

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**DIỆP BẢO TRÍ**

**PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG PHẢN HỒI LỰC  
DÙNG LƯU CHẤT TỪ BIẾN**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ  
NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT**

Tp. Hồ Chí Minh, tháng .../2021

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**DIỆP BẢO TRÍ**

**PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG PHẢN HỒI LỰC  
DÙNG LƯU CHẤT TỪ BIẾN  
NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT - 9520101**

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

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

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Tp. Hồ Chí Minh, tháng .../2021

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Số: 944 /QĐ-ĐHSPKT

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM  
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 30 tháng 5 năm 2017

## QUYẾT ĐỊNH

Về việc đổi tên luận án và người hướng dẫn nghiên cứu sinh khóa 2015  
HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Quyết định số 118/2000/QĐ-TTg ngày 10 tháng 10 năm 2000 của Thủ tướng Chính phủ về việc thay đổi tổ chức của Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, tách Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh trực thuộc Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Căn cứ Quyết định số 70/2014/QĐ-TTg ngày 10/12/2014 của Thủ tướng Chính phủ về ban hành Điều lệ trường Đại học;

Căn cứ Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Thông tư số 05/2012/TT-BGDĐT ngày 15/02/2012 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc sửa đổi, bổ sung một số điều của Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ ban hành kèm theo Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Xét nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Xét đề nghị của Trường phòng Đào tạo,

### QUYẾT ĐỊNH

**Điều 1:** Đổi tên đề tài luận án tiến sĩ cho:

Nghiên cứu sinh : *Diệp Bảo Trí*

Ngành : Cơ kỹ thuật

Khoá: 2015 - 2018

Tên luận án mới : *Phát triển hệ thống phân hồi lực dùng lưu chất từ biển*

Người HD thứ nhất (HD chính): *PGS.TS Nguyễn Quốc Hưng*

Người HD thứ hai : *TS. Mai Đức Dãi*

Thời gian thực hiện : *05/10/2015 đến 05/10/2018*

**Điều 2:** Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo đã ban hành.

**Điều 3:** Trưởng các đơn vị: phòng Đào tạo, khoa quản ngành, phòng KHTC và các Ông (Bà) có tên ở Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký.

SAO Y

Nơi nhận:

- BGH (để chỉ đạo);

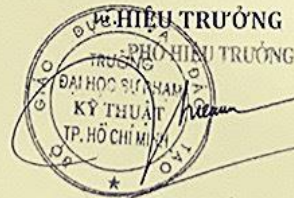
- Như điều 3;

- Lưu: VT, SDH (3b).

Số: .....*1210*.....  
Ngày: *25-05-2017*



TS. Trương Vĩnh An



PGS.TS. Lê Hiến Giang

---

## LỜI CAM ĐOAN

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

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

*Tp. Hồ Chí Minh, ngày ... tháng ... năm 2021*

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

Diệp Bảo Trí



---

## CẢM TẠ

Lời đầu tiên tôi xin trân trọng cảm ơn hai Thầy hướng dẫn luận án tiến sĩ đó là PGS.TS. Nguyễn Quốc Hưng và TS. Mai Đức Đãi, hai Thầy đã tận tình hướng dẫn, hỗ trợ tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu cũng như trong việc hoàn thành nội dung của luận án tốt nghiệp.

Đồng thời xin trân trọng cảm ơn Ban Giám Hiệu trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, phòng sau Đại học trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Ban Giám Hiệu trường Đại học Công nghiệp TP.HCM. Tôi xin chân thành cảm ơn Quý Thầy/Cô đã và đang giảng dạy tại Khoa Xây Dựng trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP.HCM đã giảng dạy, giúp đỡ và đóng góp ý kiến cho tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu của mình.

---

# TÓM TẮT

Tự động hóa là một khía cạnh quan trọng của Công nghiệp 4.0 nhằm cải thiện độ chính xác và năng suất. Để đánh giá hiệu quả và năng suất của quá trình sản xuất, có một số tiêu chí cần xem xét: tính ổn định, thời gian đáp ứng, tiêu thụ năng lượng, thân thiện với môi trường, chi phí và công nghệ... Tính cấp thiết áp dụng công nghệ 4.0 trong những môi trường làm việc độc hại chẳng hạn như lò phản ứng hạt nhân, phòng thí nghiệm hóa chất độc hại, dây chuyền sản xuất và pha chế thuốc trừ sâu, chữa cháy, các hoạt động chống khủng bố, bom mìn, và giải phẫu y tế. Hệ thống robot điều khiển từ xa đã được phát triển để giải quyết vấn đề này. Một trong những hệ thống đó là hệ thống chủ - tớ. Hệ thống này giải quyết các vấn đề với các tín hiệu phản hồi như vị trí, lực và mô men của các thành phần cuối của hệ thống điều khiển thụ động cho người vận hành để cải thiện độ chính xác và hoạt động linh hoạt của hệ thống. Hiện nay, các vật liệu thông minh và ứng dụng của chúng đang phát triển rất mạnh mẽ như Piezo, Electrorheological Fluid (ERF), Shape Memory Alloy (SMA) và Magneto-Rheological Fluid (MRF). Lưu chất từ tính (MRFs) là vật liệu thông minh được ứng dụng rộng rãi cho hệ thống phản hồi lực vì có những ưu điểm như đáp ứng nhanh, tiêu thụ năng lượng thấp, tạo lực và mô men lớn. Tuy nhiên, trong các hệ thống phản hồi lực sử dụng MRF vẫn còn một số tồn tại như kết cấu quá công kềnh do cơ cấu tác động đề xuất chưa được tối ưu hóa, lực ma sát ở trạng thái chưa được giải quyết. Vì vậy, trong luận án này, tác giả tập trung nghiên cứu và phát triển các cơ cấu mới có tính năng MRF để tạo ra mô men, lực có thể điều khiển được, sau đó được áp dụng trong các hệ thống phản hồi lực. Luận án bao gồm các nội dung chính sau:

- Phát triển MRF hai chiều dựa trên cơ cấu tác động BMRA cho hệ thống phản hồi lực. Lực để cung cấp mô men xoắn có điều khiển được hai hướng, có thể giảm được mô men ma sát ban đầu, giải quyết hiện tượng thắt nút cổ chai so với cơ cấu BMRA trước đây.

- 
- Tối ưu hóa các thông số hình học của cấu hình BMRA đề xuất bằng phương pháp tối ưu First Order. Bên cạnh đó, sử dụng tối ưu hóa đa mục tiêu NSGA để khảo sát tính ưu việt của cấu hình đề xuất so với cấu hình đã nghiên cứu trước đó.
  - Phát triển hệ thống joystick 3D phản hồi lực sử dụng các BMRA và phanh MRF tịnh tiến (LMRB) được đề xuất.
  - Xây dựng mô hình toán và các bộ điều khiển cho các hệ thống phản hồi lực để đánh giá khả năng của hệ thống.
  - Phát triển phanh sử dụng MRF (MRB) với rôto biên dạng phức tạp để có kích thước nhỏ gọn áp dụng cho tay máy xúc giác 3D.
  - Phát triển tay máy xúc giác 3D sử dụng MRB có biên dạng phức tạp và LMRB.

---

## ABSTRACT

Automation is a key aspect of Industry 4.0 to improve accuracy and productivity. To evaluate the efficiency and productivity of the production process, there are several criteria to take into consideration: stability, response time, energy consumption, environmental friendliness, cost, and technology... The urgency in the application of technology 4.0 is essential in hazardous working environments such as nuclear reactors, toxic chemical laboratories, pesticide production and preparation lines, fire fighting, anti-terrorism activities, mines, and clearance Medical surgery. Remote control robot systems have been developed to solve this problem. One of those systems is the master-slave system. This system solves problems with feedback signals such as position, force, and torque of the passive control system end components for the operator to improve accuracy and flexibility operation of the system. Currently, smart materials and their application have been developing very strongly such as Piezo, Electrorheological Fluid (ERF), Shape Memory Alloy (SMA), and Magneto-Rheological Fluid (MRF). Magnetic fluids (MRFs) are smart materials that are widely applied to force feedback systems because of their advantages such as fast response, low energy consumption, large force, and torque generation. However, in the force feedback systems using MRF, there are still some shortcomings such as the structure is too cumbersome because the proposed impact mechanism is not optimized, the friction force in the state has not been resolved. Therefore, in this thesis, the author focuses on research and development of new mechanisms featuring MRF to generate controllable torque/force, which is then implemented in the force feed-back system. The thesis includes following main contents:

- Development of a bidirectional MRF based actuator (BMRA) for the feedback system. Force to provide a controllable torque in both directions which can eliminate frictional torque, solving bottleneck problems compared to previous BMRA mechanisms.

- 
- Optimization of the geometric parameters of the proposed BMRA configuration by the First Order optimization method. Besides, using NSGA multi-target optimization to investigate the overall performance of the proposed configuration and compared to the previously studied configuration.
  - Development of a 3D-force-feedback joystick system using two of the proposed BMRAs and a linear braking featuring MRF (LMRB).
  - Constructing mathematic models and controllers for force feedback systems to evaluate the system's capabilities.
  - Development of MR brake (MRB) with a complex-shaped rotor to archive compact size for a 3D haptic manipulator.
  - Development of a 3D haptic manipulator featuring complex-shaped rotor MRBs and a LMRB.

---

# MỤC LỤC

Trang tự	TRANG
Quyết định giao đề tài	
Lời cam đoan.....	i
Cảm tạ .....	ii
Tóm tắt .....	iii
Mục lục.....	vii
Danh sách các chữ viết tắt.....	xi
Danh mục ký hiệu .....	xii
Danh sách các hình.....	xv
Danh sách các bảng.....	xx
<b>Chương 1. TỔNG QUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Giới thiệu về lưu chất từ biến.....	1
1.2 Đặc điểm MRF.....	1
1.2.1 Thành phần chính MRF.....	1
1.2.2 Nguyên lý hoạt động MRF.....	3
1.2.3 Các chế độ làm việc của MRF.....	4
1.3 Tình hình nghiên cứu hệ thống phản hồi lực hiện nay.....	8
1.3.1 Nghiên cứu trong nước.....	8
1.3.2 Nghiên cứu nước ngoài.....	9
1.4 Kết luận.....	15
1.5 Mục tiêu nghiên cứu.....	15
1.5.1 Mục tiêu chung.....	15
1.5.2 Mục tiêu cụ thể.....	15
1.6 Phạm vi nghiên cứu.....	16
1.7 Phương pháp nghiên cứu và cách tiếp cận.....	16
1.8 Tính mới của đề tài.....	16
<b>Chương 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT .....</b>	<b>18</b>
2.1 Các đặc tính cơ bản của MRF.....	18



---

2.2 Mô hình toán áp dụng cho MRF. ....	22
2.3 Tính toán mô men ma sát trong rãnh MRF. ....	24
2.3.1 Mô men ma sát trên rãnh mặt đầu (I). ....	25
2.3.2 Mô men ma sát trên rãnh mặt trụ ngoài (II). ....	26
2.3.3 Mô men ma sát trên rãnh nghiêng. ....	26
2.4 Lực ma sát trượt cơ cấu tuyến tính dùng MRF (LMRB). ....	27
2.5 Mô men ma sát giữa phốt cao su và trục. ....	28
2.5.1 Phốt cao su (Leafseal) với trục quay của phanh MRF. ....	28
2.5.2 O-ring với trục phanh tuyến tính MRF. ....	28
2.6 Phương pháp giải bài toán từ tính của MRF. ....	29
2.6.1 Phương pháp giải tích. ....	29
2.6.2 Phương pháp phần tử hữu hạn. ....	33
2.7 Cơ sở phương pháp tối ưu hoá. ....	34
2.7.1 Phân loại các bài toán tối ưu. ....	34
2.7.2 Các phương pháp tối ưu thông dụng. ....	34
2.7.2.1 Phương pháp giảm độ dốc (Gradient Descent - GD). ....	35
2.7.2.2 Phương pháp giải thuật di truyền (Genetic Algorithms - GA). ....	36
2.7.2.3 Giải thuật di truyền sắp xếp không vượt trội II (NSGA-II). ....	38
2.8 Cơ sở phương pháp điều khiển. ....	39
2.8.1 Bộ điều khiển PID (Proportional Integral Derivative). ....	39
2.8.2 Bộ điều khiển SMC (Sliding Mode Control). ....	42
2.8.2.1 Bộ điều khiển SMC theo luật tiếp cận mặt trượt. ....	44
2.8.2.2 Bộ điều khiển SMC theo tín hiệu điều khiển tương đương. ....	45
2.8.2.3 Bộ điều khiển SMC theo tham số cận trên. ....	46
<b>Chương 3. PHÁT TRIỂN CƠ CẤU HAI CHIỀU DÙNG MRF. ....</b>	<b>49</b>
3.1 Cơ cấu hai chiều dùng MRF (BMRA). ....	49
3.1.1 Mô hình BMRA của Nguyen P. B [56]. ....	49
3.1.2 Mô hình BMRA mới đề xuất. ....	50
3.1.2.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động BMRA. ....	51

---

---

3.1.2.2 Mô men ma sát đầu ra của các BMRA.....	51
3.2 Thiết kế tối ưu cho các BMRA. ....	55
3.2.1 Tối ưu hoá một mục tiêu cho BMRA. ....	57
3.2.2 Tối ưu hoá đa mục tiêu cho BMRA.....	66
3.3 Thiết kế và hoàn thiện hệ thống thí nghiệm BMRA2. ....	68
3.4 Kết quả thực nghiệm và đánh giá.....	70
<b>Chương 4. PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG JOYSTICK 3D PHẢN HỒI LỰC</b>	
<b>DÙNG MRF.....</b>	<b>76</b>
4.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của hệ joystick 3D.....	76
4.2 Tính toán mô men/lực của BMRA và LMRB.....	78
4.2.1 Tính toán mô men BMRA. ....	78
4.2.2 Tính toán lực hãm LMRB.....	80
4.3 Tính toán tối ưu hóa cho BMRA và LMRB. ....	81
4.3.1 Tối ưu hóa BMRA. ....	81
4.3.2 Tối ưu hóa LMRB.....	84
4.4 Phân tích lực của hệ thống phản hồi lực 3D. ....	86
4.5 Thiết kế, chế tạo hệ thống phản hồi lực 3D. ....	90
4.6 Thực nghiệm và kết quả mô men BMRA và lực LMRB.....	91
4.7 Điều khiển phản hồi lực cho hệ joystick 3D.....	97
4.7.1 Thiết kế bộ điều khiển vòng hở cho hệ phản hồi lực 3D.....	97
4.7.2 Thiết kế bộ điều khiển vòng kín cho hệ phản hồi lực 3D.....	100
<b>Chương 5. PHÁT TRIỂN TAY MÁY 3D PHẢN HỒI LỰC .....</b>	<b>110</b>
5.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.....	110
5.2 Thiết kế cơ cấu tác động cho tay máy phản hồi lực 3D.....	112
5.2.1 Thiết kế phanh biên dạng răng (MRB).....	112
5.2.1.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.....	112
5.2.1.2 Tính toán mô men MRB.....	113
5.2.2 Thiết kế phanh tuyến tính. ....	115
5.3. Tối ưu hóa phanh cho tay máy 3D.....	115

---

5.3.1 Tối ưu hoá MRB.....	115
5.3.2 Tối ưu hoá LMRB.....	118
5.4 Thiết kế, chế tạo hệ thống phản hồi lực 3D.....	119
5.4.1 Thiết kế MRB, LMRB.....	119
5.4.2 Hoàn thiện mô hình tay máy.....	120
5.5 Kết quả mô men của MRB và lực LMRB.....	121
5.6 Thiết kế bộ điều khiển cho tay máy 3D phản hồi lực.....	123
5.6 Kết quả thực nghiệm.....	125
<b>Chương 6. KẾT LUẬN.....</b>	<b>130</b>
6.1 Kết luận.....	130
6.2 Kiến nghị và hướng phát triển của đề tài.....	132
Tài liệu tham khảo.....	127
Danh mục công trình công bố.....	135
Phụ lục.....	136

---

## DANH SÁCH CÁC CHỮ VIẾT TẮT

APDL	Ansys Parametric Design Language
ABS	Anti-lock Braking System
BMRA	Bidirectional Magneto rheological Actuators
CCW	Counterclockwise
CW	Clockwise
DV	Design Variable
ERF	Electro Rheological Fluid
FEA	Finite Element Analysis
ITAE	Integral of Time-Weighted Absolute Error
GD	Gradient Descent
GUI	Graphical User Interface
MRB	Magneto Rheological Brake
MR	Magneto Rheological
MRC	Magneto Rheological Clutch
MRF	Magneto Rheological Fluid
NSGA-II	Non dominated Sorting Genetic Algorithm-II
LMRB	Linear Magneto Rheological Brake
LDVT	Linear Variable Displacement Transformer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PID	Proportional Integral Derivative
PSO	Particle Swarm Optimization
PTHH	Phần Tử Hữu Hạn.
SMA	Shape Memory Alloy
SMC	Slide Mode Control
SISO	Single Input-Single Output
2D	Two Dimensional
3D	Three Dimensional

---

## DANH MỤC KÝ HIỆU

$A_r$ :	Diện tích tiếp xúc của phốt
$B$ :	Mật độ từ trường qua khe lưu chất MR
$ch_1, ch_2$ :	Cạnh vát của cuộn dây LMRB
$d$ :	Kích thước khe lưu chất của phanh
$F_b$ :	Lực của LMRB
$F_{br}$ :	Lực LMRB yêu cầu lớn nhất
$F_{max}$ :	Lực phản hồi mong muốn lớn nhất
$F_{x2}, F_{y2}, F_{z2}$ :	Lực tác động của cơ cấu BMRA, LMRB
$F_{xp}, F_{yp}, F_{zp}$ :	Lực tại núm của cần điều khiển
$F_e$ :	Lực tiếp tuyến độ cao phản hồi mong muốn
$F_h$ :	Lực tiếp tuyến hông phản hồi mong muốn
$F_r$ :	Lực phản hồi mong muốn hướng kính
$F_{or}$ :	Lực ma sát giữa trục và phốt
$F_{sd}$ :	Lực phanh tuyến tính
$f_c$ :	Lực ma sát trên đơn vị chiều dài trục
$f_h$ :	Lực ma sát của vòng chặn
$h$ :	Chiều cao răng của phanh răng
$h_c$ :	Chiều cao cuộn dây
$h_{cl}$ :	Chiều cao cuộn dây LMRB
$I_r$ :	Dòng điện áp dụng cho cuộn dây của LMRB
$I_{sh}$ :	Dòng điện áp dụng cho cuộn dây MRB_02
$I_w$ :	Dòng điện áp dụng cho cuộn dây MRB_02
$L$ :	Chiều dài khe lưu chất của LMRB
$L_o$ :	Chiều dài bề mặt tiếp xúc của phốt với trục
$L$ :	Chiều dài khe hở nghiêng của phanh
$m_b$ :	Khối lượng phanh
$P_w$ :	Công suất tiêu thụ

---

$R_s$ :	Bán kính trục của phanh quay
$R_{sl}$ :	Bán kính trục của LMRB
$R_0$ :	Bán kính ngoài của đĩa phanh MR
$R_i$ :	Bán kính trong của đĩa
$R$ :	Bán kính của tay chủ động
$T_b$ :	Mô men phanh MRF
$T_{br}$ :	Mô men phanh yêu cầu
$T_c$ :	Mô men ma sát trên rãnh mặt trụ
$T_{Ei}$ :	Mô men ma sát trên rãnh thẳng của phanh răng
$T_{Ii}$ :	Mô men ma sát trên rãnh nghiêng của phanh răng
$T_s$ :	Lực ma sát của phốt phanh quay
$T_{sh}$ :	Mô men cần thiết MRB_02
$T_w$ :	Mô men cần thiết MRB_01
$t_d$ :	Độ dày của đĩa phanh
$t_0$ :	Độ dày vỏ phanh bên ngoài
$t_h$ :	Độ dày thành bên vỏ phanh
$t_{hi}$ :	Độ dày của vỏ phanh tuyến tính
$t_g$ :	Kích thước khe lưu chất của LMRB
$t_w$ :	Độ dày thành mỏng của vỏ
$V_d$ :	Thể tích của đĩa phanh
$V_h$ :	Thể tích của vỏ phanh
$V_{MR}$ :	Thể tích MRF
$V_s$ :	Thể tích của trục phanh
$V_c$ :	Thể tích của cuộn dây
$V$ :	Vận tốc tương đối giữa trục và vỏ của LMRB
$x_{Li}$ :	Giới hạn dưới của biến thiết kế hình học thứ i
$x_{Ui}$ :	Giới hạn trên của biến thiết kế hình học thứ i
$Y_0$ :	Thông số lưu biến của MRF khi không có từ trường
$Y_\infty$ :	Thông số lưu biến của MRF khi từ trường bão hòa

