Mô hình hóa giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình

Lực giảm chấn kích hoạt F_d và lực không tải F_0 được tính toán bởi các phương trình (4.1, 4.2). Trong thiết kế này, $L_{on} \cong 6l_p$ và $L_{off} \cong 3l_p$ với l_p và l_m lần lượt là chiều dài của mỗi cực từ và nam châm. Ba loại MRF, gồm có 122–2ED, 132–DG và 140–CG được xem xét để tính toán. Quá trình tối ưu hóa tương tự các chương trước. Kết quả tối ưu được thể hiện trong Bảng 5.5 và Hình 5.19. Hiệu quả của MRF 140–CG tốt hơn hai loại kia nên được lựa chọn cho nghiên cứu này. Bán kính ngoài của giảm chấn MRF 140–CG giảm đáng kể so với MRF truyền thống và tự cấp năng lượng.



Hình 5.19: Mô hình hóa giảm chấn MRF 140–CG tự đáp ứng.

Hiệu quả của MRF 140–CG tốt hơn hai loại kia nên được lựa chọn cho nghiên cứu này. Bán kính ngoài của giảm chấn MRF 140–CG giảm đáng kể so với MRF truyền thống và tự cấp năng lượng.

Bảng 5.5: Kết quả tối ưu của giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình.

Các thông số (mm)		122–2ED	132–DG	140–CG
Nam châm	Chiều dài l_m	2,4	2,4	2
	Bán kính r_m	13,5	10,2	9
	Cực từ l_p	9,1	9,1	9,1
Trục	Thành mỏng t_w	0,8	0,8	0,8
	Bán kính r_s	14,3	11	9,8
Khe hở MRF	Chiều dài L	34,6	34,5	33,3
	Bề dày t_g	0,8	0,8	0,8
Vỏ	Bề dày t_o	5	4,2	4,5
	Bán kính ngoài R	20	16	15,1
Hiệu năng	Lực giảm chấn cực đại F_d (N)	80,1	80,1	80,1
	Lực không tải F_0 (N)	31,7	24,4	22

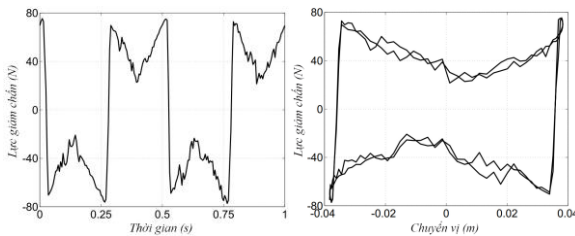
5.2.4 *Đánh giá thực nghiệm giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình*

Ứng xử thực nghiệm ở tần số 2 Hz được mô tả trong Hình 5.21. Lực giảm chấn đo đặc thực nghiệm tăng theo chuyển vị, phù hợp với phân tích lý thuyết. Ứng xử lực – chuyển vị ghi nhận hiện tượng trễ theo chiều kim đồng hồ, đặc biệt ở cuối hành trình.

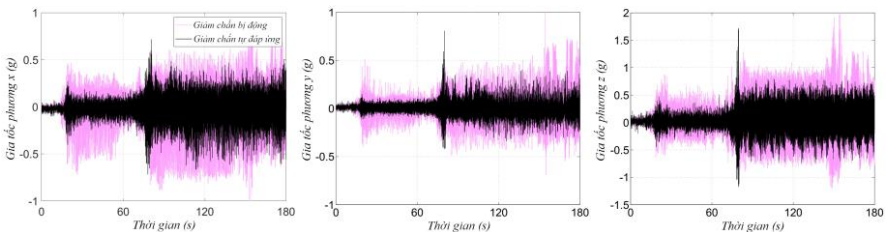
Kết quả thử nghiệm của giảm chấn trên máy giặt được thể hiện trong Hình 5.23 cho thấy khả năng hạn chế rung động đáng kể so với giảm chấn bị động, qua đó chứng tỏ tính khả thi thực tiễn.