---



---

$w_c$ :	Bề rộng cuộn dây của MRB.
$w_{cl}$ :	Bề rộng cuộn dây của LMRB
$\alpha_{SY}$ :	Chỉ số mô men bão hòa thông số lưu biến Y của MRF
$\tau$ :	Ứng suất chảy dẻo của MRF
$\mu$ :	Độ nhớt trung bình sau chảy dẻo của MRF
$\phi$ :	Góc nghiêng của MRF
$\Omega$ :	Vận tốc góc của trục phanh
$\rho_d$ :	Khối lượng riêng của đĩa phanh
$\rho_h$ :	Khối lượng riêng của vỏ phanh
$\rho_{MR}$ :	Khối lượng riêng của MRF
$\rho_s$ :	Khối lượng riêng của trục phanh
$\rho_c$ :	Khối lượng riêng của cuộn dây
$\tau_y$ :	Ứng suất chảy dẻo trung bình
$\theta$ :	Góc nâng

---

# DANH SÁCH CÁC HÌNH

HÌNH	TRANG
Hình 1.1: Thành phần chính MRF .....	2
Hình 1.2: Các trạng thái của MRF .....	4
Hình 1.3: Chế độ van của MRF [22].....	5
Hình 1.4: Van MRF. [24] .....	6
Hình 1.5: Chế độ cắt của MRF [22].....	6
Hình 1.6: Mẫu thiết kế của E. Garcia [28] .....	7
Hình 1.7: Chế độ nén của MRF [29].....	7
Hình 1.8: Van MRF dựa trên chế độ nén [30] .....	8
Hình 1.9: Mô hình tay máy 3 bậc tự do [32].....	9
Hình 1.10: Mô hình phản hồi lực K. H. Kim [35].....	10
Hình 1.11: Mô hình găng tay Scott Winter [36] .....	10
Hình 1.12: Găng tay phản hồi lực dùng phanh MRF [37] .....	11
Hình 1.13: Mô hình thử nghiệm của Berk Gonenc [38] .....	11
Hình 1.14: Mô hình thử nghiệm Dapeng Chen [39] .....	12
Hình 1.15: Mô hình thử nghiệm Dapeng Chen [40] .....	12
Hình 1.16: Mô hình phản hồi lực joystick 2D [41].....	13
Hình 1.17: Mô hình phản hồi lực 2D của Nguyen P. B [42] .....	14
Hình 1.18: Hệ thống phản hồi lực 4 DOF [43] .....	14
Hình 2.1: Sơ đồ biến dạng của chuỗi hạt MRF .....	18
Hình 2.2: Quan hệ giữa B-H [46].....	20
Hình 2.3: Mô hình lưu chất Newton và Bingham [5] .....	23
Hình 2.4: Kết cấu phanh MRF biên dạng phức tạp.....	24
Hình 2.5: Kết cấu phanh MRF đĩa đơn .....	25
Hình 2.6: Kết cấu MRB.....	27
Hình 2.7: Phần tử tính toán của MRF .....	27
Hình 2.8: Kết cấu của LMRB.....	28

---

<b>Hình 2.9:</b> Mô hình tính toán mạch từ của BMRA.....	31
<b>Hình 2.10:</b> Sơ đồ các phương pháp tối ưu.....	35
<b>Hình 2.11:</b> Lưu đồ giải thuật GA .....	38
<b>Hình 2.12:</b> Sơ đồ hàm bão hòa.....	48
<b>Hình 3.1:</b> Cơ cấu hai chiều dùng BMRA_[56] .....	50
<b>Hình 3.2:</b> Cấu hình BMRA1 .....	50
<b>Hình 3.3:</b> Cấu hình BMRA2 .....	50
<b>Hình 3.4:</b> Thông số hình học BMRA1 .....	52
<b>Hình 3.5:</b> Thông số hình học BMRA2 .....	54
<b>Hình 3.6:</b> Lưu đồ tối ưu hóa bằng phương pháp First Order .....	58
<b>Hình 3.7:</b> Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA_[56] .....	60
<b>Hình 3.8:</b> Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA1 .....	60
<b>Hình 3.9:</b> Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA2.....	61
<b>Hình 3.10:</b> Phân bố mật độ từ thông của BMRA_[56] .....	61
<b>Hình 3.11:</b> Phân bố mật độ từ thông của BMRA1 .....	62
<b>Hình 3.12:</b> Phân bố mật độ từ thông của BMRA2.....	62
<b>Hình 3.13:</b> Kết quả tối ưu hóa của BMRA_[56] .....	63
<b>Hình 3.14:</b> Kết quả tối ưu hóa của BMRA1 .....	63
<b>Hình 3.15:</b> Kết quả tối ưu hóa của BMRA2.....	64
<b>Hình 3.16:</b> Quan hệ $T_b - m_b$ .....	66
<b>Hình 3.17:</b> Quan hệ $T_b - P_w$ .....	66
<b>Hình 3.18:</b> Quan hệ $T_b - R$ .....	66
<b>Hình 3.19:</b> Quan hệ $T_b - L$ .....	66
<b>Hình 3.20:</b> Lưu đồ tối ưu hóa đa mục tiêu áp dụng NSGA-II .....	67
<b>Hình 3.21:</b> Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu .....	68
<b>Hình 3.22:</b> Mô hình CAD của BMRA2 .....	68
<b>Hình 3.23:</b> Mô hình thực nghiệm của BMRA2.....	69
<b>Hình 3.24:</b> Hệ thống thực nghiệm của BMRA2.....	70
<b>Hình 3.25:</b> Mô men đầu ra của BMRA ở trạng thái tắt.....	71

---

<b>Hình 3.26:</b> Biểu đồ dòng điện .....	72
<b>Hình 3.27:</b> Kết quả mô men đầu ra .....	72
<b>Hình 3.28:</b> Mô men đầu ra và dòng điện áp dụng .....	72
<b>Hình 3.29:</b> Biểu đồ dòng điện .....	73
<b>Hình 3.30:</b> Kết quả mô men đầu ra .....	73
<b>Hình 3.31:</b> Mô men đầu ra và dòng điện áp dụng .....	73
<b>Hình 3.32:</b> Mô men xoắn đầu ra của BMRA2 .....	74
<b>Hình 3.33:</b> Mô men xoắn đầu ra bằng không .....	74
<b>Hình 4.1:</b> Sơ đồ động hệ thống joystick 3D phản hồi lực .....	77
<b>Hình 4.2:</b> Cấu hình của BMRA .....	78
<b>Hình 4.3:</b> Cấu hình của LMRB .....	80
<b>Hình 4.4:</b> Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA .....	82
<b>Hình 4.5:</b> Kết quả tối ưu hóa của BMRA .....	83
<b>Hình 4.6:</b> Mô hình PTHH phân tích mạch từ LMRB .....	85
<b>Hình 4.7:</b> Kết quả tối ưu của LMRB .....	85
<b>Hình 4.8:</b> Phân bố từ thông ở mức tối ưu LMRB .....	86
<b>Hình 4.9:</b> Sơ đồ động học của cần điều khiển .....	86
<b>Hình 4.10:</b> Bản vẽ CAD của BMRA .....	90
<b>Hình 4.11:</b> Mô hình CAD của LMRB .....	90
<b>Hình 4.12:</b> Mô hình CAD của hệ joystick 3D .....	91
<b>Hình 4.13:</b> Mô hình chế tạo joystick 3D .....	91
<b>Hình 4.14:</b> Mô hình thực nghiệm hệ thống phản hồi lực 3D .....	92
<b>Hình 4.15:</b> Mô men xoắn của các BMRA ở trạng thái ban đầu .....	93
<b>Hình 4.16:</b> Mô men đầu ra của BMRA <sub>x</sub> là một hàm của dòng điện .....	94
<b>Hình 4.17:</b> Dòng điện như hàm mô men đầu ra của BMRA <sub>x</sub> .....	95
<b>Hình 4.18:</b> Mô men đầu ra BMRA <sub>y</sub> là hàm của dòng điện áp dụng .....	95
<b>Hình 4.19:</b> Dòng điện là hàm của mô men đầu ra BMRA <sub>y</sub> .....	96
<b>Hình 4.20:</b> Lực phanh của LMRB với dòng điện áp dụng .....	97
<b>Hình 4.21:</b> Dòng điện áp dụng với độ lớn lực đầu ra của LMRB .....	97

---

<b>Hình 4.22:</b> Lưu đồ điều khiển hở cho lực phản hồi tiếp tuyến .....	98
<b>Hình 4.23:</b> Lưu đồ điều khiển hở cho lực phản hồi thông thường .....	98
<b>Hình 4.24:</b> Kết quả thực nghiệm phản hồi lực tiếp tuyến .....	99
<b>Hình 4.25:</b> Kết quả thực nghiệm của lực phản hồi hệ 3D .....	100
<b>Hình 4.26:</b> Kết quả nhận dạng BMRA với đầu vào là hàm sin .....	102
<b>Hình 4.27:</b> Đáp ứng bước của BMRA .....	102
<b>Hình 4.28:</b> Đáp ứng bước của BMRA .....	103
<b>Hình 4.29:</b> Đáp ứng bước của LMRB .....	103
<b>Hình 4.30:</b> Lưu đồ điều khiển vòng kín của lực mong muốn .....	104
<b>Hình 4.31:</b> Kết quả thực nghiệm phản hồi lực theo PID .....	106
<b>Hình 4.32:</b> Kết quả phản hồi lực theo SMC .....	108
<b>Hình 5.1:</b> Cấu hình tay máy phản hồi lực 3D .....	111
<b>Hình 5.2:</b> Sơ đồ động tay máy phản hồi lực cầu 3D .....	111
<b>Hình 5.3:</b> Kích thước tổng quát hệ thống tay máy 3D .....	102
<b>Hình 5.4:</b> Cấu tạo phanh quay rãnh nghiêng .....	113
<b>Hình 5.5:</b> Sơ đồ tính mô men MRB .....	113
<b>Hình 5.6:</b> Kết cấu phanh tuyến tính cho hệ tay máy 3D .....	115
<b>Hình 5.7:</b> Mô hình PTHH phân tích mạch từ MRB .....	116
<b>Hình 5.8:</b> Phân bố mật độ từ thông của MRB .....	117
<b>Hình 5.9:</b> Khối lượng và mô men phanh .....	117
<b>Hình 5.10:</b> Mô hình PTHH phân tích mạch từ LMRB .....	118
<b>Hình 5.11:</b> Phân bố mật độ từ thông của MRB .....	118
<b>Hình 5.12:</b> Khối lượng và mô men của LMRB .....	119
<b>Hình 5.13:</b> Mô hình CAD của MRB .....	119
<b>Hình 5.14:</b> Mô hình CAD của LMRB .....	120
<b>Hình 5.15:</b> Chi tiết chế tạo của MRB và LMRB .....	120
<b>Hình 5.16:</b> Mô hình thực tế tay máy 3D .....	120
<b>Hình 5.17:</b> Mô hình thực nghiệm tay máy phản hồi lực 3D .....	121
<b>Hình 5.18:</b> Mô men MRB_01 .....	122

---

---

<b>Hình 5.19:</b> Mô men MRB_02 .....	122
<b>Hình 5.20:</b> Lực hãm của LMRB.....	122
<b>Hình 5.21:</b> Lưu đồ bộ điều khiển lực tiếp tuyến MRB .....	123
<b>Hình 5.22:</b> Lưu đồ bộ điều khiển lực LMRB.....	123
<b>Hình 5.23:</b> Quan hệ mô men MRB_01 với dòng điện .....	124
<b>Hình 5.24:</b> Quan hệ mô men MRB_02 với dòng điện .....	124
<b>Hình 5.25:</b> Quan hệ mô men LMRB với dòng điện.....	125
<b>Hình 5.26:</b> Kết quả thực nghiệm của hệ phản hồi lực.....	126
<b>Hình 5.27:</b> Kết quả thực nghiệm MRB_01 .....	127
<b>Hình 5.28:</b> Kết quả thực nghiệm MRB_02 .....	128
<b>Hình 5.29:</b> Kết quả thực nghiệm LMRB.....	128



---

## DANH SÁCH CÁC BẢNG

BẢNG	TRANG
<b>Bảng 1.1:</b> Thành phần của các MRF của hãng Lord Corporation (Mỹ) .....	3
<b>Bảng 2.1:</b> Giá trị thông số lưu biến của MRF .....	24
<b>Bảng 2.2:</b> Tác động của việc thay đổi các hệ số tỷ lệ.....	41
<b>Bảng 2.3:</b> Hệ số $K_P$ , $K_I$ , $K_D$ theo phương pháp Ziegler-Nichols .....	42
<b>Bảng 3.1:</b> Vật liệu và khối lượng riêng của chi tiết BMRA.....	56
<b>Bảng 3.2:</b> Kết quả tối ưu của các BMRA .....	64
<b>Bảng 4.1:</b> Kết quả tối ưu của BMRA .....	84
<b>Bảng 4.2:</b> Kết quả tối ưu của LMRB.....	86
<b>Bảng 4.3:</b> Thông số điều chỉnh của $k_P$ , $k_I$ , $k_D$ .....	105
<b>Bảng 4.4:</b> Thông số điều chỉnh của $c$ , $k$ .....	107
<b>Bảng 5.1:</b> Kết quả tối ưu của phanh quay MRF.....	118
<b>Bảng 5.2:</b> Kết quả tối ưu LMRB .....	119

# Chương 1

## TỔNG QUAN

### 1.1 Giới thiệu về lưu chất từ biến.

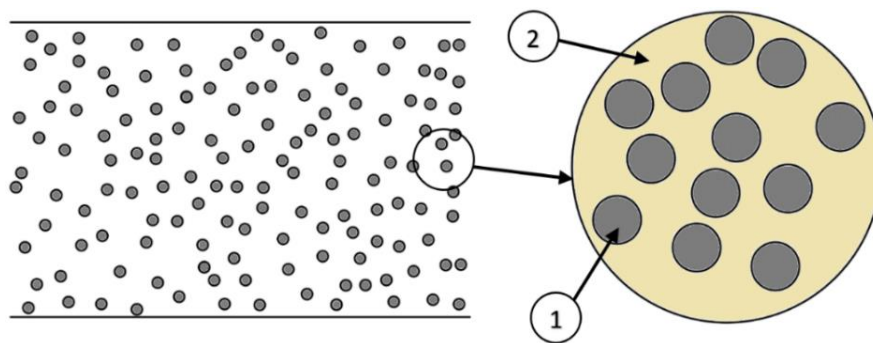
Lưu chất từ biến (Magneto Rheological Fluid – MRF) là một dạng lưu chất thay đổi các tính chất lưu biến như độ nhớt, ứng suất chảy dưới tác dụng của từ trường, là một trong số các loại vật liệu thông minh (Smart Materials) thông dụng trong kỹ thuật. Lưu chất này có khả năng chuyển từ trạng thái lỏng sang dạng trạng thái sệt (Semisolid) khi có từ trường đi qua lưu chất. MRF đã được Jacob Rabinow nghiên cứu tại Cục tiêu chuẩn quốc gia Hoa Kỳ vào cuối những năm 1940s [1]. MRF bao gồm chất lỏng nền, các hạt từ tính phân cực và chất phụ gia. Các hạt từ tính phân cực có vai trò cơ bản trong các hiệu ứng của từ trường bên ngoài đưa vào. Chất phụ gia được dùng để giảm bớt sự lắng đọng của các hạt từ tính, vì sự lắng đọng của hạt từ tính ảnh hưởng khá lớn đến khả năng lưu biến của MRF. Đặc điểm từ tính của MRF bao gồm ứng suất chảy dẻo, độ nhớt sau chảy dẻo và độ lắng đọng [2, 3]. Tính lưu biến này phụ thuộc vào các tham số biến đổi khác nhau như tỷ trọng hạt từ tính, loại hạt từ tính, mật độ các hạt từ tính, cường độ từ trường, nhiệt độ, tính chất của chất lỏng nền và loại chất phụ gia [4]. Tính lưu biến của MRF như độ nhớt, tính đàn hồi hay tính dẻo của MRF phụ thuộc vào từ trường đi qua lưu chất. Khi từ trường đi qua lưu chất thì các đặc tính của MRF được biểu diễn qua mô hình Bingham [5].

Tuy đã được phát minh từ những năm 1940s, nhưng mãi đến những năm 1990s thì MRF mới được ứng dụng và phát triển mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực như công nghiệp ô tô, hàng không vũ trụ, kỹ thuật xây dựng, an ninh quốc phòng, quang học, điện - điện tử, kỹ thuật y khoa, robot, viễn thông, hệ thống điều khiển từ xa, trong các môi trường khắc nghiệt...

### 1.2 Đặc điểm MRF.

#### 1.2.1 Thành phần chính MRF.

MRF gồm ba thành phần chính đó là: hạt từ tính (1), chất lỏng nền (2), chất phụ gia, được thể hiện bởi **Hình 1.1**



**Hình 1.1:** Thành phần chính MRF.

✚ Các hạt từ tính của MRF hiện nay được sử dụng như sắt, hợp kim sắt, oxit sắt, nitrat sắt, cacbua sắt, sắt carbonyl, niken và coban [6, 7]. Trong đó hạt phản ứng từ thường được sử dụng để chế tạo MRF là sắt carbonyl. Ứng suất cực đại của MRF đạt được khi cường độ từ trường áp dụng vào MRF làm cho bão hòa từ của các hạt từ tính được xác lập. Do đó, vật liệu từ tính có độ tinh khiết cao như bột sắt carbonyl được xem là pha từ tính chính cho hầu hết các sản phẩm MRF trong thực tế [8]. Khác với sắt carbonyl, hợp kim FeCo và hợp kim FeNi cũng được sử dụng làm vật liệu từ biến, nhờ vậy Fe góp phần vào bão hòa từ cao. Ngược lại, một số vật liệu sắt từ như Mn-Zn Ferrite, Ni-Zn Ferrite và gốm Ferrites có bão hòa từ thấp nên chỉ thích hợp cho các ứng dụng ứng suất thấp [6]. Kích thước hạt từ tính trong MRF thường nằm trong khoảng 0,1-10  $\mu\text{m}$ .

✚ Chất lỏng nền được sử dụng trong MRF có thể là dầu silicon, dầu khoáng, dầu parafin, dầu thủy lực, chất lỏng hữu cơ như halogen, diesters, polyoxyalkylen, silic fluoride, nước và dầu hydrocarbon tổng hợp [7]. Trong các bằng sáng chế trước, các nhà phát minh đã sử dụng các hạt từ tính phân tán trong dầu hydrocarbon có tỷ trọng nhẹ [9] là chất lỏng, chất làm mát, khí chống oxy hóa, dầu mỡ bán rắn [1] và dầu Silicon, chất lỏng Clo, Fluoride [10].

Khi các hạt từ tính lắng đọng thì đáp ứng của MRF bị suy giảm đáng kể. Do đó để giảm sự lắng đọng thì các sản phẩm mới của MRF được xem xét trên các pha liên tục của độ nhớt [11] từ đó độ ổn định được cải thiện rất nhiều. Ngoài ra, một MRF hỗn hợp đã được giới thiệu bởi Pan và các cộng sự [12], với sự kết hợp của các hạt sắt, gelatine và chất lỏng nền. Họ đã chỉ ra rằng các đáp ứng của MRF vượt trội dưới

cường độ từ trường thấp và có độ ổn định tốt hơn so với chỉ dùng carbonylpowder sắt nguyên chất.

✚ Chất phụ gia thêm vào nhằm làm giảm sự lắng đọng của các hạt từ tính trong MRF [13]. Hiện tượng lắng đọng có thể gây ra hiện tượng suy giảm độ nhớt của MRF [14]. Khi sự lắng đọng của MRF tăng lên thì dưới tác động của ứng suất cao và tốc độ cắt cao trong một thời gian dài làm cho chất lỏng sẽ đặc lại [15]. Hiện tượng lắng đọng này sẽ làm giảm hiệu suất của MRF, khi đó các hạt của lưu chất lắng xuống tạo thành một lớp cứng, bao gồm các hạt sơ cấp liên kết chắc chắn dẫn tới hình thành chuỗi không hoàn chỉnh [16]. Lớp phủ polymer cho các hạt từ tính cũng ảnh hưởng đến khả năng từ tính của các hạt, nhưng nó lại làm cho các hạt từ tính dễ dàng phân tán lại sau khi từ trường không tác dụng [17, 18]. Tuy nhiên, cũng làm suy giảm ứng suất cắt của MRF khi thêm nhiều lớp phủ polymer [19, 20]. Ngoài ra, một số chất phụ gia được thêm vào MRF để cải thiện khả năng chống oxy hóa hoặc chống mài mòn. Các thành phần trên sẽ tạo thành một hỗn hợp đồng nhất mà nó quyết định đến ứng suất chảy dẻo lớn nhất, độ từ thẩm. Vì vậy, nếu có sự khác nhau về tỷ lệ các thành phần trên sẽ cho ra các loại MRF khác nhau như **Bảng 1.1**.

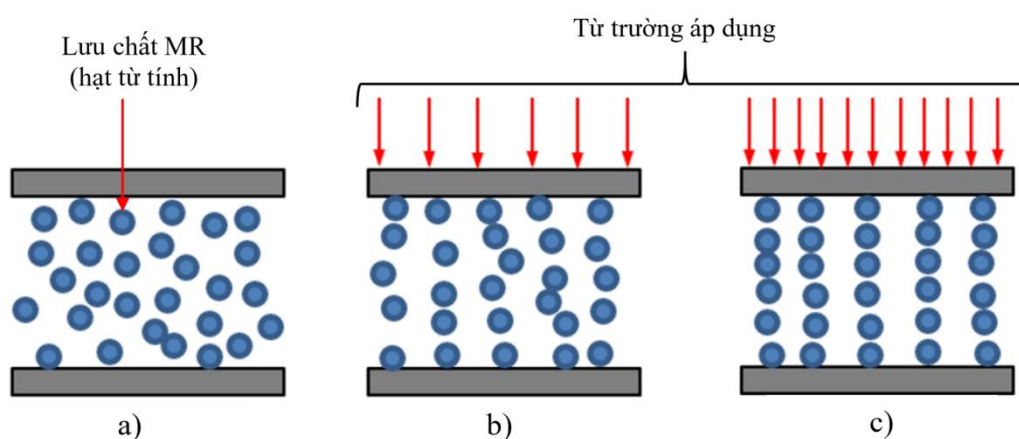
**Bảng 1.1:** Thành phần các MRF của hãng Lord Corporation (Mỹ).

Loại MRF	MRF-122EG	MRF-132DG	MRF-140CG
Độ nhớt (Pa.s), (40 °C)	0,042 ± 0,020	0,112 ± 0,02	0,280 ± 0,070
Tỷ trọng (g/cm <sup>3</sup> )	2,28	2,98	3,54
Tỷ lệ hạt từ (%)	72	80,98	85,44
Nhiệt độ hoạt động (°C)	- 40 đến + 150		
Cường độ từ trường (kA/m)	150 - 250		
Ứng suất dẻo (kPa)	50 - 100		
Thời gian đáp ứng	Vài ms		

### 1.2.2 Nguyên lý hoạt động MRF.

Khi MRF ở trạng thái bình thường (khi từ trường không đi qua MRF), các hạt từ tính chuyển động tự do, MRF ứng xử như lưu chất Newton (**Hình 1.2 a**). Khi MRF ở trạng thái có tác dụng của từ trường bên ngoài vào thì các hạt từ tính sẽ gắn kết và sắp xếp lại với nhau theo hình dạng phân bố của đường sức từ. Các hạt từ này có khả

năng chống lại sự phá vỡ liên kết, làm cho lưu chất sệt lại. Khi cường độ từ trường ở mức thấp thì sự phân bố các hạt từ tính chưa rõ ràng (**Hình 1.2 b**), còn khi cường độ từ trường cao thì sự phân bố các hạt từ tính sẽ định hình rõ ràng hơn (**Hình 1.2 c**). Khả năng liên kết của các hạt từ tính phụ thuộc rất lớn vào cường độ từ trường bên ngoài tác dụng vào MRF.

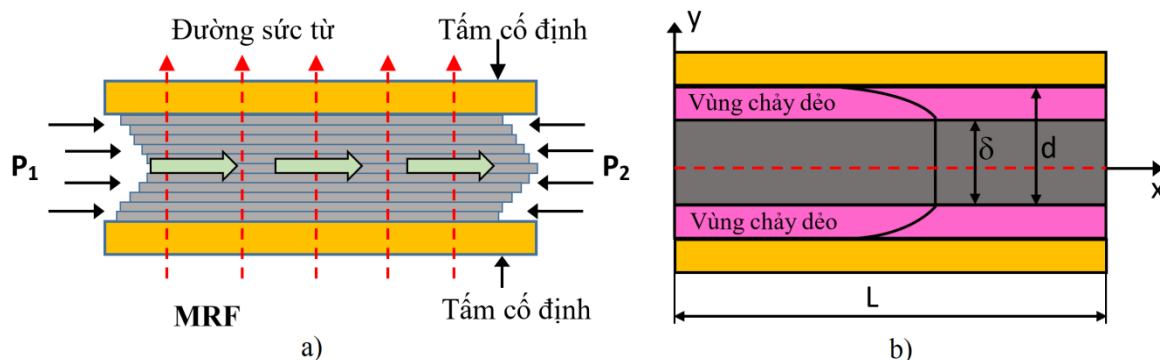


**Hình 1.2:** Các trạng thái MRF.

### 1.2.3 Các chế độ làm việc của MRF.

Dựa vào đặc tính của MRF thì có ba chế độ làm việc của MRF đã được nghiên cứu [21] đó là: chế độ dòng chảy (*valve mode*), chế độ trượt (*shear mode*) và chế độ nén (*squeeze mode*).

✚ **Chế độ dòng chảy:** chế độ dòng chảy được sử dụng thiết kế van MRF, trong đó dòng chảy của MRF được bố trí ở giữa các tấm đứng yên biểu diễn bởi **Hình 1.3**. Từ trường được đưa từ ngoài vào có hướng vuông góc với hướng của dòng chảy của MRF (**Hình 1.3 a**), nhằm để thay đổi các tính chất lưu biến của MRF để kiểm soát dòng chảy. Do đó, sự gia tăng ứng suất hoặc độ nhớt làm thay đổi cấu hình vận tốc của chất lỏng giữa hai tấm cố định. Biên dạng vận tốc điển hình với mô hình dẻo Bingham của chế độ van được thể hiện bởi **Hình 1.3 b**



**Hình 1.3:** Chế độ dòng chảy của MRF [22].

Với **Hình 1.3 b** thì biên dạng vận tốc chứa vùng trước chảy dẻo, trong đó độ dốc vận tốc bằng không trên vùng cấm. Cấu hình vận tốc của MRF giữa hai bản song song được biểu diễn bằng quan hệ sau [44]:

$$u_1(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{\Delta P}{KL} \right)^{1/n} \left[ \left( \frac{d-\delta}{2} \right)^{1+1/n} + \left( \frac{2y+\delta}{2} \right)^{1+1/n} \right] \quad (1-1)$$

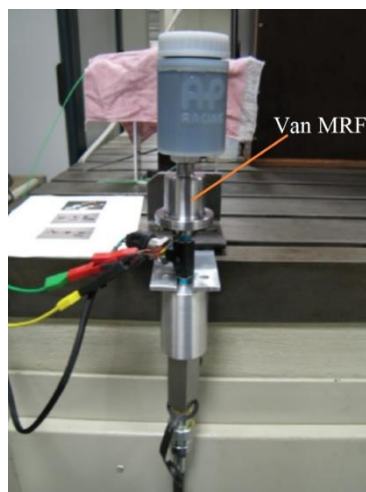
$$u_2(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{\Delta P}{KL} \right)^{1/n} \left( \frac{d-\delta}{2} \right)^{1+1/n} \quad (1-2)$$

$$u_3(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{\Delta P}{KL} \right)^{1/n} \left[ \left( \frac{d-\delta}{2} \right)^{1+1/n} - \left( \frac{2y-\delta}{2} \right)^{1+1/n} \right] \quad (1-3)$$

Trong đó:  $n = 1$ ,  $u_1$  và  $u_3$  là biên dạng vận tốc của các vùng dòng chảy sau chảy dẻo tiếp giáp với các tấm chắn,  $u_2$  là biên dạng vận tốc trên miền gần vùng trung tâm hay vùng cấm;  $\delta$  là độ dày vùng cấm là tham số chính của dòng chảy. Khi vùng cấm tăng thì độ dày trước chảy dẻo cũng tăng, do đó hạn chế dòng chảy qua ống dẫn, làm gia tăng sụt áp. Chế độ van được sử dụng nhiều trong ứng dụng như bộ giảm chấn, van và các bộ truyền động [23].

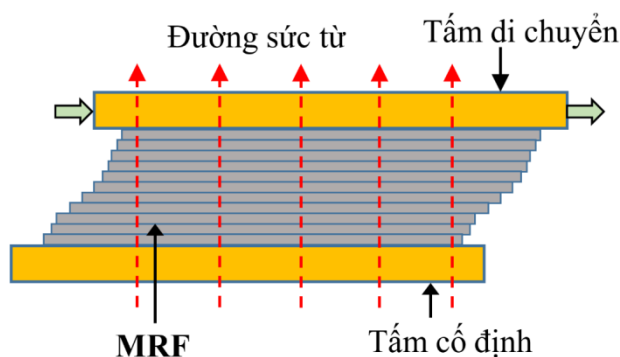
A. Grunwald [24] và các cộng sự đã thiết kế chế tạo cơ cấu van dùng lưu chất MRF132-AD. Với áp suất được kiểm soát giảm xuống nhỏ 0,05 MPa tại 5 cm<sup>3</sup>/s. Độ trễ của van cao lên đến 25 ms, cụ thể là cần 150 ms để giảm áp suất từ 1,0 Mpa xuống 0,25 Mpa và khoảng 200 ms để giảm từ 1,7 MPa xuống 0,25 MPa. Tuy nhiên, khả năng đáp ứng và thời gian phản hồi cần cải thiện hơn nữa, có thể được sử dụng MRF loại khác đáp ứng tốt hơn, nghiên cứu này làm cơ sở cho các nghiên cứu phát triển trong tương lai sau này.





**Hình 1.4:** Van MRF. [24].

✚ *Chế độ cắt:* ở chế độ này thì MRF nằm giữa hai bề mặt, theo đó một mặt trượt hoặc xoay so với mặt kia, với từ trường được đặt vuông góc với hướng chuyển động của các bề mặt được thể hiện trên **Hình 1.5**.

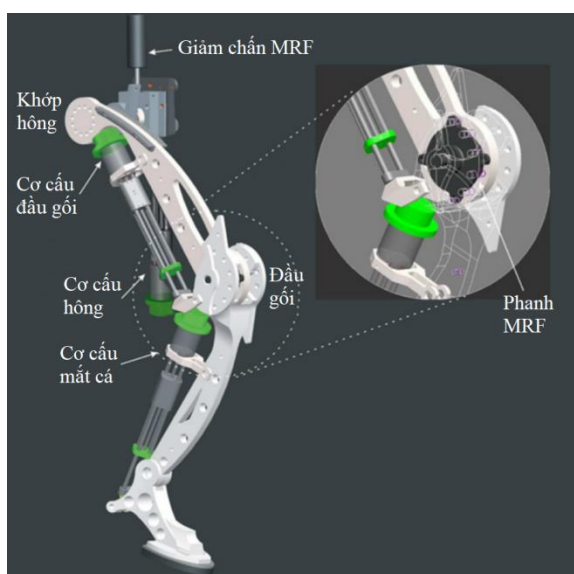


**Hình 1.5:** Chế độ cắt của MRF [22].

Spencer và cộng sự [25] đã cải tiến mô hình trễ của Bouc-Wen trong thiết kế giảm chấn MR. Hơn nữa, Wereley và cộng sự [26] đã đề xuất một cách tiếp cận không giới hạn để mô hình hóa các loại giảm chấn khác nhau (chế độ tuyến tính, quay và giảm chấn). Lee và các cộng sự [27] đề xuất mô hình cắt Herschel- Bulkley để phân tích hiệu suất của các hệ thống giảm xóc chủ động. Chế độ cắt được sử dụng trong thiết kế giảm chấn, phanh, ly hợp...

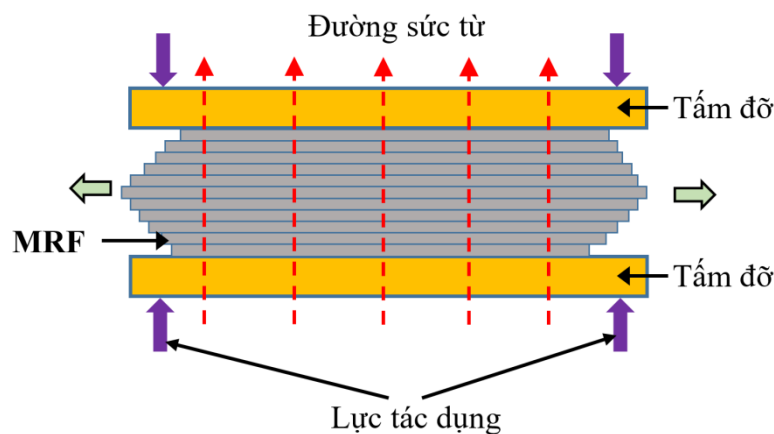
E. Garcia và các cộng sự [28] phát triển một mẫu chân ngựa giả biểu diễn bởi **Hình 1.6** bao gồm giảm chấn MRF (MRD), phanh MRF (MRB) và các khớp đặc biệt

nhằm mô tả lại hoạt động của chân con ngựa. Ưu điểm của hệ này giảm được 20% lực hãm đầu gối khi hoạt động. Tuy nhiên mức tiêu hao năng lượng tương đối lớn.



**Hình 1.6:** Mẫu thiết kế của E. Garcia [28].

✚ **Chế độ nén:** chế độ nén của MRF thể hiện trong **Hình 1.7**. Chế độ nén hoạt động khi hướng lực tác dụng lên các tấm cùng hướng của từ trường nhằm để giảm hoặc mở rộng khoảng cách giữa các tấm song song gây ra trong dòng chảy.



**Hình 1.7:** Chế độ nén của MRF [29].

Các chuyển vị trong chế độ nén tương đối rất nhỏ (vài milimet) nhưng đòi hỏi lực lớn. Do đó, các nghiên cứu có hệ thống đã được thực hiện bởi nhiều nhà nghiên cứu để đánh giá các tính chất cơ học và điện của MRF trong dòng chảy nén. Mặc dù trên thực tế là mô hình dẻo Bingham được sử dụng để mô tả hoạt động của chất lỏng MRF ở chế độ cắt.

Kulkarni [29] không khuyến khích sử dụng mô hình đó ở chế độ nén. Các tham số được thử nghiệm từ chế độ cắt không được dùng trong tính toán ứng xử MRF ở chế độ nén. Ứng suất được tạo ra bởi chế độ nén là ứng suất cao nhất trong số các chế độ của MRF và được sử dụng trong các trường hợp rung động giảm xóc với biên độ thấp và lực tác động lớn. Trong cách ly dao động của hệ thống, dao động không mong muốn trong dải tần số tương đối cao có thể suy giảm bằng cách sử dụng các cơ cấu sử dụng MRF.

Zhang Li và các cộng sự [30] đã thiết kế chế tạo van giảm áp sử dụng MRF, khả năng giảm áp suất lên đến 10,8 Mpa với dòng điện cung cấp cho cuộn dây là 1,0 A và tỷ lệ tiêu thụ điện năng thấp 1/400. Do đó, thiết bị này cung cấp một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho các hệ thống thủy lực hoặc cơ điện tử, nhưng hiệu suất nhất thời và độ trễ của thiết bị cũng là những hạn chế.



**Hình 1.8:** Van MRF dựa trên chế độ nén [30].

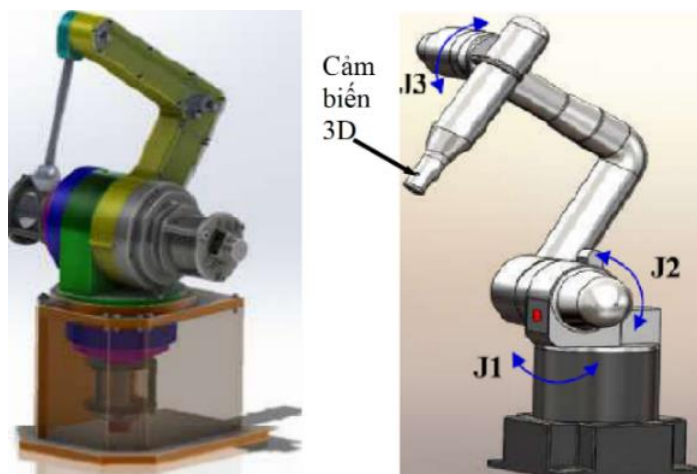
### 1.3 Tình hình nghiên cứu hệ thống phản hồi lực hiện nay.

#### 1.3.1 Nghiên cứu trong nước.

Hiện nay, các nghiên cứu liên quan đến hệ thống phản hồi lực trong nước còn ít quan tâm, như nghiên cứu liên quan hệ tay máy Master và Slave sao chép chuyển động điều khiển từ xa (Tele-Manipulator) của tác giả Từ Diệp Công Thành [31]. Nghiên cứu này tập trung vào thuật toán điều khiển hệ thống, áp dụng bộ điều khiển PID kết hợp với mạng thần kinh nhân tạo. Chức năng điều khiển chỉ thực hiện sao

chép chuyển động. Các thiết bị nghiên cứu của đề tài chỉ là mô hình thí nghiệm nhỏ, không đề cập đến việc ứng dụng trong môi trường thực tế. Ngoài ra, đề tài chỉ giới hạn việc sao chép vị trí mà không đề cập đến việc phản hồi thông tin về lực từ cơ cấu chấp hành của tay máy slave lên người điều khiển.

Nguyễn Ngọc Điệp và cộng sự [32] đã thực hiện đề tài “*Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình tay máy sao chép chuyển động và phản hồi lực*” biểu diễn bởi **Hình 1.9**. Nghiên cứu [32] là một tay máy công nghiệp 3 bậc tự do dạng elbow (khớp nối), tay máy Master được thiết kế là sao chép lại kích thước chuỗi động của tay máy bị động. Bằng việc sử dụng bộ điều khiển PID, hệ thống sao chép chuyển động từ tay máy Master qua tay máy Slave rất tốt, tuy nhiên khả năng phản hồi lực từ lúc đầu làm việc của tay máy Slave lên người điều khiển tay máy Master chưa tốt do lực ma sát lớn và do bài toán ngược để xác định mô men tại các khớp của tay máy không có lời giải tường minh.