5.3 **Tổng kết**

Trong chương này, hai loại giảm chấn MRF kiểu trượt tự đáp ứng đã được thiết kế tối ưu, chế tạo mẫu và thử nghiệm trên máy giặt cửa trước. Các giảm chấn này có khả năng tự điều chỉnh lực giảm chấn theo kích thích ngoài để dập tắt rung động mà không cần bất kỳ sự điều khiển nào, nhờ vậy giảm đáng kể chi phí sản xuất. Kết quả nghiên cứu đã được tác giả công bố trên 2 tạp chí ISI [49, 50], 1 tạp chí Scopus [51] và 1 Kỷ yếu hội nghị khoa học [52].



Hình 5.21: Ứng xử thực nghiệm của giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình ở tần số 2 Hz.



Hình 5.23: Ứng xử thực nghiệm của máy giặt lắp giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình.

CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

6.1 Kết luận

Luận án đã cung cấp tầm nhìn và sự hiểu biết sâu sắc về hệ thống giảm chấn tích hợp vật liệu thông minh để kiểm soát hiệu quả rung động của máy giặt. Với khả năng điều chỉnh và kiểm soát linh hoạt đặc tính hoạt động theo kích thích ngoài, các hệ thống giảm chấn đã đánh dấu bước tiến mới cho ngành công nghiệp tự động hóa. Kết quả nghiên cứu từ luận án đã làm sáng tỏ những điểm chính sau:

1. Vật liệu thông minh thứ nhất đã được nghiên cứu và ứng dụng vào hệ thống giảm chấn của máy giặt cửa trước là SMA. Ứng xử thực nghiệm của giảm chấn SMA khá phù hợp với sự mô hình hóa, khi lực kích hoạt có thể đạt 76,5 N (95% giá trị tính toán), đủ lớn để loại bỏ rung động của hầu hết máy giặt. So với giảm chấn MRF, giảm chấn SMA có kết cấu đơn giản hơn, chi phí thấp hơn và sở hữu lực không tải nhỏ hơn (chỉ khoảng 8 N), qua đó cho thấy tiềm năng của loại giảm chấn này. Kết quả thực nghiệm trên máy giặt cũng đã thể hiện khả năng giảm rung hiệu quả của giảm chấn SMA so với giảm chấn bị động. Tuy nhiên với thời gian chuyển đổi trạng thái khá lớn (khoảng 25 giây), giảm chấn SMA bước đầu chỉ phù hợp cho điều khiển on-off.

2. Dữ liệu thực nghiệm cho thấy giảm chấn SMA biểu thị hiện tượng trễ, đặc biệt ở đầu và cuối hành trình. Mô hình trễ đề xuất trong [37] (công bố khoa học [3] của tác giả) và hai mô hình phổ biến Bingham, Bouc-Wen đã được sử dụng để dự đoán ứng xử phi tuyến của giảm chấn. Kết quả mô phỏng cho thấy, so với hai mô hình kia, mô hình Bingham không thể hoàn toàn đặc tả chính xác được ứng xử trễ phi tuyến của giảm chấn SMA, nhất là trong vùng vận tốc nhỏ, tuy nhiên với cấu trúc đơn giản, mô hình có lợi cho các trường hợp thiết kế và ước lượng ban đầu. Ngược lại, mô hình Bouc-Wen và mô hình đề xuất phản ánh sự biến thiên của lực giảm chấn tốt hơn nhưng đồng thời cũng phức tạp hơn, vì vậy phù hợp cho các bài toán thiết kế điều khiển, phản hồi hay nhận dạng hệ thống.

3. Loại vật liệu thông minh thứ hai đã được nghiên cứu trong luận án là MRF. Giảm chấn MRF kiểu trượt đã được tối ưu về thiết kế để đạt hiệu năng hoạt động

tốt nhất trong khi vẫn đảm bảo các tiêu chí về lực giảm chấn, kích cỡ, không gian lắp đặt trong máy giặt và chi phí sản xuất thấp. Kết quả thực nghiệm và mô hình hóa khá tương đồng nhau khi lực giảm chấn cực đại đạt 76,6 N (khoảng 96% giá trị mô phỏng) và lực không tải là 19,1 N – lớn hơn một ít so với tính toán lý thuyết (khoảng 104%).