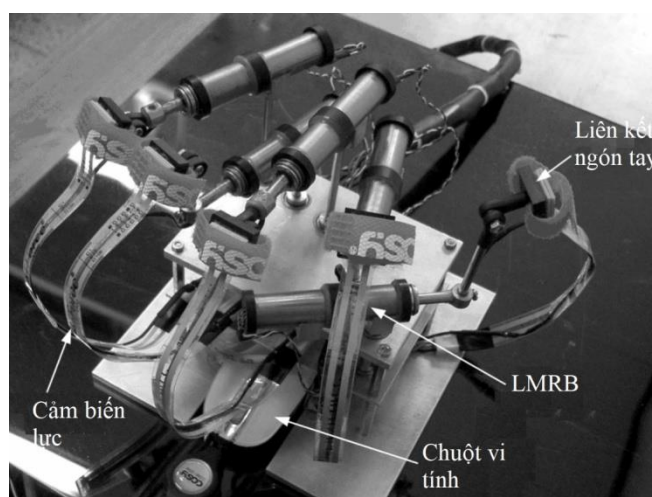
**Hình 1.9:** Mô hình tay máy 3 bậc tự do [32]

### 1.3.2 Nghiên cứu nước ngoài.

Hiện nay trên thế giới đã có rất nhiều nghiên cứu về cơ cấu phản hồi lực và một số nghiên cứu đã được thương mại hóa. Trước đây, hầu hết các cơ cấu phản hồi lực đều sử dụng các động cơ điện và cơ cấu khí nén để phản ánh lực và mô men trong môi trường làm việc lên người điều khiển [33, 34]. Nhược điểm cơ bản của hệ thống phản hồi dùng động cơ điện, khí nén là kết cấu cồng kềnh, thời gian đáp ứng chậm, tính cơ động không cao. Trong những năm gần đây, với những phát triển mạnh mẽ

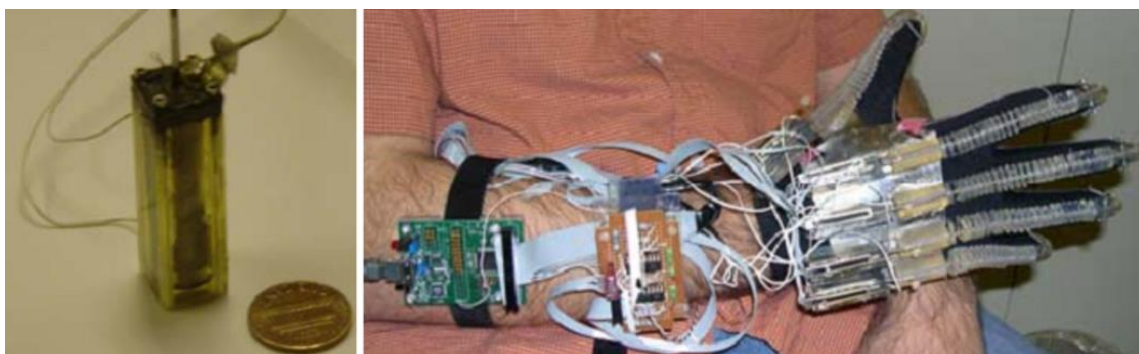
của việc nghiên cứu và ứng dụng vật liệu thông minh đặc biệt là MRF, đã có một số nghiên cứu về cơ cấu phản hồi lực dùng MRF.

K. H. Kim và các cộng sự [35] đã nghiên cứu và chế tạo bàn tay phản hồi lực 5 bậc tự do dùng 5 phanh MRF thẳng (**Hình 1.10**). Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, hệ thống phản hồi lực có khả năng phản hồi lực lên các ngón tay người điều khiển tương đối tốt lên tới 8 N nhưng lực tĩnh ban đầu (Off-state force) khá lớn 2 N, điều này ảnh hưởng rất lớn đến sự phản ánh trung thực lực tác động đến tay người điều khiển.



**Hình 1.10:** Mô hình phản hồi lực K. H. Kim [35].

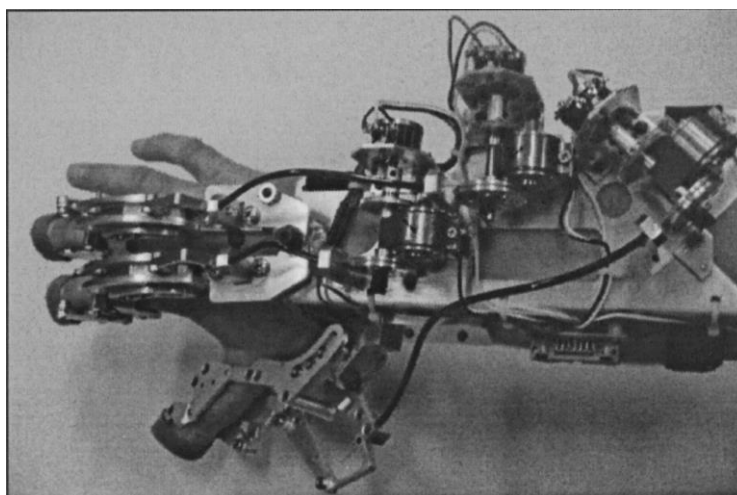
Scott Winter và Mourad Bouzit [36] đã nghiên cứu chế tạo găng tay phản hồi lực dùng 5 cơ cấu phanh MRF thẳng (**Hình 1.11**). Kích thước cơ bản của mỗi phanh MRF là 50x12x12 mm, lực lớn nhất tạo ra là 6 N. Tuy kết cấu đã nhỏ gọn hơn, nhưng lực đầu ban không tác động của cơ cấu này vẫn còn khá lớn 1,5 N.



**Hình 1.11:** Mô hình găng tay Scott Winter [36].

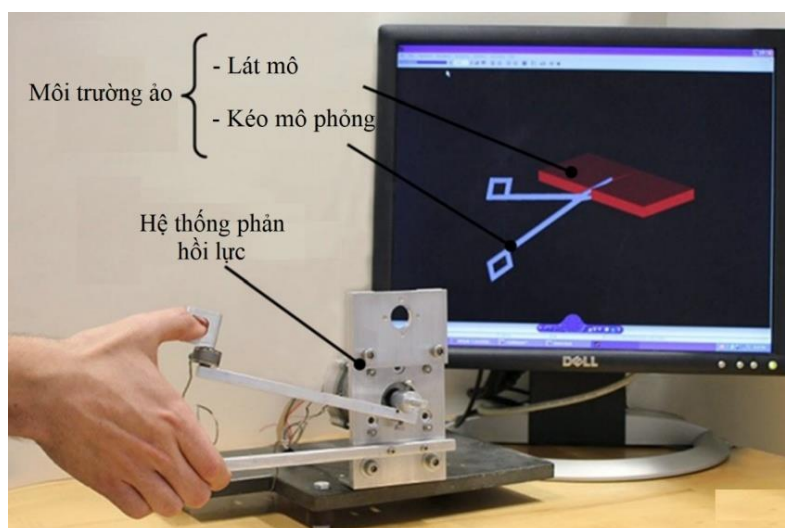


Conrad Bullion và Hakan Gurocak [37] đã nghiên cứu chế tạo găng tay phản hồi lực dùng 3 cơ cấu phanh MRF dạng quay để phản hồi lực lên ngón cái, ngón trỏ và ngón giữa của người điều khiển (**Hình 1.12**). Kích thước cơ bản của mỗi phanh MRF là  $D = 25 \text{ mm}$ ,  $L = 15 \text{ mm}$ , lực lớn nhất tạo ra là 17 N tại đầu các ngón tay.



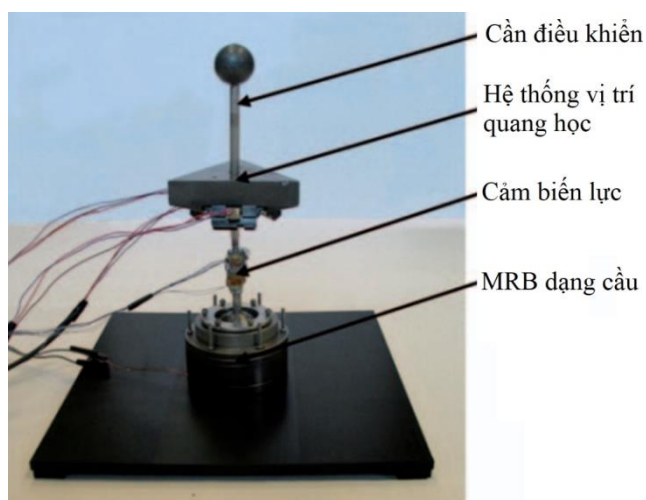
**Hình 1.12:** Găng tay phản hồi lực dùng phanh MRF [37].

Berk Gonenc [38] đã phát triển hệ phản hồi hỗn hợp bao gồm phanh MRF dạng tang trống kết hợp với động cơ DC servo thể hiện bởi **Hình 1.13**. Hệ thống này mô phỏng lại việc cắt mô cho các loại kéo phẫu thuật nhưng chỉ có một bậc tự do nên chưa thể áp dụng cho các thao tác phức tạp của việc phẫu thuật từ xa. Thiết kế này sau khi tối ưu hình học có mô men của phanh đạt 1,5 Nm còn cả hệ tối đa là 1,77 Nm.



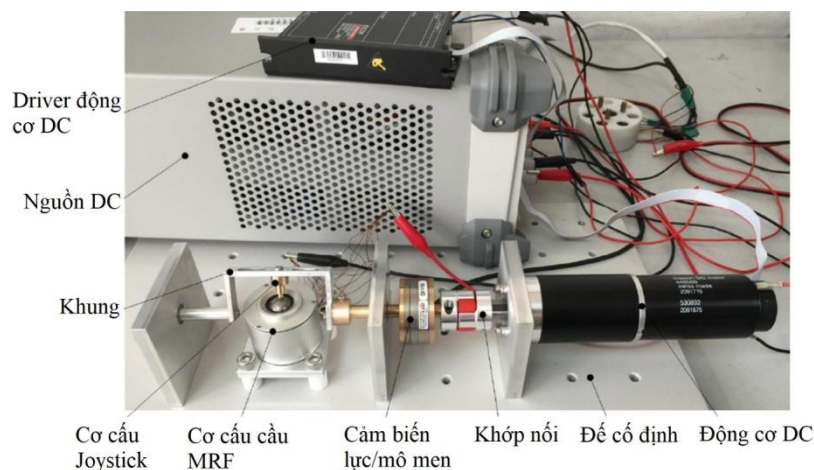
**Hình 1.13:** Mô hình thử nghiệm của Berk Gonenc [38].

Doruk Senkal và cộng sự [39] đã nghiên cứu chế tạo cơ cấu khớp quay phản hồi lực đa hướng dùng phanh MRF dạng cầu biểu diễn bởi **Hình 1.14**. Đường kính quả cầu phanh là  $D = 76,2 \text{ mm}$  mô men tạo ra lên đến 3,7 Nm. Tuy nhiên, hệ này không thể điều khiển mô men riêng rẽ theo mỗi phương, kết cấu phức tạp và lực tác động không phản hồi lên tay người điều khiển.



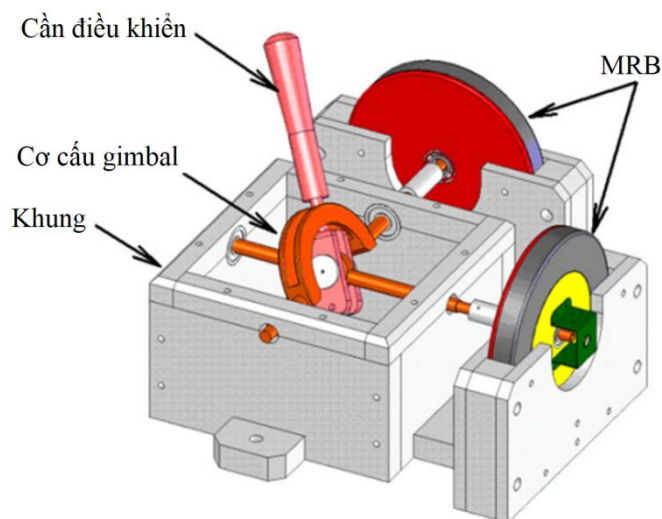
**Hình 1.14:** Cơ cấu phản hồi lực dùng phanh MRF cầu [39].

Dapeng Chen và các cộng sự [40] đã phát triển cơ cấu phản hồi lực dạng cầu 3D dùng MRF thể hiện bởi **Hình 1.15**. Nghiên cứu [40] có ưu điểm hơn [39] là kết cấu nhỏ gọn hơn mô men đầu ra cao hơn cụ thể là 5,9 N, hệ này có thể khống chế tất cả các bậc tự do và điều khiển lực theo nhiều hướng. Vì vậy, cơ cấu này chỉ phù hợp với môi trường ảo phức tạp và thích hợp với điều khiển đa hướng. Tuy nhiên hệ vẫn còn nhược điểm đó là lực ma sát ban đầu khá lớn lên tới 4 N.



**Hình 1.15:** Mô hình thử nghiệm Dapeng Chen [40].

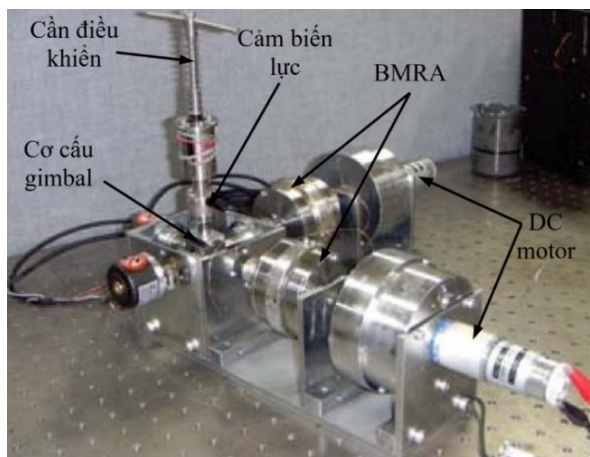
Li W. H cùng các cộng sự [41] đã đưa ra cơ cấu phản hồi lực joystick 2D với hai phanh quay sử dụng MRF thể hiện bởi **Hình 1.16**. Các phanh này có thông số cơ bản là  $D = 156 \text{ mm}$ ,  $L = 21 \text{ mm}$ , mô men tạo ra từ 0,7 Nm đến 6 Nm. Các phanh được sử dụng vẫn là các phanh truyền thống (các cuộn dây quấn ở vỏ ngoài) và việc tối ưu hoá hình học chưa được xem xét nên kết cấu phanh còn khá lớn. Trong nghiên cứu này, tác giả đã sử dụng các MRB để tạo mô men phản hồi, người điều khiển chỉ cảm nhận được lực tác động khi thực hiện chuyển động cần điều khiển do vậy khi cần điều khiển không chuyển động lực tác động không phản hồi lên tay người điều khiển.



**Hình 1.16:** Mô hình phản hồi lực joystick 2D [41].

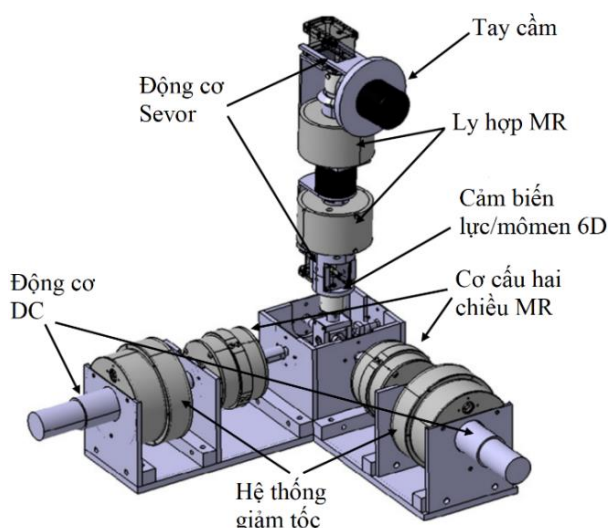
Nguyen P. B và các cộng sự [42] đã thiết kế và chế tạo cơ cấu joystick 2D biểu diễn bởi **Hình 1.17** có phản hồi lực, sử dụng cơ cấu quay hai chiều dùng MRF. Đối với hệ này thì mô men ma sát có thể được khử và hệ thống có thể phản ánh được mô men rất nhỏ lên tay người điều khiển do đó người điều khiển có thể cảm nhận được lực tác động ngay cả khi cần điều khiển không chuyển động. Tuy nhiên vẫn như các nghiên cứu trước kia, kiểu quấn dây truyền thống (cuộn dây bố trí ở mặt trụ của vỏ) dẫn tới hiện tượng thất nút cổ chai và việc tối ưu hoá hình học chưa được xem xét nên kết cấu hai chiều còn khá lớn, mô men phản hồi không cao (1,2 Nm).





**Hình 1.17:** Mô hình phản hồi lực 2D của Nguyen P. B [42].

Oh J S và các cộng sự [43] đã thiết kế và chế tạo hệ thống điều khiển có phản hồi lực 4 DOF ứng dụng vào hệ thống phẫu thuật biểu diễn bởi **Hình 1.18**. Về bản chất, nghiên cứu này là sự phát triển tiếp theo của nghiên cứu do Nguyen P B [42] và các cộng sự thực hiện. Oh J S và các cộng sự đã sử dụng lại cơ cấu joystick 2D được đề xuất bởi Nguyen P B [42] để phản ánh mô men lắc trong mặt phẳng đứng (pitch) và mô men quay (roll) của rô bốt phẫu thuật, bên cạnh đó bố trí thêm hai ly hợp dùng MRF (MRC) để phản ánh mô men lắc trong mặt phẳng ngang (yaw) và lực tiếp cận dọc theo hướng mũi của dụng cụ phẫu thuật. Tuy nhiên, vẫn như các nghiên cứu trước đây, mô men của phanh dùng trong nghiên cứu này không cao nhỏ hơn 2 Nm. Hơn nữa việc gắn một khối lượng lớn lên cần điều khiển cũng gây sai lệch rất lớn lực phản hồi đến tay người điều khiển do ảnh hưởng của trọng lực và lực quán tính.



**Hình 1.18:** Hệ thống phản hồi lực 4 DOF [43].

## 1.4 Kết luận.

Thông qua tình hình nghiên cứu, ứng dụng của MRF trong thực tế, mô hình toán và cơ sở lý thuyết tính toán cho MRF được nghiên cứu khá nhiều bởi các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước. Trên cơ sở cơ cấu hai chiều của Nguyen P. B [56], chúng tôi nghiên cứu phát triển cơ cấu tác động hai chiều mới sử dụng MRF có những ưu điểm mới và khắc phục được một số nhược điểm của cơ cấu Nguyen P. B [56]. Từ cơ cấu hai chiều mới kết hợp với phanh MRF tuyến tính đã được nghiên cứu trước đó nhóm phát triển một hệ thống joystick 3D phản hồi lực có những tính năng mới đáp ứng được một số yêu cầu của hệ thống phản hồi lực.

Bên cạnh đó, tác giả còn đề xuất cấu hình phanh lưu chất MR mới (MRB) có biên dạng đĩa phanh phức tạp nhằm giảm khối lượng phanh và tăng mô men đầu ra. Từ đó một hệ thống tay máy 3D phản hồi lực được xây dựng và phát triển cho các ứng dụng điều khiển từ xa sau này.

Tất cả các cơ cấu tác động được đề xuất đều được tiến hành phân tích, tính toán, tối ưu hóa các thông số hình học kết hợp với ràng buộc của hệ thống. Việc chế tạo và thực nghiệm kiểm tra kết quả thực tế của các cơ cấu so với mô phỏng được tiến hành. Các hệ thống phản hồi lực sử dụng cơ cấu đề xuất được xây dựng và điều khiển để đảm bảo lực phản hồi như mong muốn.

## 1.5 Mục tiêu nghiên cứu.

### 1.5.1 Mục tiêu chung.

Phát triển hệ thống phản hồi lực 3D với các cơ cấu tác động dùng MRF có khả năng:

- Có khả năng phản hồi chính xác lực 3D ( $F_x, F_y, F_z$ ) lên tay người điều khiển.
- Giảm thiểu tối đa ảnh hưởng của lực ma sát lên tay người điều khiển.
- Đánh giá khả năng đáp ứng của hệ thống phản hồi lực.

### 1.5.2 Mục tiêu cụ thể.

- Phát triển cơ cấu tác động hai chiều (BMRA) dùng MRF có khả năng khử ma sát ban đầu với khối lượng của cơ cấu là nhỏ nhất ứng với mô men đầu ra là lớn nhất theo yêu cầu của hệ thống phản hồi lực thông dụng.

- Phát triển phanh MRF tuyến tính (LMRB) có khả năng kiểm soát lực dọc trục để áp dụng trong các hệ thống phản hồi lực.
- Phát triển hệ thống phản hồi lực 3D dựa vào sự kết hợp của BMRA và LMRB.
- Phát triển phanh MRF biên dạng răng (MRB) với mục đích là giảm khối lượng và tăng mô men đầu ra của MRB.
- Phát triển tay máy phản hồi lực 3D dựa vào sự kết hợp của MRB và LMRB.

### 1.6 Phạm vi nghiên cứu.

- Hệ thống phản hồi lực 3D.
- Lưu chất nghiên cứu là MRF132-DG
- Vật liệu chế tạo C45, Inox 304.
- Tốc độ điều khiển chậm khoảng 2 rad/s.
- Bộ điều khiển áp dụng PID, SMC.

### 1.7 Phương pháp nghiên cứu và cách tiếp cận.

- Phương pháp số: ứng dụng các phương pháp tối ưu như phương pháp đạo hàm bậc nhất, phương pháp tối ưu toàn cục, phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu NSGA-II. Sử dụng bộ điều khiển đơn giản PID, điều khiển hiện đại SMC, Noron, Fuzzy để điều khiển lực phản hồi mong muốn.
- Đối tượng nghiên cứu là các cơ cấu tác động sử dụng MRF được ứng dụng trong các hệ thống phản hồi lực cụ thể là BMRA, LMRB, MRB.
- Các kết quả tối ưu và thực nghiệm trên mô hình thực tế được so sánh với các nghiên cứu trước để kiểm tra tính đúng đắn và độ tin cậy của phương pháp đề xuất, cụ thể đó là khối lượng, mô men đầu ra, tiêu hao năng lượng, khả năng ứng dụng của các hệ thống đề xuất.

### 1.8 Tính mới của đề tài.

Các điểm mới của nghiên cứu này so với các nghiên cứu trước:

- Phát triển cơ cấu quay hai chiều MRF loại mới khắc phục được một số nhược điểm của các cơ cấu hai chiều trước đây như: hiện tượng thắt cổ chai của đường sức từ; khử mô-men ma sát ban đầu; thời gian đáp ứng nhanh phù hợp cho áp dụng trong hệ thống phản hồi lực.

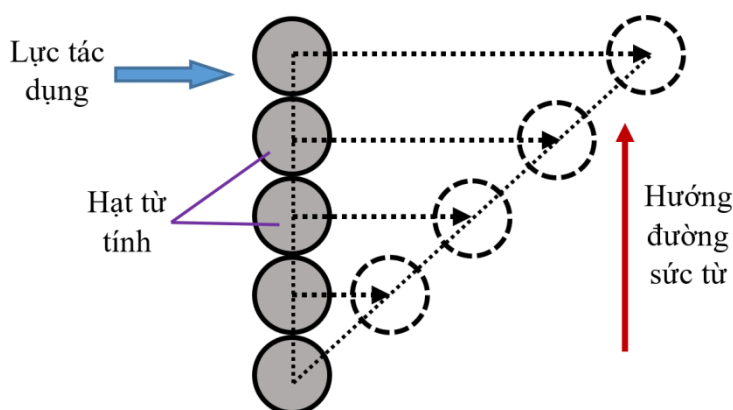
- Kết hợp các phương pháp tối ưu hiện đại NSGA-II với công cụ của ANSYS để giải quyết bài tối ưu đa mục tiêu đó là khối lượng cực tiểu và mô men cực đại của cơ cấu hai chiều áp dụng cho hệ thống phản hồi lực.
- Phát triển cơ cấu phanh MRF với rôto biên dạng răng nhằm tăng mô men phanh, giảm khối lượng để áp dụng trên các tay máy phản hồi lực.
- Thiết kế, chế tạo, xây dựng mô hình toán học, điều khiển và thực nghiệm hệ thống tay máy tọa độ cầu phản hồi lực dùng hai phanh quay MRF (MRB) và một phanh tịnh tiến MRF (LMRB).
- Thiết kế, chế tạo, xây dựng mô hình toán học, điều khiển và thực nghiệm hệ thống joystick phản hồi lực 3D dùng hai cơ cấu quay hai chiều MRF (BMRA) và một phanh tịnh tiến MRF.
- Một đóng góp nữa của đề tài tuy không có nhiều ý nghĩa khoa học nhưng rất có ý nghĩa thực tiễn đó là việc xây dựng mô hình thí nghiệm. Hệ thống thí nghiệm do tác giả xây dựng có thể được sử dụng cho các nghiên cứu tiếp theo về hệ thống phản hồi lực.

## Chương 2

# CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1 Các đặc tính cơ bản của MRF.

🌈 *Đặc tính từ tính tĩnh*: là một trong đặc tính rất quan trọng để áp dụng cho bất kỳ cơ cấu nào sử dụng MRF, được đặc trưng bởi quan hệ giữa mật độ từ thông ( $B$ ) với cường độ từ trường ( $H$ ), độ trễ của MRF. Thông qua các đặc tính từ tính của MRF, chúng ta có thể dự đoán được ứng suất cắt của MRF phụ thuộc vào dòng điện áp dụng cho cơ cấu. Dưới ảnh hưởng của từ trường, một mô hình toán được xây dựng để dự đoán ứng xử của MRF. Mô hình này dựa trên một khối gồm các chuỗi các hạt được sắp xếp theo một đường thẳng theo hướng của đường sức từ [44] như **Hình 2.1**. Các chuỗi hạt từ tính được coi là biến dạng cùng khoảng cách giữa các cặp lân cận trong chuỗi và tăng cùng tốc độ khi MRF biến dạng. Mô hình này khá đơn giản vì các chuỗi trong thực tế được hình thành từ một số khối tổng hợp nhỏ gọn hơn, trong đó được cấu thành dưới dạng hình trụ. Dưới ứng suất cắt thì các chuỗi này biến dạng và cuối cùng bị phá vỡ. Phương trình chuyển động của mỗi hạt dưới một từ trường là cần thiết để đánh giá tính chất khối của MRF.



**Hình 2.1:** Sơ đồ biến dạng của chuỗi hạt MRF.

Ở một từ trường rất thấp, tenxơ lực từ  $F_{ij}$  thu được dưới dạng lưỡng cực của các tương tác của các cặp, mô men từ lưỡng cực gây ra bởi các hạt khác và các vùng xung quanh hình thành nên một khối không bị biến dạng và bị cô lập dưới một từ trường đồng nhất được đưa ra bởi [45].

Khi đó  $F_{ij}$  được xác định như sau:

$$F_{ij} = \frac{3}{4\pi\mu_p\mu_0} \left[ m^2 \frac{r_{ij}}{r_{ij}^5} - 5(mr_{ij})^2 \frac{r_{ij}}{r_{ij}^7} + 2(mr_{ij})m \frac{1}{r_{ij}^5} \right] \quad (2-1)$$

Trong đó:

- $F_{ij}$  là tenxơ lực từ tác dụng lên hạt thứ  $i$  tới  $j$ ;
- $\mu_p$  là độ thấm từ của hạt từ tính;
- $\mu_0$  là độ thấm chân không;
- $r_{ij}$  là vị trí từ hạt  $j$  đến  $i$ ;

Mô men từ lưỡng cực ( $m_t$ ) gây ra của các hạt trong MRF được tính toán bởi [21]:

$$m_t = 4\pi \cdot \mu_f \mu_0 \beta a^3 \cdot H \quad (2-2)$$

Trong đó:  $H$ : cường độ từ trường;

$a$  : đường kính của các hạt từ tính;

$\mu_f$ : độ thấm đặc trưng của chất lỏng nền.

$$\beta = \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_b + 2\mu_f} \quad (2-3)$$

Ở từ trường cao, cường độ của mô men được coi là lưỡng cực độc lập khi từ hóa của các hạt đạt đến bão hòa. Trong trường hợp này, mô men từ được tính toán bởi [50].

$$m_t = \frac{4}{3} \pi a^2 \mu_s M_s \quad (2-4)$$

Với  $\mu_s M_s$  là từ hóa bão hòa của hạt, đối với sắt khoảng  $1,7 \times 10^6$  A/m và đối với MRF là  $0,48 \times 10^6$  A/m.

Từ tính của MRF đại diện khả năng cho phép từ thông chạy qua lưu chất, đặc trưng bởi độ từ thẩm  $\mu$ . Độ từ thẩm  $\mu$  là tỉ lệ giữa mật độ từ thông ( $B$ ) và cường độ từ trường ( $H$ ) đi qua vật liệu.

$$B = \mu \cdot H \quad (2-5)$$

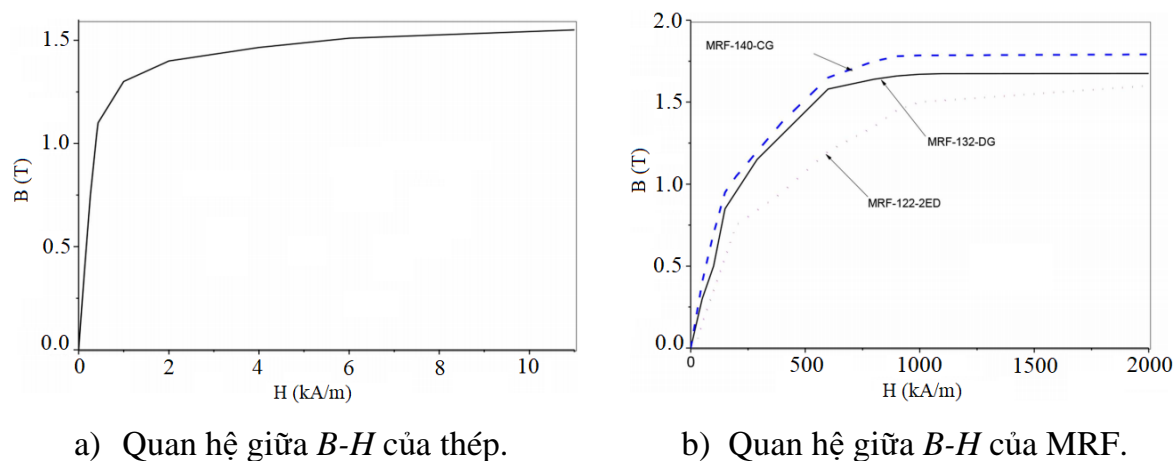
Với  $B$ : mật độ từ thông;

$H$ : cường độ từ trường;

$\mu$ : độ từ thẩm.

Trong thực tế, độ từ thẩm  $\mu$  không phải là một hằng số nên đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa  $B$  và  $H$  là một hàm phi tuyến biểu diễn bởi **Hình 2.2**. Từ đây ta cũng

nhận ra rằng, một yếu tố không kém phần quan trọng khi nói về từ tính của MRF đó chính là độ bão hòa từ. Độ bão hòa từ là khả năng từ hóa cực đại của MRF.



**Hình 2.2:** Quan hệ giữa  $B-H$  [46].

Khi MRF ở trạng thái bão hòa từ thì lúc đó cho dù cường độ từ trường có tăng lên bao nhiêu đi nữa thì mật độ từ thông vẫn đạt một giá trị cực đại lúc bão hòa từ. Thông thường MRF có độ bão hòa từ trong khoảng 1,65 T (Tesla). Từ tính của MRF chịu ảnh hưởng nhiều yếu tố như mật độ các hạt từ tính, khả năng từ hóa của các hạt từ tính, nhiệt độ...

Để xác định được từ trường đi qua khe MRF, ta có thể gia công một khe đủ nhỏ sao cho cảm biến hall có thể đặt vào vị trí đó. Từ trường đi qua khe lưu chất sẽ đi qua cảm biến hall, từ đó thiết bị đọc dữ liệu từ cảm biến hall sẽ xác định từ trường tại vị trí đó. Tuy nhiên, trong thực tế việc đo từ trường chỉ được thực hiện trước khi bơm MRF vào, do đó mục đích chính là kiểm tra khả năng tạo ra từ trường của các cuộn dây. Mặt khác, mô men được xác định từ các yếu tố độ nhớt, ứng suất cắt... mà các thông số này phụ thuộc vào từ trường, nên thay vì đo từ trường trực tiếp thì ta có thể thông qua mô men đầu ra thực tế để xác định được hiệu suất tạo ra từ trường. Lưu ý khe hở gắn cảm biến hall phải vừa khít với cảm biến hall nếu khe hở lớn thì từ trường không đi qua được mà chạy đường khác như vậy đo không chính xác.

**Đặc tính độ nhớt:** khi MRF ở trạng thái không có từ trường thì độ nhớt đóng vai trò quan trọng nó quyết định đến vận tốc, mô men đầu ra của thiết bị hay cơ cấu tác động, đồng thời còn ảnh hưởng đến nhiệt độ của thiết bị. Độ nhớt của MRF chịu

ảnh hưởng bởi hai yếu tố đó là độ nhớt của chất lỏng nền và mật độ các hạt từ tính. Đây cũng là một trong những thông số lưu biến được sử dụng để xác định đặc tính ứng xử của vật liệu phi Newton [47]. Phương trình độ nhớt trên cơ sở lý thuyết thủy động lực học cho sự phân tán của các hạt từ tính đã được Einstein phát triển:

$$\eta_r = 1 + 2.5\phi \quad (2-6)$$

Trong đó  $\eta_r$  là độ nhớt tương đối của lưu chất và  $\phi$  là thể tích của các chất hòa tan hoặc các hạt hình cầu. Việc bổ sung các hạt rắn vào chất lỏng sẽ làm tăng lượng hạt và làm tăng phần thể tích của các hạt. Do đó, khi phần thể tích của các hạt tăng lên sẽ làm tăng độ nhớt của chất lỏng.

Theo Shook [47] mật độ tối đa của các hạt  $\phi_{max}$  nên được kết hợp trong mối quan hệ giữa độ nhớt và mật độ như sau:

$$\eta_r = \frac{\phi}{(1-\phi)^{2.5\phi_{max}}} \quad (2-7)$$

Tuy nhiên, độ nhớt không phụ thuộc vào kích thước hạt mà thay vào đó phụ thuộc vào hình dạng hạt và mật độ chất rắn. Do đó, Toda và Furuse [53] đã mở rộng phương trình (2-7) để thỏa mãn ứng xử độ nhớt của sự phân tán tập trung cho các hạt nhỏ và lớn được đưa ra bởi:

$$\eta_r = \frac{1-0.5\phi}{(1-\phi)^3} \quad (2-8)$$

$$\eta_r = \frac{1+0.5k\phi-\phi}{(1-k\phi)^3(1-\phi)} \quad (2-9)$$

Trong đó  $k$  là hệ số hiệu chỉnh phụ thuộc vào kích thước và mật độ của các hạt rắn. Độ nhớt của chất lỏng có thể được tăng lên với lượng bổ sung của các hạt rắn. Tuy nhiên, ứng xử của chất lỏng sẽ thay đổi và không còn tuân theo thuộc tính của chất lỏng Newton.. Nói chung, ứng suất cắt tăng theo tốc độ cắt ( $du/dy$ ) thường được biểu thị bằng mối quan hệ:

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (2-10)$$

Với  $\tau_y$  là ứng suất cắt,  $\eta$  là độ nhớt động và  $n$  là hằng số.



Chất lỏng Newton xảy ra khi  $\tau_y = 0$  và  $n = 1$ . Độ nhớt của chất lỏng Newton không phụ thuộc vào thời gian và tốc độ cắt. Sự phân loại chất lỏng chủ yếu dựa trên các tính chất lưu biến của lưu chất đó.

✚ *Đặc tính ứng suất chảy dẻo:* Ứng suất chảy dẻo là một trong những đặc tính quan trọng nhất trong các thuộc tính của MRF. Nó quyết định lực, mô men sinh ra của cơ cấu khi có từ trường đi qua [5]. Các hạt từ tính sẽ quyết định đến độ bão hòa từ của MRF, nên nó quyết định đến ứng suất chảy dẻo của lưu chất. Đồng thời mật độ hạt từ tính cũng ảnh hưởng đến ứng suất chảy dẻo của lưu chất. Tuy nhiên, một số nhà nghiên cứu đã thực nghiệm và chỉ ra rằng khi tăng mật độ các hạt lên thì độ nhớt của lưu chất tăng lên nhanh hơn rất nhiều so với tăng ứng suất chảy dẻo.

Điều này ảnh hưởng trực tiếp đến tỉ lệ giữa lực hoặc mô men đầu ra của thiết bị ở trạng thái có từ trường và không có từ trường. Khi kích thước của hạt từ tính tăng lên ta có thể đạt được ứng suất chảy dẻo lớn nhất đồng thời giảm được độ nhớt.

✚ *Độ bền:* MRF sau một thời gian dài hoạt động dưới ứng suất, tốc độ cắt cao thì độ nhớt của nó ở trạng thái không có từ trường sẽ tăng lên và sau một thời gian tạo thành một lớp dày và lưu chất hoàn toàn có thể mất đi những đặc tính ban đầu. Sở dĩ xảy ra hiện tượng này là sau một thời gian hoạt động các lớp vỏ của các hạt từ bị vỡ ra tạo thành nhiều mảnh nhỏ làm giảm khả năng từ tính của MRF. Giải pháp cho tình trạng này là sử dụng các hạt có độ cứng cao, thay đổi chất phụ gia hoặc chất lỏng nền để tăng tính chống mài mòn cho các hạt từ tính.

## 2.2 Mô hình toán áp dụng cho MRF.

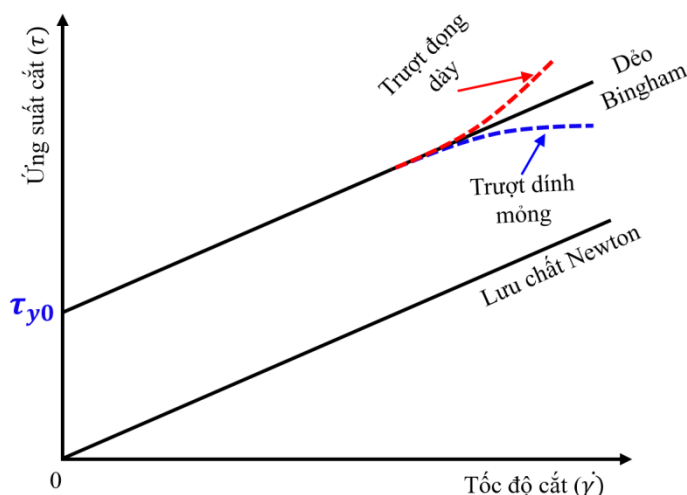
MRF là một dạng lưu chất phi Newton, đặc biệt khi có từ trường tác động vào. Hiện tại có một số mô hình phi tuyến đã được sử dụng để mô tả tính chất của MRF bao gồm các mô hình như: Bingham, Biviscous, Herschel-Bulkley và Eyring. Mặc dù đã có một số mô hình được phát triển và áp dụng cho MRF nhưng mô hình phổ biến nhất được sử dụng rộng rãi với độ chính xác cao và chi phí tính toán hợp lý là mô hình dẻo Bingham [5] được biểu diễn bởi **Hình 2.3**.