4. Dữ liệu ứng xử lực – vận tốc và lực – chuyển vị của giảm chấn MRF ghi nhận một sự trở mạnh trong miền trước khi chảy lân cận góc tọa độ. Dựa trên mô hình Magic Formula và Pan, một mô hình ứng xử mới đã được xây dựng để biểu thị hiện tượng trở phi tuyến này, trong đó lực giảm chấn được định nghĩa như một hàm của biến chuyển vị, vận tốc, cường độ dòng điện và tần số kích thích. Kết quả mô phỏng cho thấy, so với mô hình Spencer và Pan, mô hình đề xuất không chỉ dự đoán chính xác hơn đặc tính trở bất đối xứng và độ sắc tại các góc lượn của đường cong trong miền trước khi chảy mà còn tương thích hơn với các điều kiện vận hành khác nhau. Các tham số của mô hình có ý nghĩa vật lý rõ ràng, tạo thuận lợi cho việc tiếp cận nghiên cứu và hoàn toàn có thể ứng dụng mô hình cho các hệ thống kiểm soát bán chủ động khác.

5. Một hệ thống điều khiển vòng lặp hở dựa trên thuật toán sky-hook đã được thiết kế để đánh giá hiệu quả của mô hình đề xuất. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình đề xuất kiểm soát lực giảm chấn tương ứng theo lực điều khiển mong muốn tốt hơn so với mô hình Spencer và Pan.

6. Một hệ thống kiểm soát rung động bán chủ động đã được phát triển cho máy giặt lắp giảm chấn MRF, gồm một bộ điều khiển hệ thống và một bộ điều khiển giảm chấn sớm pha. Thành phần cảm biến của hệ thống sử dụng một cuộn dây cảm ứng tích hợp vào phía sau giảm chấn giúp đơn giản hóa kết cấu và giảm chi phí. Từ các kết quả mô phỏng và thực nghiệm, có thể thấy hệ thống điều khiển đề xuất là sự kết hợp thế mạnh của trạng thái không điều khiển và điều khiển dòng điện hằng số. Bộ điều khiển đề xuất đã thể hiện khả năng giảm dao động hiệu quả ở tần số thấp, đặc biệt trong vùng cộng hưởng, trong khi vẫn đảm bảo hạn chế sự truyền dẫn lực ở tần số cao.

7. Mặc dù giảm chấn MRF đã chứng tỏ khả năng giải quyết vấn đề rung động của máy giặt, nhưng kết cấu phức tạp và chi phí cao đến từ các thiết bị phụ đi kèm lại là những rào cản cho sự thương mại hóa. Vì vậy, đề tài đã phát triển loại giảm chấn MRF tự cấp năng lượng, xuất phát từ ý tưởng tận dụng năng lượng dao động cơ học dư thừa của máy giặt để tự cấp nguồn. Hai kiểu kết cấu, 7 và 4 cuộn dây cảm ứng, của bộ phận EH được nghiên cứu và thiết kế tối ưu để đảm bảo khả năng tích hợp trong máy giặt. Kết quả thực nghiệm cho thấy lực giảm chấn cực đại của cả hai gần như tương đương với giảm chấn MRF truyền thống, trong đó thiết kế 4 cuộn dây nhỏ gọn, kết nối dễ dàng và ít tốn kém hơn trong việc chế tạo và bảo dưỡng. Điểm nhấn là giảm chấn MRF tự cấp năng lượng có thể tự đáp ứng với kích thích ngoài và tạo ra mức giảm chấn tương thích mà không cần bất kỳ sự điều khiển nào, qua đó giảm đáng kể chi phí sản xuất. Đây là yếu tố rất quan trọng cho sự phát triển thương mại hóa. Kết quả thực nghiệm trên máy giặt cũng cho thấy giảm chấn tự cấp năng lượng 4 cuộn dây hạn chế rung động khá tốt ở các tần số so với giảm chấn bị động.