Mô hình dẻo Bingham là trường hợp gồm các phần tử dẻo cứng liên kết với các phần tử chất nhớt Newton. Ứng suất cắt tỉ lệ thuận với tốc độ cắt và xác định bởi [5]:

$$\tau = \tau_y(H)\text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta\dot{\gamma} \quad (2-11)$$

Trong đó:

- $\tau$ : ứng suất cắt;  $\tau_y$ : ứng suất chảy dẻo;
- $\text{sgn}$ : hàm dấu;
- $\eta$ : độ nhớt sau chảy dẻo;
- $\dot{\gamma}$ : tốc độ cắt của lưu chất.



**Hình 2.3:** Mô hình lưu chất Newton và Bingham [5].

Trong thực tế thì các thông số này chịu ảnh hưởng bởi từ trường. Theo Zubietta đã đề xuất mô hình của MRF dựa trên mô hình dẻo Bingham là cơ bản kết hợp với mô hình dẻo Herschel-Bulkley và sau đó được áp dụng cho một số nghiên cứu [5].

✚ Các tính chất lưu biến của MRF được xác định bằng công thức sau [5]:

$$Y = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty)(2e^{-B\alpha_{SY}} - e^{-2B\alpha_{SY}}) \quad (2-12)$$

- $Y$ : thông số lưu biến của MRF như ứng suất chảy, độ nhớt, thông số độ đặc, hệ số lưu chất. Giá trị tham số  $Y$  có xu hướng từ  $Y_0$  đến giá trị bão hòa  $Y_\infty$ ;
- $\alpha_{SY}$ : chỉ số mô men bão hòa của tham số  $Y$ .
- $B$ : mật độ từ thông được đặt vào MRF. Các giá trị của  $Y_0$  được xác định từ kết quả thực nghiệm thông qua sử dụng phương pháp đường cong xấp xỉ.

Các thông số lưu biến của MRF như ứng suất chảy ( $\tau_y$ ), độ nhớt ( $\mu$ ) được xác định theo (2-12) như sau:

$$\tau_y = \tau_{y\infty} + (\tau_{y0} - \tau_{y\infty})(2e^{-B\alpha_{sty}} - e^{-2B\alpha_{sty}}) \quad (2-13)$$

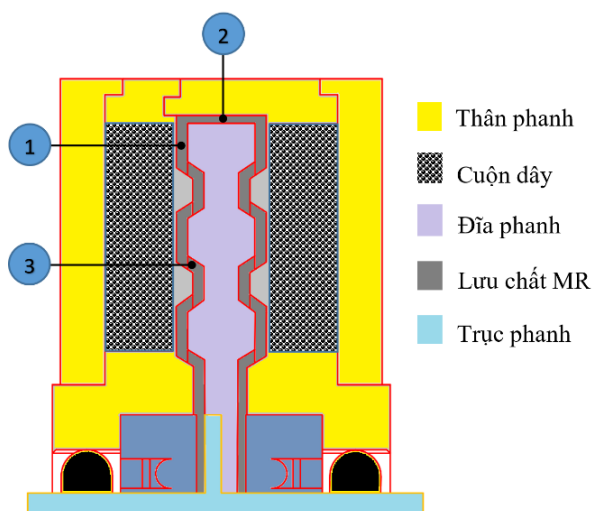
$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)(2e^{-B\alpha_{\mu}} - e^{-2B\alpha_{\mu}}) \quad (2-14)$$

**Bảng 2.1.** Giá trị thông số lưu biến của MRF.

Loại MRF	Mô hình Bingham
MRF-132DG	$\mu_0 = 0,1 \text{ Pa.s}; \mu_\infty = 3,8 \text{ Pa.s}; \alpha_{s\mu} = 4,5 \text{ T}^{-1}; \tau_{y0} = 15 \text{ Pa}$ $\tau_{y\infty} = 40000 \text{ Pa}; \alpha_{st_y} = 2,9 \text{ T}^{-1}$
MRF-140CG	$\mu_0 = 0,29 \text{ Pa.s}; \mu_\infty = 4,4 \text{ Pa.s}; \alpha_{s\mu} = 5 \text{ T}^{-1}; \tau_{y0} = 25 \text{ Pa}$ $\tau_{y\infty} = 52000 \text{ Pa}; \alpha_{st_y} = 3 \text{ T}^{-1}$

**2.3 Tính toán mô men ma sát trong rãnh MRF.**

Để xác định mô men ma sát do MRF gây ra, tác giả xét một phanh MRF quay sử dụng MRF với dạng đĩa phức tạp (bao gồm rãnh thẳng và rãnh nghiêng) thể hiện bởi hình **Hình 2.4**. Các vùng tính mô men được tính tại các vị trí (1),(2),(3)



**Hình 2.4:** Kết cấu phanh MRF biên dạng phức tạp.

- 1 : Vị trí rãnh lưu chất trên rãnh mặt đầu (rãnh lưu chất có phương hướng kính)
- 2 : Vị trí rãnh lưu chất trên rãnh mặt trụ ngoài.
- 3 : Vị trí rãnh lưu chất trên rãnh nghiêng.

Để đơn giản trong việc phân tích và tính toán lực, mô men do MRF tạo ra thì các giả thiết sau được áp dụng:

- Dòng lưu chất không bị nén và chuyển động ổn định theo lớp;
- Bỏ qua tác dụng của trọng lực và lực ly tâm của phần tử MRF;
- Vận tốc hướng tâm, hướng kính bằng không;
- Lưu chất được xem như tiếp xúc hoàn toàn với đĩa và không bị trượt;

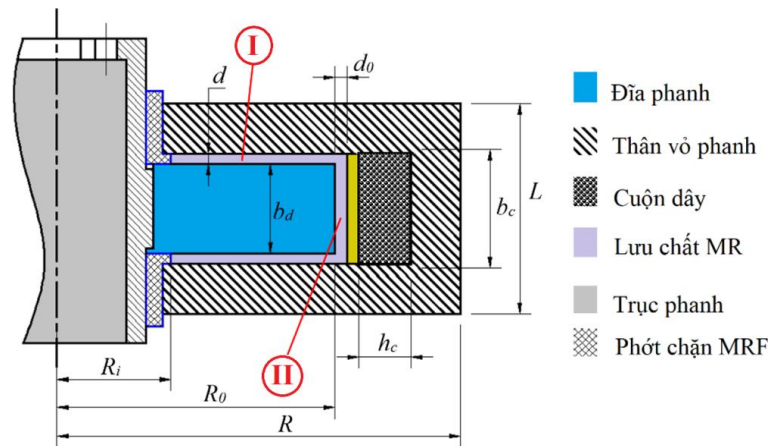
Khe lưu chất nhỏ nên dòng lưu chất được xem như phát triển hoàn toàn, không tồn tại vùng rần và bỏ qua chuyển động dọc trục.

### 2.3.1 Mô men ma sát trên rãnh mặt đầu (I).

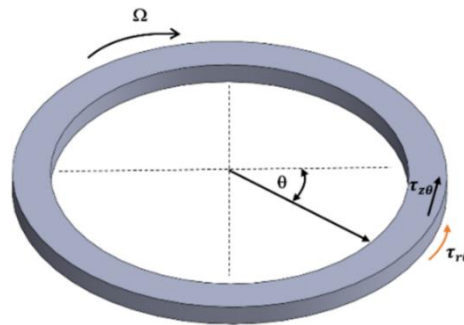
Xét phanh đĩa đơn như **Hình 2.5a**, đĩa quay với vận tốc  $\omega$  (rad/s), MRF được điền đầy giữa thân vỏ và đĩa phanh. Trên vỏ phanh bố trí cuộn dây không từ tính ở bên trong vỏ và đĩa sẽ được gắn chặt với trục phanh không từ tính.

Các thông số hình học cơ bản của phanh quay gồm:

- $R$  là bán kính phanh;  $R_o$  là bán kính ngoài đĩa;  $R_i$  là bán kính trong đĩa phanh;
- $b_d$  là bề dày đĩa;  $d$  là bề dày khe MRF mặt (I);  $d_o$  là bề dày khe MRF mặt (II);
- $h_c$  là chiều cao cuộn dây;  $b_c$  là bề rộng cuộn dây;  $L$  là bề rộng phanh.



a) Cấu hình phanh MRF.



b) Phần tử tính toán MRF.

**Hình 2.5:** Kết cấu phanh MRF đĩa đơn.

Để xác định mô men sinh ra của phanh tại vị trí (I), ta xét một phần tử vòng tròn nhỏ  $dr$  của MRF trong khe lưu chất giữa đĩa và vỏ như **Hình 2.5b** (được giới hạn bởi

hai bán kính  $R_i$  tới  $R_0$ ) thì mô men ma sát tức thời của phần tử này tác động lên phanh được tính theo công thức [49]:

$$dT = 2\pi r^2 \tau_{z\theta} dr + 2\pi r^2 \tau_{r\theta} dz \quad (2-15)$$

Trong đó:

- $r$ : bán kính của phần tử MRF tại vị trí đang xét;
- $\tau_{r\theta}$ : ứng suất tác dụng lên đĩa phanh;
- $\tau_{z\theta}$ : ứng suất tác dụng lên vỏ phanh.

Mô men tạo ra từ khe lưu chất tác dụng lên một mặt của đĩa khi đó tính bởi:

$$T = 2\pi \cdot \int_{R_i}^{R_0} r^2 \tau_{z\theta} \cdot dr + 2\pi r^2 \int_0^d \tau_{r\theta} \cdot dz \quad (2-16)$$

Đối với phanh dạng đĩa trên thì kích thước khe lưu chất  $d$  rất nhỏ so với bán kính  $R_0$  của đĩa và ứng suất  $\tau_{r\theta}$  rất nhỏ so với ứng suất  $\tau_{z\theta}$ , phương trình (2-16) viết lại:

$$T = 2\pi \cdot \int_{R_i}^{R_0} r^2 \tau_{z\theta} \cdot dr \quad (2-17)$$

Để đơn giản trong việc tính toán, ta giả thuyết mật độ từ thông qua khe lưu chất là hằng số và giá trị trung bình của mật độ từ thông được áp dụng thì khi đó mô men được tính như sau:

$$T = \frac{2\pi \cdot \mu_{eq} R^4}{(n+3)d} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_0} \right)^{n+3} \right] \omega + \frac{2\pi \tau_y}{3} (R_0^3 + R_i^3) \quad (2-18)$$

Với  $\mu_{eq}$ ,  $\tau_y$  lần lượt là các thông số lưu biến của lưu chất.

### 2.3.2 Mô men ma sát trên rãnh mặt trụ ngoài (II).

Đối với vị trí mặt trụ ngoài có kích thước khe MRF là  $d_0$ . Chú ý rằng mật độ từ thông qua khe lưu chất ở mặt trụ ngoài của đĩa rất ít do vậy ứng suất sau chảy dẻo của MRF cũng rất nhỏ nên có thể bỏ qua. Với các tính chất trên thì mô men ma sát tác dụng lên mặt trụ ngoài (II) của đĩa được tính bởi [49]:

$$T_a = 2\pi \cdot R_0^2 b_d \tau_{R_0} \quad (2-19)$$

Trong đó  $\tau_{R_0}$  là ứng suất tác dụng lên thành mặt trụ ngoài của đĩa.

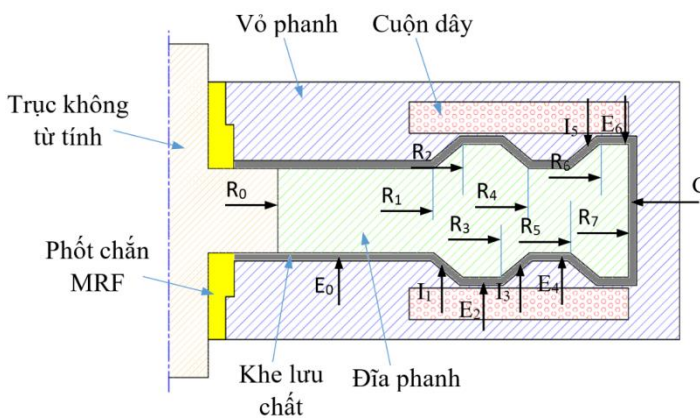
### 2.3.3 Mô men ma sát trên rãnh nghiêng.

Trong phần này chúng tôi đưa ra phanh quay MRF có biên dạng đĩa phức tạp bao gồm vừa có rãnh thẳng và rãnh nghiêng như **Hình 2.6**. Do đó việc tính mô men

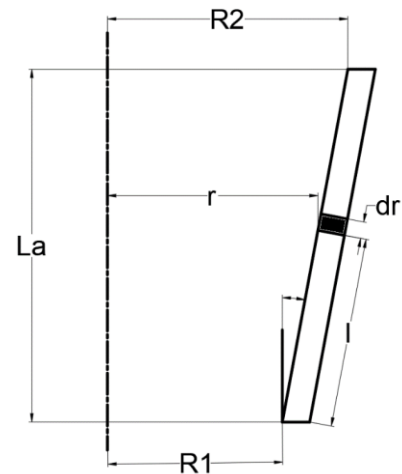
ma sát do MRF gây ra trên đĩa bao gồm trên rãnh thẳng và rãnh nghiêng, trong đó việc tính trên rãnh thẳng đã được giới thiệu ở phần trên. Do đó tác giả chỉ đi xác định mô men sinh ra trên rãnh nghiêng của phanh. Để tính toán mô men ma sát do MRF trên rãnh nghiêng tạo ra thì ta xét một phần tử ống MRF nhỏ  $dr$  trong rãnh nghiêng được biểu diễn như **Hình 2.7**.

Các thông số hình học chủ yếu của phanh bao gồm:

- $r$  là bán kính của phần tử rãnh nghiêng;
- $R_1, R_2$  là bán kính nhỏ, bán kính lớn của ống nghiêng MRF đối với trục;
- $L_a$  là khoảng cách dọc đối với trục;
- $L$  là chiều dài của khe dọc và  $\varphi$  là góc khe dọc với trục quay.



**Hình 2.6:** Kết cấu MRB.



**Hình 2.7:** Phần tử tính toán MRF.

Mô men ma sát áp dụng cho phần tử này được tính như sau [50]:

$$dT = r \cdot \tau dA = 2\pi r^2 \tau \cdot dl = 2\pi \cdot (R_1 + l \sin \varphi)^2 \tau \cdot dl \quad (2-20)$$

Theo mô hình dẻo Bingham áp dụng cho MRF theo hướng dọc trục thì ta có:

$$\tau = \tau_y + \mu \cdot \frac{r \cdot \Omega}{d} = \tau_y + \mu \cdot \frac{\omega(R_1 + l \sin \varphi)}{d} \quad (2-21)$$

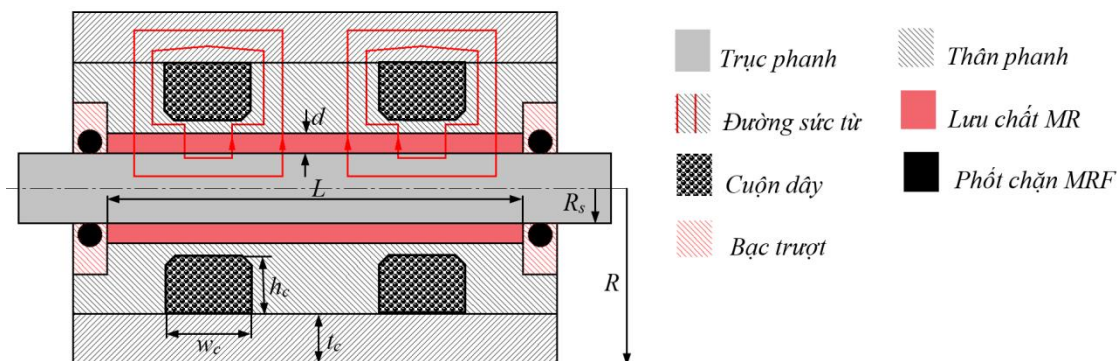
Thay thế một số biến được xác định thì biểu thức (2-21) được viết lại như sau:

$$T = 2\pi \int_0^{L_a / \cos \varphi} (R_1 + l \sin \varphi)^2 \tau \cdot dl = 2\pi \int_0^l (R_1 + l \sin \varphi)^2 \cdot \left( \tau_y + \mu \frac{\omega(R_1 + l \sin \varphi)}{d} \right) \cdot dl \quad (2-22)$$

#### 2.4 Lực ma sát trượt cơ cấu tuyến tính dùng MRF (LMRB).

Xét một phanh tuyến tính sử dụng MRF có cấu tạo như **Hình 2.8**, LMRB bao gồm một trục phanh chuyển động tịnh tiến trên hai bạc trượt và phân cách với vỏ

phanh bằng lớp mỏng MRF, hai cuộn dây được bố trí nằm hai bên trên vỏ phanh, các O-ring cao su ngăn cho MRF không rò rỉ ra ngoài. Các thông số hình học cơ bản của LMRB được biểu diễn bởi **Hình 2.8**.



**Hình 2.8:** Kết cấu của LMRB.

Trong đó:  $R_s$  là bán kính trục,  $d$  là kích thước khe MRF,  $v$  là vận tốc tương đối giữa trục và vỏ,  $L$  là chiều dài của ống MRF,  $R$  là bán kính LMRB.

Khi đó lực ma sát trượt sinh ra do LMRB được tính [51]:

$$F_{sd} = 2\pi \cdot R_s L (\tau_y + \mu \cdot v/d) = 2\pi \cdot \mu R_s L v/d + 2\pi \cdot R_s L \tau_y \quad (2-23)$$

## 2.5 Mô men ma sát giữa phốt cao su và trục.

### 2.5.1 Phốt cao su (Leafseal) với trục quay của phanh MRF.

Đối với phanh quay **Hình 2.8** tác giả sử dụng phốt cao su lò xo, vì vậy mô men ma sát giữa phốt và trục được tính theo [52]:

$$T_{sf} = 0,65(2R_s)^2 \omega^{1/3} \quad (2-24)$$

- $T_{sf}$ : mô men sinh ra do ma sát của phốt với trục (Oz –in);
- $R_s$ : bán kính trục (inch);
- $\omega$ : tốc độ quay của trục (vòng/phút)

Chú ý:

$$1 \text{ Oz-in} = 0,0070615518 \text{ (Nm)};$$

$$1 \text{ in} = 0,0254 \text{ m.}$$

### 2.5.2 O-ring với trục phanh tuyến tính MRF.

Đối với phanh tuyến tính **Hình 2.11** tác giả sử dụng gioăng cao su tròn (O-ring), vì vậy mô men ma sát giữa phốt và trục được tính theo [53]:



$$F_{or} = f_c L_o + f_h A_r \quad (2-25)$$

Trong đó:

- $L_o$  là chiều dài bề mặt tiếp xúc của phốt chặn;
- $f_c$  là ma sát trên một đơn vị chiều dài của chu vi trục;
- $f_h$  là lực ma sát của phốt do áp suất chất lỏng trên một đơn vị diện tích chặn;
- $A_r$  là diện tích chặn.

## 2.6 Phương pháp giải bài toán từ tính của MRF.

Trong nghiên cứu này, mô men tác động của cơ cấu dùng MRF tạo ra chủ yếu bởi độ nhớt và ứng suất chảy dẻo của MRF. Hai tính chất này phụ thuộc rất nhiều vào độ lớn của từ thông đi qua lưu chất. Vì vậy, để tính toán được mô men phanh sinh ra, chúng ta phải giải quyết được bài toán từ trường của MRF cho mô hình nghiên cứu được đề xuất. Thông thường, để giải bài toán về từ trường có 2 phương pháp giải:

- ✚ Phương pháp giải tích.
- ✚ Phương pháp phân tử hữu hạn.

### 2.6.1 Phương pháp giải tích.

Chúng ta biết rằng mô hình hóa hệ thống dựa trên MRF là đi kết hợp phân tích điện từ và phân tích hệ thống lưu chất [22]. Mục đích của việc mô hình hóa thiết bị dựa trên MRF là tìm ra mối quan hệ giữa năng lượng điện ứng dụng (thường là dòng điện áp dụng cho cuộn dây) và công suất cơ học đầu ra như áp cho van MR, lực giảm chấn MRB, mô men cho phanh MRF và mô men xoắn truyền cho ly hợp. Để giải quyết mô hình hóa các thiết bị dựa trên MRF thì trước hết phải giải quyết mạch từ của các thiết bị dựa trên MRF. Mạch từ được phân tích bằng định luật Kirchoff từ tính như sau:

$$\sum H_k l_k = N_{turns} I \quad (2-26)$$

Trong đó  $H_k$  là cường độ từ trường trong liên kết thứ  $k$  của mạch từ;  $l_k$  là độ dài hiệu dụng của liên kết;  $N_{turns}$  là số vòng của cuộn dây;  $I$  là dòng điện áp dụng.

Quy tắc bảo toàn từ thông của mạch từ được đưa ra bởi [22]:

$$\Phi = B_k \cdot A_k \quad (2-27)$$



Với  $\Phi$  là từ thông của mạch;  $B_k, A_k$  lần lượt là mật độ từ thông và diện tích mặt cắt ngang của liên kết thứ  $k$ . Đáng chú ý là càng sử dụng nhiều liên kết thì kết quả tính toán càng chính xác nhưng điều này làm tăng chi phí tính toán. Ở từ trường thấp, mật độ từ thông  $B_k$  tỷ lệ thuận với cường độ từ trường  $H_k$  như sau:

$$B_k = \mu_0 \mu_k H_k \quad (2-28)$$

Trong đó  $\mu_0$  là độ thấm từ ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Tm/A) và  $\mu_k$  là độ thấm từ tương đối của vật liệu liên kết thứ  $k$ . Khi từ trường lớn thì khả năng phân cực của vật liệu từ tính giảm dần và vật liệu này gần như từ tính bão hòa. Quan hệ giữa mật độ từ thông và cường độ từ trường thường là phi tuyến và được sử dụng để thể hiện tính chất từ của vật liệu.

Ở từ trường thấp xem xét mối quan hệ tuyến tính thì mật độ từ thông và cường độ từ trường của liên kết thứ  $k$  của mạch từ được tính toán như sau:

$$B_k = \frac{\mu_0 N_{turns} I}{\frac{l_k + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{l_i A_k}{\mu_i A_i}}{\mu_k}} \quad (2-29)$$

$$H_k = \frac{N_{turns} I}{l_k + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{\mu_k A_k l_i}{\mu_i A_i}} \quad (2-30)$$

Giả sử từ tính của các vật liệu tương đương nhau ( $\mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_n = \mu$ ) khi đó mật độ từ thông và cường độ trường tác động lên MRF được tính xấp xỉ như sau:

$$B_{mr} = \frac{\mu N_{turns} I}{\frac{l_{mr}}{\mu_{mr}} + \frac{1}{\mu} \sum_i \frac{l_i A_{mr}}{A_i}} \quad (2-31)$$

$$H_{mr} = \frac{N_{turns} I}{l_{mr} + \frac{\mu_{mr} A_{mr}}{\mu} \sum_i \frac{l_i}{A_i}} \quad (2-32)$$

Trong đó  $\mu_{mr}, \mu$  là độ từ thẩm tương đối của MRF và vật liệu chế tạo cho các thiết bị sử dụng MRF tương ứng. Cần lưu ý rằng từ thẩm của MRF nhỏ hơn nhiều so với vật liệu các chi tiết của cơ cấu dùng MRF, khi đó cường độ từ trường liên kết của MRF được tính gần đúng:

$$H_{mr} = \frac{N_{turns} I}{l_{mr}} \quad (2-33)$$

Hằng số thời gian quy nạp ( $T_{in}$ ) và mức tiêu thụ điện năng ( $W$ ) của các thiết bị sử dụng MRF được tính như sau:

$$T_{in} = L_{in} / R_w \quad (2-34)$$

$$N = I^2 R_w \tag{2-35}$$

Với  $L_{in}$  là độ từ cảm của cuộn dây ( $L_{in} = \frac{N_{turns}}{I}$ )

$R_w$  là điện trở kháng của cuộn dây được tính xấp xỉ:

$$R_w = L_w r_w = N_{turns} \cdot \pi \cdot \bar{d}_c \frac{r}{A_w} \tag{2-36}$$

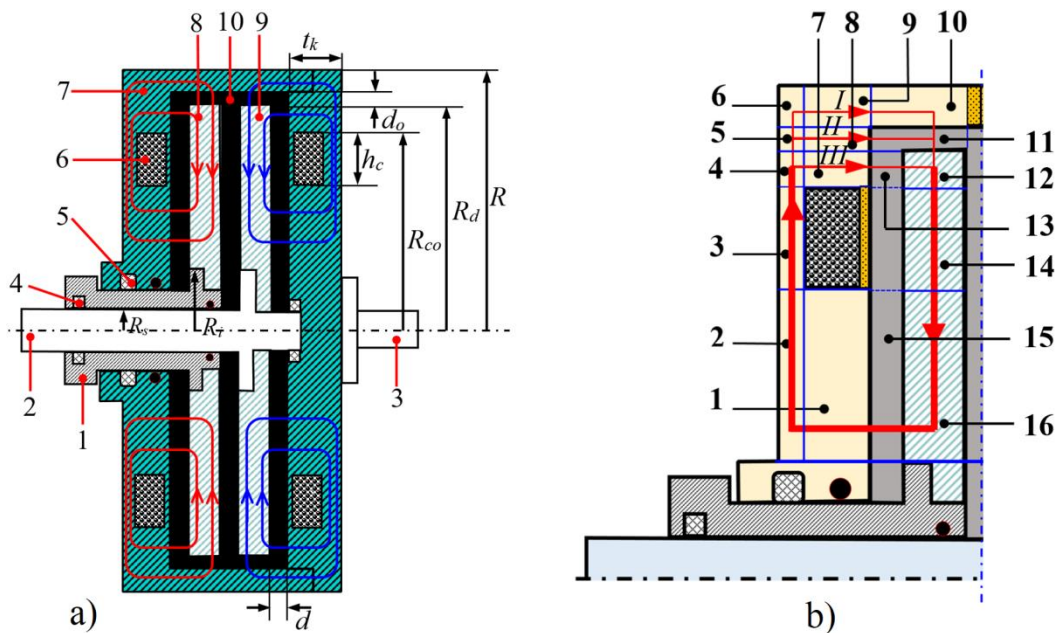
$L_w$  là chiều dài của cuộn dây;

$r_w$ : điện trở trên một đơn vị chiều dài của cuộn dây;

- $d_c$ : đường kính trung bình dây;
- $A_w$ : diện tích mặt cắt ngang của cuộn dây;
- $r$ : điện trở suất của cuộn dây;
- $N_{turns} = A_c/A_w$ ; ( $A_c$ : diện tích mặt cắt ngang của cuộn dây).

Trong nghiên cứu này tác giả đưa ra một mô hình phân tích mạch từ cho cơ cấu hai chiều sử dụng MRF (BMRA) mới được thể hiện trên **Hình 2.9**.

Cấu tạo BMRA bao gồm: (1) trục 1; (2) trục 2; (3) trục đầu ra BMRA; (4) ổ lăn trục 2; (5) ổ lăn trục 1; (6) cuộn dây; (7) vỏ phanh; (8) đĩa 1; (9) đĩa 2; (10) khe MRF.



**Hình 2.9:** Mô hình tính toán mạch từ của BMRA.

Nguyên lý hoạt động của BMRA như sau: từ động cơ bên ngoài thông qua bộ truyền bánh răng côn sẽ dẫn động hai trục (trục 1 và 2) quay cùng tốc độ nhưng ngược chiều, do hai đĩa (8, 9) được lắp cố định trên hai trục nên hai đĩa này cũng quay cùng

tốc độ nhưng ngược chiều. Các cuộn dây được bố trí ở hai bên mặt đầu của BMRA, MRF được điền đầy giữa khe hở của các đĩa và thân BMRA.

Mạch từ của BMRA được xác định bởi **Hình 2.9b**, với mô hình đơn giản nên tác giả chia thành 16 phần tử, trong đó 11, 13 và 15 là các phần tử MRF và các phần tử khác là các phần tử vật liệu từ tính. Theo đó từ thông được chia thành ba nhánh, lượng từ thông nhánh II được dự kiến là không đáng kể vì nó đi qua hầu hết phần tử MRF, có độ từ thẩm cao và khoảng cách dài hơn nhiều so với các phần tử khác. Do đó, lượng từ thông nhánh II được xem xét sẽ không ảnh hưởng đến kết quả tính toán. Từ **Hình 2.9b** thì phương trình (2-25) được viết lại như sau:

$$\Phi = B_1A_1 = B_2A_2 = B_3A_3 = B_4A_4 = B_{12}A_{12} = B_{14}A_{14} = B_{16}A_{16} = B_{15}A_{15}$$

$$\Phi_{II} = B_{4I}A_{4I} = B_5A_5 = B_6A_6 = B_9A_9 = B_{10}A_{10}$$

$$\Phi_I = B_{11}A_{11} = B_{12III}A_{12III} =$$

$$B_{4I}A_{4I} = B_7A_7 = B_{13}A_{13} = B_{12I}A_{12I}$$

$$\text{Với } \Phi = \Phi_I + \Phi_{III} \quad (2-37)$$

Phương trình (2-26) được viết lại như sau:

$$H_{11}l_1 + H_{21}l_2 + H_{31}l_3 + H_{41}l_4 + H_{4III}l_{4III} + H_{51}l_5 + H_{61}l_6 + H_{91}l_9 + H_{101}l_{10} + H_{111}l_{11} + H_{12III}l_{12III} + H_{12I}l_{12I} + H_{141}l_{14} + H_{161}l_{16} + H_{151}l_{15} = N_c \cdot I$$

$$H_{11}l_1 + H_{21}l_2 + H_{31}l_3 + H_{41}l_4 + H_{4I}l_{4I} + H_{71}l_7 + H_{131}l_{13} + H_{12I}l_{12I} + H_{121}l_{12} + H_{141}l_{14} + H_{161}l_{16} + H_{151}l_{15} = N_c \cdot I$$

$$\text{Trong đó: } l_1 = \frac{w_c}{2}; l_2 = \frac{t_k - w_c}{2} + \frac{R_{ci} - R_i}{2}; l_3 = \frac{R_{co} - R_{ci}}{2};$$

$$l_{4III} = \frac{t_k - w_c}{2}; l_{4I} = \frac{R_d - R_{co}}{2}; l_4 = \frac{R_d - R_{co}}{2}$$

$$l_5 = \frac{d_0}{2}; l_6 = \frac{R - R_d - d_0}{2} + \frac{t_k - w_c}{2}; l_7 = l_8 = l_9 = w_c;$$

$$l_{10} = \frac{d + d_b}{2} + \frac{R - R_d - d_0}{2}; l_{11} = d_0; l_{12III} = \frac{b_d}{2}; l_{12I} = \frac{R_d - R_{co}}{2}$$

$$l_{12} = \frac{R_d - R_{co}}{2}; l_{13} = d; l_{14} = h_c; l_{15} = d; l_{16} = \frac{R_{ci} - R_i}{2} + \frac{d_b}{2}$$

$$A_{in1} = 2\pi R_i (R_{ci} - R_i)$$

$$A_{in1} = A_{out1} = A_{in2}$$

$$A_{out2} = A_{in3} = A_{out3} = A_{in4} = 2\pi \cdot t_k (R_{ci} - R_i)$$

$$A_{out4III} = A_{in7} = A_{out7} = A_{in13} = A_{out13} = A_{in12III} = \pi(R_d^2 - R_{co}^2)$$

$$A_{out4} = A_{in5} = 2\pi \cdot t_k R_d$$

$$A_{out5I} = A_{in6} = 2\pi \cdot (R_d + d_0)$$

$$A_{out5II} = A_{in8} = A_{out8} = A_{in11II}$$

$$A_{out6} = A_{in9} = A_{out9} = A_{in10} = \pi R^2 - \pi \cdot (R_d + d_0)^2$$

$$A_{out5II} = A_{in8} = A_{out8} = \pi(R_d - d_0)^2 - \pi R_d^2$$

$$A_{out10I} = A_{in11} = A_{out11} = A_{in12I} = \pi(R_d + d_0)^2 - \pi R_d^2$$

$$A_{out15} = A_{in1}$$

$$A_{out12} = A_{in14} = \pi R_{co}^2$$

$$A_{out14} = A_{in16} = \pi \cdot R_{ci}^2$$

$$A_{out16} = A_{in15} = \pi \cdot (R_{ci}^2 - R_i^2)$$

Ưu điểm của phương pháp giải tích là đơn giản vì dùng công thức tính toán sẽ cho kết quả chính xác nhưng nhược điểm của phương pháp này là khi các mặt cắt khác nhau hoặc vật liệu khác nhau thì phải chia nhỏ nên tính toán khó khăn và độ chính xác không cao.

### Phương pháp phần tử hữu hạn.

Đối với bài toán mạch từ giải bằng phương pháp giải tích, ta phải chia nhỏ mạch từ thành các phần tương ứng có diện tích  $A_k$  và chiều dài tương ứng  $l_k$ . Để tăng độ chính xác thì số lượng mạch từ cần chia nhỏ nhiều hơn gây khó khăn khi sử dụng phương pháp giải tích. Vì vậy phương pháp phần tử hữu hạn tích hợp trong phần mềm ANSYS với mô đun có thể giải điện từ trường sẽ giúp ta xác định được mật độ từ thông đi qua khe lưu chất. Khi sử dụng phương pháp này, để kiểm soát tốt việc chia lưới theo mong muốn, tác giả dùng phần tử tứ giác cho tất cả các phần tử (phần tử đối xứng trục PLANE 13) của phần mềm ANSYS. Muốn vậy, các diện tích xây dựng trong mô hình đều là tứ giác và các cạnh đối diện trong tứ giác phải được chia có số phần tử bằng nhau. Khi chia lưới càng nhỏ thì kết quả càng chính xác, tuy nhiên thời gian tính toán sẽ lớn. Vì vậy việc xác định số lượng phần tử trên mỗi đoạn để đảm bảo được tính chính xác và hiệu quả của việc mô phỏng cũng là yêu cầu trong mô phỏng cơ cấu sử dụng MRF.

## 2.7 Cơ sở phương pháp tối ưu hoá.

Tối ưu hóa là bài toán quan trọng trong các lĩnh vực như kỹ thuật điện, cơ khí, dân dụng, hóa học và xây dựng để nâng cao hiệu quả, giảm chi phí của kết cấu...

Một số cách tiếp cận chung để tối ưu hóa như sau:

- Phương pháp phân tích;
- Phương pháp đồ họa;
- Phương pháp số;
- Phương pháp thực nghiệm.

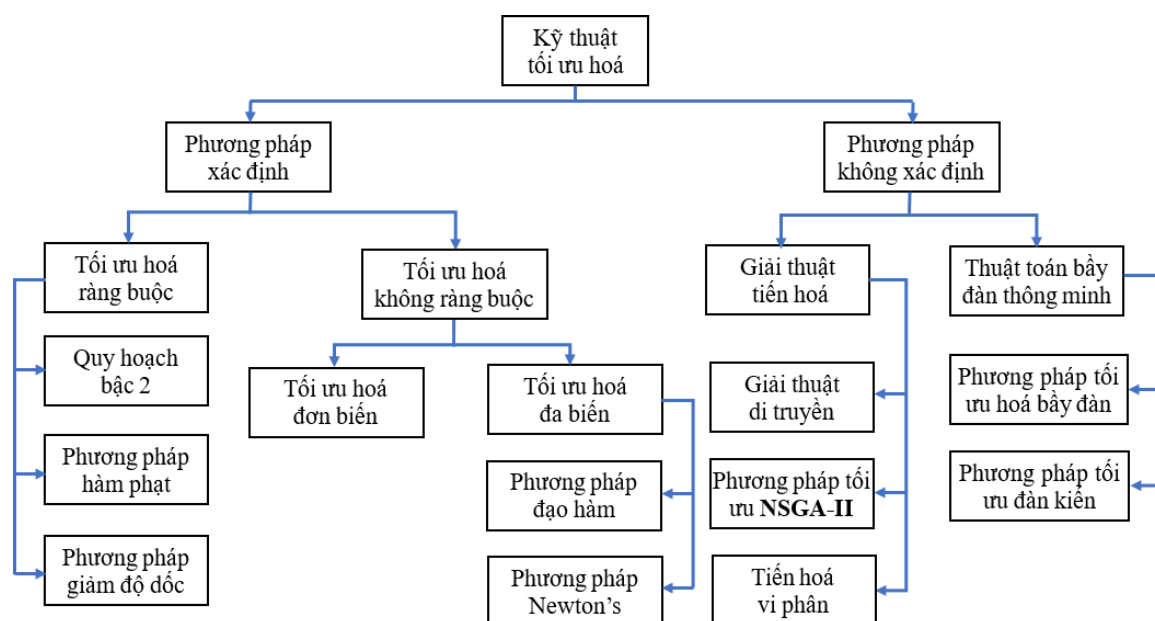
### 2.7.1 Phân loại các bài toán tối ưu.

- Theo hàm mục tiêu và hàm ràng buộc.
  - Tối ưu hóa tuyến tính: các hàm đều là hàm tuyến tính.
  - Tối ưu hóa phi tuyến: có ít nhất một hàm là phi tuyến.
- Theo số biến thiết kế tối ưu:
  - Tối ưu hóa hàm một biến: chỉ có một biến thiết kế.
  - Tối ưu hóa hàm nhiều biến: có nhiều biến thiết kế.
- Theo tính liên tục của biến thiết kế:
  - Biến thiết kế liên tục: nhiệt độ, vận tốc...
  - Biến thiết kế rời rạc: diện tích, mô men, lực...
- Theo tính tường minh của hàm ràng buộc:
  - Hàm ràng buộc tường minh: lập được phương trình của hàm ràng buộc với các biến đầu vào.
  - Hàm ràng buộc không tường minh: không lập được hàm ràng buộc tường minh với các biến đầu vào.

### 2.7.2 Các phương pháp tối ưu thông dụng.

Hiện nay có rất nhiều thuật toán tối ưu được áp dụng, tùy vào điều kiện ban đầu, hàm mục tiêu và yêu cầu đáp ứng của mục đích tối ưu hoá thì sẽ có một phương pháp tối ưu thích hợp nhất. Điều này có nghĩa rằng một phương pháp tối ưu có thể thích hợp cho trường hợp này nhưng không thích hợp cho trường hợp khác. **Hình 2.10** cho thấy sự phát triển các phương pháp tối ưu có hai nhánh rõ ràng đó là tối cục bộ và tối

ưu toàn cục. Phương pháp nào cũng có lợi thế khác nhau tùy vào điều kiện của bài toán đặt ra



**Hình 2.10:** Sơ đồ các phương pháp tối ưu.

2.7.2.1 Phương pháp giảm độ dốc (Gradient Descent - GD).

Trong các bài toán tối ưu hóa, quy hoạch tuyến tính và bất đẳng thức thì thuật toán giảm độ dốc là một phương pháp phổ biến để tìm các điểm cực trị địa phương của hàm số. Ý tưởng của phương pháp hướng dốc là tìm ra một phương tối ưu mà với phương đó hàm số sẽ đạt được cực tiểu. Do đó trong thuật toán phương pháp giảm độ dốc luôn phải có điểm xuất phát, phương di chuyển và tốc độ di chuyển. Điểm xuất phát là điểm khởi tạo của vòng lặp, tốc độ di chuyển hay còn gọi là tỷ lệ học là giá trị quy định sau mỗi vòng lặp sẽ dịch chuyển với phương hướng dốc với độ lớn là bao nhiêu. Phương di chuyển chính là hướng để đi đến điểm cực trị địa phương.