8. Sở hữu các cuộn dây quán từ tính, giảm chấn MRF tự cấp năng lượng phần nào mang dấu ấn truyền thống khi chưa thể giải quyết hoàn toàn sự phức tạp kết cấu. Vẫn khơi nguồn cảm hứng từ ý tưởng tự đáp ứng, một loại giảm chấn MRF kiểu trượt mới với khả năng tự kích hoạt bằng hành trình đã được phát triển. Dữ liệu thực nghiệm cho thấy lực giảm chấn tăng theo biên độ dao động kích thích, tương đồng với sự phân tích lý thuyết. So với giảm chấn MRF truyền thống và tự cấp năng lượng, đặc tính giảm chấn phụ thuộc chuyển vị này rất phù hợp với điều kiện vận hành của máy giặt. Thêm vào đó, giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình có kết cấu rất đơn giản và chi phí thấp hơn các giảm chấn MRF khác, có thể tạo bước đột phá cho quá trình thương mại hóa. Các kết quả thử nghiệm giảm rung động trên máy giặt cũng đã cho thấy hiệu quả của giảm chấn này so với giảm chấn bị động, qua đó chứng minh tính khả thi và tiềm năng trong việc ứng dụng thực tiễn.

9. So sánh bốn loại giảm chấn đã được phát triển trong luận án:

- Chiều dài giữa hai đầu chốt kết nối của bốn giảm chấn tương đương nhau (xấp xỉ 200 mm) nhằm đảm bảo không gian lắp đặt trong máy giặt. Tuy nhiên, giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình có bán kính nhỏ gọn nhất.
- Các vật liệu thông minh sử dụng trong bốn giảm chấn đều được nhập từ nước ngoài với chi phí cho một giảm chấn không chênh lệch đáng kể. Về kết cấu, ba giảm chấn MRF cần O-ring để làm kín lưu chất và cần bộ phận tạo từ trường, còn giảm chấn SMA thì không, do vậy thiết kế có phần đơn giản hơn. Tuy nhiên, giảm chấn SMA và giảm chấn MRF truyền thống yêu cầu bộ cấp nguồn và điều khiển nên kết cấu hệ thống phức tạp và tốn kém hơn. Giảm chấn MRF tự cấp năng lượng và tự kích hoạt bằng hành trình đều là dạng tự thích nghi, trong đó kiểu tự kích hoạt bằng hành trình có ưu điểm hơn về sự đơn giản, khả năng chế tạo, lắp ráp, bảo dưỡng và chi phí sản xuất nhờ sử dụng nam châm thay cho cuộn dây, đồng thời sở hữu đặc tính giảm chấn theo chuyển vị phù hợp hơn với hoạt động của máy giặt.
- Bốn giảm chấn đều có lực giảm chấn cực đại khá tương đồng với tính toán lý thuyết. Lực không tải của giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình có phần lớn hơn hai giảm chấn MRF kia do ảnh hưởng từ của nam châm, còn của giảm chấn SMA là thấp nhất. Tuy nhiên thời gian kích hoạt khá lâu của giảm chấn SMA là một vấn đề cần được nghiên cứu thêm.
- Khả năng giảm rung khi thử nghiệm trên máy giặt mẫu của bốn giảm chấn đều tốt hơn so với giảm chấn bị động. Trong đó, dao động ở phương z không được giảm nhiều như hai phương x và y do sự thiết kế lắp đặt các giảm chấn trong cùng mặt phẳng $x-y$. Các kết quả có thể được cải thiện khi thay đổi lại cấu trúc bộ khung của hệ thống treo.

Mỗi loại giảm chấn vật liệu thông minh trong luận án có những ưu và nhược điểm riêng. Sự so sánh trên mang tính chất tổng hợp và định hướng cho việc lựa chọn loại giảm chấn phù hợp với từng ứng dụng cụ thể.

6.2 Hướng phát triển

Các nghiên cứu trong luận án đã đóng góp đáng kể cho bài toán kiểm soát rung động của máy giặt cửa trước. Tuy nhiên, đề tài vẫn còn một số hạn chế nhất định.

Thứ nhất, giảm chấn SMA có thời gian kích hoạt khá lâu nên việc nghiên cứu chỉ dừng lại ở thiết kế và điều khiển dạng on-off. Giảm đại lượng này sẽ cải thiện chất lượng của giảm chấn SMA và cho phép trạng thái điều khiển vòng lặp kín. Thứ hai, mô hình trễ của các giảm chấn chỉ được xây dựng trong trạng thái ổn định, chưa xét đến trạng thái quá độ từ không tải sang kích hoạt, đồng thời chưa kết nối rõ ràng phần thiết kế và mô hình hóa. Việc nghiên cứu một mô hình ứng xử phản ánh bản chất vật lý của giảm chấn cũng như dự đoán cả hai trạng thái sẽ giúp hoàn thiện sự phân tích động lực học của hệ thống. Thứ ba, các nam châm từ tính dọc trục của giảm chấn MRF tự kích hoạt bằng hành trình không thể tạo đường sức từ phủ kín toàn bộ chiều dài khe hở MRF. Sự thay thế bằng nam châm từ tính hướng kính sẽ là một lựa chọn tối ưu hơn. Thứ tư, các giảm chấn vật liệu thông minh được bố trí lắp đặt trong cùng mặt phẳng $x-y$, do vậy khả năng giảm rung động theo phương z bị hạn chế. Hiệu chỉnh lại kết cấu lắp đặt sẽ có thể cải thiện được vấn đề. Thứ năm, để đơn giản hóa quá trình thiết kế, mô hình động lực học của máy giặt cửa trước được xây dựng trên mặt phẳng hai chiều chứa khối lượng mất cân bằng và cũng là mặt phẳng chứa hệ thống giảm chấn, do vậy các ảnh hưởng rung lắc, dịch chuyển và xoay tròn liên quan đến chiều không gian thứ ba đã được bỏ qua. Định lượng các yếu tố này, tuy rằng phức tạp hơn nhiều, nhưng sẽ giúp đánh giá ứng xử của máy giặt chặt chẽ và chính xác hơn. Từ các phân tích trên, luận án có thể được phát triển theo các hướng sau:

- Nghiên cứu các phương pháp gia nhiệt hoặc xử lý nhiệt ban đầu cho SMA. Nghiên cứu thiết kế giảm chấn SMA dựa trên đặc tính giả đàn hồi của vật liệu. Nghiên cứu ứng dụng vật liệu hợp kim nhớ hình từ biến vào hệ thống giảm chấn để tận dụng khả năng đáp ứng nhanh của từ trường.
- Mô hình hóa kết hợp bộ khung mô hình giả tĩnh với các toán tử trễ khác nhau.
- Nghiên cứu mô hình ứng xử giảm chấn cho cả trạng thái quá độ và ổn định.
- Cải tiến giảm chấn MRF tự kích hoạt sử dụng nam châm hướng kính.
- Nghiên cứu hiệu chỉnh cấu trúc lắp đặt của hệ thống treo để cải thiện hiệu quả giảm rung động của các giảm chấn ở cả ba phương.
- Giải bài toán thiết kế, mô hình hóa và kiểm soát rung động của máy giặt dựa trên phân tích mô hình động lực học ba chiều của khối lồng giặt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. T. Lim, W. B. Jeong and K. J. Kim. Dynamic modeling and analysis of drum-type washing machine. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, Issue 3, pp. 407–417, 2010.
- [2] S. Bae, J. M. Lee, Y. J. Kang, J. S. Kang and J. R. Yun. Dynamic analysis of an automatic washing machine with a hydraulic balancer. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 257, Issue 1, pp. 3–18, 2002.
- [3] E. Papadopoulos and I. Papadimitriou. Modeling, design and control of a portable washing machine during the spinning cycle. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Como, Italy, 2001, pp. 899–904.
- [4] A. Ulaslyar and I. Lazoglu. Design and analysis of a new magneto rheological damper for washing machine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, Issue 4, pp. 1549–1561, 2018.
- [5] V. Novak, P. Sittner, G. N. Dayananda, F. M. B. Fernandes and K. K. Mahesh. Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: Experiments and simulation. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 481–482, pp. 127–133, 2008.
- [6] B. Heidari, M. Kadkhodaei, M. Barati and F. Karimzadeh. Fabrication and modeling of shape memory alloy springs. *Smart Material and Structure*, Vol. 25, Issue 12, 125003, 2016.
- [7] X. B. Zuo, A. Q. Li and Q. F. Chen. Design and Analysis of a Superelastic SMA Damper. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 19, Issue 6, pp. 631–639, 2008.
- [8] H. Qian, H. Li and G. Song. Experimental investigations of building structure with a superelastic shape memory alloy friction damper subject to seismic loads. *Smart Material and Structure*, Vol. 25, Issue 12, 125026, 2016.
- [9] F. Weber. Semi-active vibration absorber based on real-time controlled MR damper. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 46, Issue 2, pp. 272–288, 2014.

- [10] X. X. Bai, W. Hu and N. M. Wereley. Magnetorheological damper utilizing an inner bypass for ground vehicle suspensions. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, Issue 7, pp. 3422–3425, 2013.
- [11] J. D. Carlson. Low-cost MR fluid sponge devices. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, Issue 8, pp. 589–594, 1999.
- [12] G. Aydar, C. A. Evrensel, F. Gordaninejad and A. Fuchs. A low force magneto-rheological (MR) fluid damper: design, fabrication and characterization. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, Issue 12, pp. 1155–1160, 2007.
- [13] Q. H. Nguyen, N. D. Nguyen and S. B. Choi. Optimal design and performance evaluation of a flow-mode MR damper for front-loaded washing machines. *Asia Pacific Journal on Computational Engineering*, Vol. 1, 3, 2014.
- [14] S. T. Cha and W. K. Baek. Vibration attenuation of a drum-typed washing machine using magneto-rheological dampers. *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 17, Issue 2, pp. 63–69, 2013.
- [15] Q. H. Nguyen, S. B. Choi and J. K. Woo. Optimal design of magnetorheological fluid-based dampers for front-loaded washing machines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, Issue 2, pp. 294–306, 2014.
- [16] R. W. Phillips. Engineering applications of fluids with a variable yield stress. *PhD Thesis*, University of California Berkeley, CA, USA, 1969.
- [17] N. M. Wereley and L. Pang. Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models. *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, Issue 5, pp. 732–743, 1998.
- [18] D. Y. Lee, Y. T. Choi and N. M. Wereley. Performance analysis of ER/MR impact damper systems using Herschel-Bulkley model. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, Issue 7–8, pp. 525–531, 2002.
- [19] W. W. Chooi and S. O. Oyadiji. Design, modelling and testing of magnetorheological (MR) dampers using analytical flow solutions. *Computers & Structures*, Vol. 86, Issue 3–5, pp. 473–482, 2008.

- [20] S. B. Choi, S. K. Lee and Y. P. Park. A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magnetorheological damper. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 245, Issue 2, pp. 375–383, 2001.
- [21] H. S. Kim and P. N. Roschke. Fuzzy control of base-isolation system using multi-objective genetic algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 21, Issue 6, pp. 436–449, 2006.
- [22] R. Stanway, J. L. Sproston and N. G. Stivens. Non-linear modeling of an electrorheological vibration damper. *Journal of Electrostatics*, Vol. 20, Issue 2, pp. 167–184, 1987.
- [23] R. Bouc. Modele mathematique d'hysteresis. *Acustica*, Vol. 24, pp. 16–25, 1971.
- [24] Y. K. Wen. Method of random vibration of hysteretic systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 102, Issue 2, pp. 249–263, 1976.
- [25] B. F. Spencer, S. J. Dyke, M. K. Sain and J. D. Carlson. Phenomenological model of a magnetorheological damper. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, Issue 3, pp. 230–238, 1997.
- [26] M. S. Seong, S. B. Choi and C. H. Kim. Design and performance evaluation of MR damper for integrated isolation mount. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, Issue 15, pp. 1729 – 1738, 2011.
- [27] J. S. Oh, S. H. Choi and S. B. Choi. Design of a 4-DOF MR haptic master for application to robot surgery: virtual environment work. *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, Issue 9, 095032, 2014.
- [28] J. L. Yao, W. K. Shi, J. Q. Zheng and H. P. Zhou. Development of a sliding mode controller for semi-active vehicle suspensions. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 19, Issue 8, pp. 1152–1160, 2013.
- [29] S. F. Ali and A. Ramaswamy. Optimal fuzzy logic control for MDOF structural systems using evolutionary algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 22, Issue 3, pp. 407–419, 2009.
- [30] M. Yu, S. B. Choi, X. Dong and C.R. Liao. Fuzzy neural network control for vehicle stability utilizing magnetorheological suspension system. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, Issue 4, pp. 457–466, 2009.

- [31] Y. Chen. Skyhook surface sliding mode control on semiactive vehicle suspension system for ride comfort enhancement. *Engineering*, Vol. 1, Issue 1, pp. 23–32, 2009.
- [32] D. C. Lagoudas. *Shape memory alloys – Modeling and engineering applications*. Springer, 2008.
- [33] O. Ashour, C. A. Rogers and W. Kordonsky. Magnetorheological fluids: materials, characterization and devices. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, Issue 2, pp. 123–130, 1996.
- [34] Y. T. Choi, J. U. Cho, S. B. Choi and N. M. Wereley. Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers. *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, Issue 5, pp. 1025–1036, 2005.
- [35] M. Zubieta, S. Eceolaza, M. J. Elejabarrieta and M. M. B. Ali. Magnetorheological fluids: characterization and modeling of magnetization. *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, Issue 9, pp. 1–6, 2009.
- [36] Q. H. Nguyen, S. B. Choi and N. M. Wereley. Optimal design of magneto–rheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant. *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, Issue 2, pp. 1–12, 2008.
- [37] Q. D. Bui, Q. H. Nguyen, X. X. Bai and D. D. Mai. A new hysteresis model for magneto–rheological dampers based on Magic Formula. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, Issue 13, pp. 2437–2451, 2021.
- [38] Q. D. Bui, Q. D. Do, L. V. Hoang, D. D. Mai and Q. H. Nguyen. Design and experimental evaluation of a novel damper for front–loaded washing machines featuring shape memory alloy actuator and wedge mechanism. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 873–878, 2021.
- [39] D. Q. Bui, H. Q. Nguyen, V. L. Hoang and D. D. Mai. Design and hysteresis modeling of a new damper featuring shape memory alloy actuator and wedge mechanism. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp.125–136, 2021.
- [40] Parker’s O–ring Division. *Parker O–ring handbook*. Parker Hannifin Corporation, 2007, pp. 113–114.

- [41] H. B. Pacejka. *Tyre and vehicle dynamics*. Butterworth–Heinemann, 2006, pp.172–176.
- [42] W. Pan, Z. Yan, J. Lou and S. Zhu. Research on MRD parametric model based on Magic Formula. *Shock and Vibration*, Vol. 2018, pp. 1–10, 2018.
- [43] Y. T. Choi and N. M. Wereley. Self–powered magnetorheological dampers. *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 131, Issue 4, 044501, 2009.
- [44] Q. D. Bui, X. X. Bai and Q. H. Nguyen. Dynamic modeling of MR dampers based on quasi–static model and Magic Formula hysteresis multiplier. *Engineering Structures*, Vol. 245, 112855, 2021.
- [45] D. Q. Bui, V. L. Hoang, H. D. Le and H. Q. Nguyen. Design and evaluation of a shear–mode MR damper for suspension system of front–loading washing machines. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 1061–1072, 2018.
- [46] Q. D. Bui, Q. H. Nguyen and L. V. Hoang. A control system for MR damper–based suspension of front–loaded washing machines featuring magnetic induction coils and phase–lead compensator. *The 1st International Conference on Advanced Smart Materials and Structures*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2021, pp. 79–88.
- [47] B. Ebrahimi, M. B. Khamesee and M. F. Golnaraghi. Feasibility study of an electromagnetic shock absorber with position sensing capability. *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 2988–2991.
- [48] K. Rhinefrank, E. B. Agamloh, A. V. Jouanne, A. K. Wallace, J. Prudell, et al. Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy. *Renewable Energy*, Vol. 31, Issue 9, pp. 1279–1298, 2006.
- [49] Q. D. Bui, Q. H. Nguyen, T. T. Nguyen and D. D. Mai. Development of a magnetorheological damper with self–powered ability for washing machines. *Applied Sciences*, Vol. 10, Issue 12, 4099, 2020.
- [50] Q. D. Bui, Q. H. Nguyen, L. V. Hoang and D. D. Mai. A new self–adaptive magneto–rheological damper for washing machines. *Smart Materials and Structures*, Vol. 30, Issue 3, 037001, 2021.

[51] Q. D. Bui, L. V. Hoang, D. D. Mai and Q. H. Nguyen. Design and testing of a new shear-mode magneto-rheological damper with self-power component for front-loaded washing machines. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 860–866, 2021.

[52] D. Q. Bui, T. B. Diep, V. L. Hoang, D. D. Mai and H. Q. Nguyen. Design of a self-power magneto-rheological damper in shear mode for front-loaded washing machine. *Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ nhất về Động lực học và Điều khiển*, Da Nang City, Vietnam, 2019, pp. 297–303.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

Tap chí ISI

1. Q. D. Bui, Q. H. Nguyen, T. T. Nguyen and D. D. Mai. Development of a magnetorheological damper with self-powered ability for washing machines. *Applied Sciences*, Vol. 10, Issue 12, 4099, 2020.
2. Q. D. Bui, Q. H. Nguyen, L. V. Hoang and D. D. Mai. A new self-adaptive magneto-rheological damper for washing machines. *Smart Materials and Structures*, Vol. 30, Issue 3, 037001, 2021.
3. Q. D. Bui, Q. H. Nguyen, X. X. Bai and D. D. Mai. A new hysteresis model for magneto-rheological dampers based on Magic Formula. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, Issue 13, pp. 2437–2451, 2021.
4. Q. D. Bui, X. X. Bai and Q. H. Nguyen. Dynamic modeling of MR dampers based on quasi-static model and Magic Formula hysteresis multiplier. *Engineering Structures*, Vol. 245, 112855, 2021.

Tap chí Scopus

5. D. Q. Bui, V. L. Hoang, H. D. Le and H. Q. Nguyen. Design and evaluation of a shear-mode MR damper for suspension system of front-loading washing machines. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 1061–1072, 2018.
6. Q. D. Bui, L. V. Hoang, D. D. Mai and Q. H. Nguyen. Design and testing of a new shear-mode magneto-rheological damper with self-power component for front-loaded washing machines. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 860–866, 2021.
7. Q. D. Bui, Q. D. Do, L. V. Hoang, D. D. Mai and Q. H. Nguyen. Design and experimental evaluation of a novel damper for front-loaded washing machines featuring shape memory alloy actuator and wedge mechanism. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 873–878, 2021.

8. D. Q. Bui, H. Q. Nguyen, V. L. Hoang and D. D. Mai. Design and hysteresis modeling of a new damper featuring shape memory alloy actuator and wedge mechanism. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp.125–136, 2021.
9. Q. D. Bui and Q. H. Nguyen. A new approach for dynamic modeling of magneto–rheological dampers based on quasi–static model and hysteresis multiplication factor. *Mechanisms and Machine Science*, Vol. 113, pp. 733–743, 2021.

Tap chí khác

10. D. Q. Bui, T. B. Diep, H. D. Le, V. L. Hoang and H. Q. Nguyen. Hysteresis investigation of shear–mode MR damper for front–loaded washing machine. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 889, pp. 361–370, 2019.
11. Q. D. Bui and Q. H. Nguyen. Design and simulation of a new self–adaptive MR damper for washing machines featuring shear–mode and radial permanent magnets. *Science and Technology Development Journal*, Vol. 4, Issue 3, pp. 1–13, 2021.

Hội nghị khoa học

12. D. Q. Bui, T. B. Diep, V. L. Hoang, D. D. Mai and H. Q. Nguyen. Design of a self–power magneto–rheological damper in shear mode for front–loaded washing machine. *Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ nhất về Động lực học và Điều khiển*, Da Nang City, Vietnam, 2019, pp. 297–303.
13. Q. D. Bui, Q. H. Nguyen and L. V. Hoang. A control system for MR damper–based suspension of front–loaded washing machines featuring magnetic induction coils and phase–lead compensator. *The 1st International Conference on Advanced Smart Materials and Structures*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2021, pp. 79–88.