Phương pháp giảm độ dốc được tính toán dựa trên các quan sát của một hàm đa biến  $F(x)$  xác định và khả vi tại các điểm lân cận  $a$ , khi đó  $F(x)$  giảm nhanh nhất khi đi từ  $a$  theo phương của hướng đạo hàm của  $F$  tại điểm  $a$  kí hiệu  $-\Delta F(a)$  [54]

$$\text{Do đó} \quad a_{n+1} = a_n - \alpha \cdot \Delta F(a_n) \tag{2-38}$$

Với  $\alpha$  là tốc độ hội tụ đủ lớn  $F(a_n) > F(a_{n+1})$ . Hay nói một cách khác thì phần tử  $\alpha \Delta F(a_n)$  là phần được trừ đi từ  $a$  bởi chúng ta muốn di chuyển nhanh hơn tới điểm

cực tiểu dựa trên phương đạo hàm. Với các quan sát xác định trước chúng ta bắt đầu với một điểm giả định  $x_0$  cho cực trị địa phương của  $F$ , và xét chuỗi  $x_0, x_1, x_2 \dots$  sao cho:

$$x_{n+1} = x_n + \alpha \Delta F(x_n), n \geq 0 \quad (2-39)$$

$$F(x_0) \geq F(x_1) \geq F(x_2) \dots$$

Chúng ta kỳ vọng chuỗi  $x_n$  sẽ hội tụ tới điểm cực trị địa phương. Chú ý rằng trong phương trình trên tốc độ hội tụ được kí hiệu là  $x_n$  có nghĩa là nó được phép thay đổi sau mỗi bước hội tụ. Với một vài giả định về hàm  $F$  (chẳng hạn như  $F$  là hàm lồi và  $\Delta F$  liên tục) thì lựa chọn  $\alpha$  sẽ đảm bảo hàm số hội tụ đến cực trị địa phương như sau:

$$\alpha_n = \frac{(x_n - x_{n-1})^T [\Delta F(x_n) - \Delta F(x_{n-1})]}{\|\Delta F(x_n) - \Delta F(x_{n-1})\|^2} \quad (2-40)$$

Mặt khác khi  $F(x)$  là hàm lồi thì cực trị địa phương chính là cực trị toàn cục nên có thể hội tụ tới điểm cực trị toàn cục khi  $F(x)$  là hàm lồi. Thuật toán giảm độ dốc cũng có nhược điểm là cần phải lựa chọn giá trị ban đầu phù hợp, nếu quá nhỏ thì thuật toán sẽ cần rất nhiều bước để kết thúc còn quá lớn thì không kết thúc được.

#### 2.7.2.2 Phương pháp giải thuật di truyền (Genetic Algorithms - GA).

Giải thuật di truyền đã và đang được ứng dụng để giải quyết các bài toán trong rất nhiều lĩnh vực của cuộc sống cũng như trong kỹ thuật. Giải thuật di truyền [61] do D.E. Goldberg đề xuất, sau đó được L. Davis và Z. Michalewicz tiếp tục phát triển. GA được hình thành dựa trên quan niệm đó là quá trình tiến hóa tự nhiên là quá trình hoàn hảo và hợp lý nhất, tự quá trình này đã mang tính tối ưu. Quan niệm này là một tiên đề đúng, không chứng minh được nhưng phù hợp với thực tế khách quan. GA là giải thuật tìm kiếm, chọn lựa các phương án tối ưu để giải quyết các bài toán thực tế khác nhau, dựa trên cơ chế chọn lọc của tự nhiên: từ tập lời giải ban đầu, thông qua nhiều bước tiến hoá, hình thành tập lời giải mới phù hợp hơn và cuối cùng dẫn đến lời giải tối ưu toàn cục.

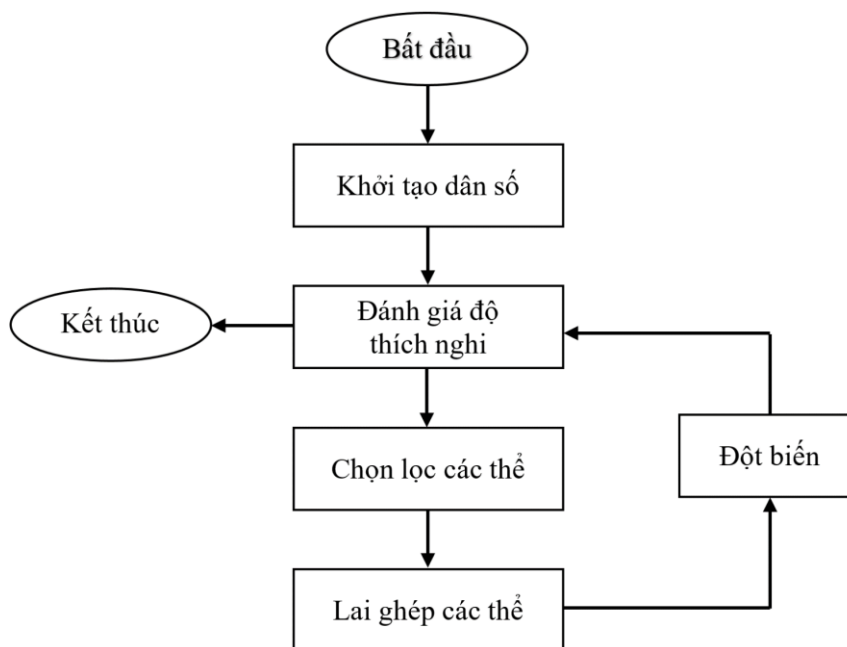
Các cá thể của quần thể hiện tại khởi nguồn cho quần thể thế hệ kế tiếp bằng các hoạt động như chọn lọc (selection), lai ghép (crossover) và đột biến (mutation) ngẫu nhiên được lấy mẫu sau các quá trình tiến hóa, cụ thể như sau:

- Quá trình chọn lọc : các cá thể sẽ được chọn lọc theo độ thích nghi để tham gia vào quá trình tiến hóa tiếp theo. Các cá thể có độ thích nghi cao sẽ có khả năng tồn tại cao hơn và có thể có nhiều cá thể trong thế hệ tiếp theo. Cá thể đã được chọn sẽ có cơ hội sống sót và di truyền lại cho thế hệ sau. Với cách thực hiện này, một số cá thể tốt sẽ được chọn nhiều lần và các cá thể xấu sẽ bị loại bỏ.
- Quá trình lai ghép: quá trình này thể hiện bằng cách ghép 1 hay nhiều đoạn gen từ hai nhiễm sắc thể cha và mẹ để hình thành nên một nhiễm sắc thể mới mang đặc tính của cả cha và mẹ. Cụ thể như sau: chọn ngẫu nhiên hai hay nhiều cá thể trong quần thể. Giả sử chuỗi nhiễm sắc thể của cha và mẹ đều có chiều dài là  $n$ . Ta sẽ tìm điểm lai bằng cách tạo ngẫu nhiên một con số từ 1 đến  $n-1$ , điểm lai vừa chọn sẽ chia hai chuỗi hai nhiễm sắc cha - mẹ thành hai nhóm hai nhiễm sắc con là  $n_1$  và  $n_2$ . Hai chuỗi nhiễm sắc thể con lúc này sẽ là  $m_{11} + m_{22}$  và  $m_{21} + m_{12}$ . Sau đó lại tiếp tục đưa hai nhiễm sắc thể con vào quần thể để tiếp tục tham gia quá trình tiến hóa.
- Quá trình đột biến: đưa nhiễm sắc thể con vào quần thể để tham gia tiếp vào quá trình tiến hóa. Quá trình đột biến là sự thay đổi một vài gen của một hai nhiễm sắc. Toán tử đột biến làm tăng nhanh quá trình hội tụ, nhưng có thể sự tăng đột ngột không có tác dụng hoặc làm hội tụ sớm dẫn đến một lời giải kém tối ưu.

GA đòi hỏi phải xác định được: khởi tạo quần thể ban đầu, hàm đánh giá các lời giải theo mức độ thích nghi (hàm mục tiêu), các toán tử di truyền tạo hàm sinh sản.

GA đã được ứng dụng rộng rãi cho những bài toán cụ thể khác nhau và cho các vấn đề liên quan tới tối ưu hóa như được dùng để học tập luật điều khiển robot, để tối ưu hóa các bài toán đa mục tiêu. Sơ đồ giải thuật cơ bản được thể hiện bởi **Hình 2.11**





**Hình 2.11:** Lược đồ giải thuật GA.

### 2.7.2.3 Giải thuật di truyền sắp xếp không vượt trội II (NSGA-II).

Chúng ta đã biết phương pháp NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) được phát triển dựa trên phương pháp GA. Phương pháp này chỉ khác phương pháp GA ở bước lựa chọn nên NSGA kế thừa được những ưu điểm của phương pháp GA. Tuy nhiên, phương pháp NSGA vẫn tồn tại những hạn chế như: thời gian tính toán chậm, phụ thuộc tham số điều khiển... Để khắc phục những hạn chế của NSGA, Deb và cộng sự đã đề xuất giải thuật sắp xếp không vượt trội 2 (NSGA-II) vào năm 2002 [55]. Phương pháp này không những khắc phục được những hạn chế của NSGA mà còn đảm bảo sự đa dạng và duy trì được các cá thể tốt qua các thế hệ.

Giải thuật NSGA-II là một giải thuật tốt được dùng rất phổ biến là một phương pháp tối ưu hóa cơ bản. Tập tất cả các phương án chấp nhận được không bị vượt trội trong miền khảo sát được gọi là tập tối ưu Pareto. Mục tiêu của các giải thuật tối ưu đa mục tiêu là xác định các lời giải trong tập tối ưu Pareto. Thực tế, việc chứng minh một lời giải là tối ưu thường không khả thi về mặt tính toán. Vì vậy, một tiếp cận thực tế với bài toán tối ưu đa mục tiêu là tìm kiếm tập các lời giải là thể hiện tốt nhất có

thể của tập tối ưu Pareto, một tập các lời giải như vậy được gọi là tập Pareto (tập có giá trị tốt nhất) [62].

Khó khăn chính trong tối ưu hoá đa mục tiêu là không tồn tại một phương án tối ưu duy nhất và rất khó so sánh phương án này với phương án khác. Các bài toán thường chấp nhận nhiều phương án mà mỗi phương án là chấp nhận được đối với mỗi hàm mục tiêu đồng thời đạt được sự cân đối giữa các mục tiêu.

✚ Thuật toán NSGA-II gồm các bước chính:

1. Begin
2.  $t = 0$ ;
3. Khởi tạo  $P(t)$ ;
4. Sắp xếp không vượt trội và tính mật độ cho  $P(t)$ ;
5. While ( $t > \text{gen}$ ) do
6.     Begin
7.          $t = t+1$ ;
8.         chọn  $Q(t)$  từ  $P(t-1)$ ;
9.          $Q(t)$  = lai ghép từ  $Q(t)$ ;
10.          $Q(t)$  = đột biến từ  $Q(t)$ ;
11.         Biến thể =  $P(t-1) + Q(t)$ ;
12.         Sắp xếp không vượt trội và tính mật độ cho biến thể;
13.          $P(t) =$  chọn  $N$  cá thể tốt nhất;
14.     End;
15.     Lời giải;
16. End.

## 2.8 Cơ sở phương pháp điều khiển.

### 2.8.1 Bộ điều khiển PID (Proportional Integral Derivative).

PID là bộ điều khiển được sử dụng nhiều nhất trong các bộ điều khiển phản hồi và được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển công nghiệp. Bộ điều khiển PID sẽ xác định dựa trên "sai lệch -  $e(t)$ " giữa tín hiệu thực tế và mong muốn để giảm tối đa sai số bằng cách điều chỉnh giá trị điều khiển đầu vào. Trong trường hợp không

có mô hình toán học về hệ thống điều khiển thì bộ điều khiển PID là sẽ bộ điều khiển tốt nhất [62]. Tuy nhiên, để đạt được kết quả tốt nhất, các thông số PID sử dụng trong tính toán phải điều chỉnh theo tính chất của hệ thống trong khi kiểu điều khiển là giống nhau, các thông số phải phụ thuộc vào đặc thù của hệ thống.

Giải thuật tính toán bộ điều khiển PID bao gồm 3 thông số riêng biệt (đôi khi còn được gọi là điều khiển ba khâu) đó là khâu tỉ lệ, khâu tích phân và khâu đạo hàm. Trong đó giá trị khâu tỉ lệ xác định tác động của sai số hiện tại, giá trị khâu tích phân xác định tác động của tổng các sai số quá khứ, và giá trị khâu vi phân xác định tác động của tốc độ biến đổi sai số. Với  $u(t)$  là đầu ra của bộ điều khiển thì biểu thức của giải thuật PID là:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2-41)$$

Các trong đó các thông số điều chỉnh là:

$K_P$  (khâu tỉ lệ): giá trị càng lớn thì đáp ứng càng nhanh do đó sai số càng lớn, bù khâu tỉ lệ càng lớn. Hệ số tỉ lệ quá lớn sẽ dẫn đến quá trình mất ổn định và dao động.

$K_I$  (khâu tích phân): giá trị càng lớn kéo theo sai số ổn định bị khử càng nhanh. Đổi lại là độ vọt lố càng lớn: bất kỳ sai số âm nào được tích phân trong suốt đáp ứng quá độ phải được triệt tiêu tích phân bằng sai số dương trước khi tiến tới trạng thái ổn định.

$K_D$  (khâu đạo hàm): giá trị càng lớn càng giảm độ vọt lố, nhưng lại làm chậm đáp ứng quá độ và có thể dẫn đến mất ổn định do khuếch đại nhiễu tín hiệu trong phép vi phân sai số. Khâu tỉ lệ, tích phân và đạo hàm được cộng lại với nhau để tính toán đầu ra của bộ điều khiển PID.

Một số tiêu chí để kiểm tra bộ điều khiển::

- Độ vọt lố (POT, %),  $POT = \frac{u_{max} - u_{xl}}{u_{xl}} \cdot 100\%$  ( $u_{max}$ : giá trị lớn nhất,  $u_{xl}$ : giá trị đầu ra được xác lập)
- Thời gian xác lập ( $t_{xl}$ )
- Sai số xác lập ( $e_{xl}$ )

Có nhiều phương pháp khác nhau để điều chỉnh vòng lặp PID. Hiện nay có những phương pháp hữu hiệu thường bao gồm triển khai một số dạng mô hình xử lý, sau đó chọn  $k_p, k_i, k_d$  dựa trên các thông số của mô hình động học. Các phương pháp điều chỉnh gồm có các phương pháp sau:

✚ *Phương pháp điều chỉnh thủ công*: nếu hệ thống phải duy trì trạng thái online, phương pháp điều chỉnh là đặt giá trị đầu tiên của  $K_I$  và  $K_D$  bằng không. Tăng dần  $K_P$  cho đến khi đầu ra của vòng điều khiển dao động, sau đó  $K_P$  có thể được đặt tới xấp xỉ một nửa giá trị đó để đạt được đáp ứng “1/4 giá trị suy giảm biên độ”. Sau đó tăng  $K_I$  đến giá trị phù hợp sao cho đủ thời gian xử lý. Tuy nhiên,  $K_I$  quá lớn sẽ gây mất ổn định. Cuối cùng tăng  $K_D$  nếu cần thiết cho đến khi vòng điều khiển nhanh có thể chấp nhận được nhanh chóng lấy lại được giá trị đặt sau khi bị nhiễu. Tuy nhiên,  $K_D$  quá lớn sẽ gây đáp ứng dư và vọt lố. Một điều chỉnh cấp tốc của vòng điều khiển PID thường hơi quá lố một ít khi tiến tới điểm mong muốn nhanh chóng. Vài hệ thống không chấp nhận xảy ra vọt lố, trong trường hợp đó ta cần một hệ thống vòng kín giảm vọt lố.

**Bảng 2.2:** Tác động của việc thay đổi các hệ số tỷ lệ.

Thông số	Thời gian khởi động	Quá độ	Thời gian xác lập	Sai số ổn định	Độ ổn định
$K_P$	Giảm	Tăng	Thay đổi nhỏ	Giảm	Giảm cấp
$K_I$	Giảm	Tăng	Tăng	Giảm đáng kể	Giảm cấp
$K_D$	Giảm ít	Giảm ít	Giảm ít	Không tác động	Cải thiện nếu $K_d$ nhỏ

✚ *Phương pháp Ziegler–Nichols*: được đưa ra bởi John G. Ziegler và Nathaniel B. Nichols vào những năm 1940. Giống phương pháp trên, các khâu  $K_I$  và  $K_D$  lúc đầu được gán bằng không. Khâu  $K_P$  được tăng cho đến khi nó tiến tới giá trị tới hạn  $K_u$  mà ở đầu ra của vòng điều khiển bắt đầu dao động.  $K_u$  và  $P_u$  (thời gian dao động) được dùng để gán hệ số như sau theo **Bảng 2.3**

**Bảng 2.3:** Hệ số  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  theo phương pháp Ziegler-Nichols.

Dạng điều khiển	$K_P$	$K_I$	$K_D$
P	$0,50.K_u$	-	-
PI	$0,45.K_u$	$1,2.K_P/P_u$	-
PID	$0,60.K_u$	$2.K_P/P_u$	$K_P P_u/8$

🌈 *Phần mềm điều chỉnh PID:* hầu hết các ứng dụng công nghiệp hiện đại không còn điều chỉnh vòng điều khiển sử dụng các phương pháp tính toán thủ công như trên nữa. Thay vào đó, phần mềm điều chỉnh PID và tối ưu hóa vòng lặp được dùng để đảm bảo kết quả chắc chắn. Những gói phần mềm này sẽ tập hợp dữ liệu, phát triển các mô hình xử lý, và đề xuất phương pháp điều chỉnh tối ưu. Điều chỉnh PID bằng toán học bằng cách tạo ra tín hiệu dạng xung trong hệ thống, và sau đó sử dụng đáp ứng tần số của hệ thống điều khiển để thiết kế các giá trị của vòng điều khiển PID. Trong những vòng lặp có thời gian đáp ứng kéo dài nhiều phút, nên chọn điều chỉnh bằng toán học, bởi vì việc thử sai thực tế có thể kéo dài nhiều ngày để tìm điểm ổn định cho vòng lặp. Giá trị tối ưu thì khó tìm hơn. Vài bộ điều khiển số còn có chức năng tự điều chỉnh, trong đó những thay đổi rất nhỏ của điểm đặt cũng được gửi tới quá trình, cho phép bộ điều khiển tự mình tính toán giá trị điều chỉnh tối ưu.

### 2.8.2 Bộ điều khiển SMC (Sliding Mode Control).

Điều khiển trượt (SMC) là một phương pháp điều khiển phi tuyến đơn giản nhưng hiệu quả. Thành phần của SMC cần phải có các thông số của mô hình đối tượng cũng như các chặn trên của các thành phần bất định của mô hình. Việc xác định các giá trị chặn trên của các thành phần bất định thường không chính xác. Người ta thường dùng các giá trị hằng để ước lượng các giá trị này. Khi thiết kế thành phần điều khiển bền vững, nếu việc chọn giá trị chặn trên quá lớn sẽ làm gia tăng hiện tượng “chattering”, làm tổn hao năng lượng điều khiển không cần thiết và xảy ra nhiều hiện tượng không mong muốn. Còn khi giá trị chặn trên thực lớn hơn giá trị chặn trên theo thiết kế thì hệ thống sẽ mất tính ổn định.

Ưu điểm của điều khiển trượt là nó ít nhạy với sự biến động của các thông số của mô hình và ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài. Điều khiển trượt đã được áp dụng

khá thành công để thiết kế các bộ điều khiển bền vững trong phòng thí nghiệm và ứng dụng rộng rãi trong thực tiễn. Tuy nhiên khi thiết kế các bộ điều khiển trượt có một số vấn đề thường gặp phải như sau: Thành phần điều khiển bền vững trong điều khiển trượt có dạng hàm dấu kết hợp với hiện tượng trễ vật lý của các đối tượng gây nên hiện tượng “chattering” các trạng thái xung quanh mặt trượt. Thông thường để hạn chế hiện tượng “chattering” người ta thường thay thế hàm dấu trong thành phần điều khiển bền vững bằng hàm bão hòa.

SMC có hai thông số thiết kế được lựa chọn là sự ổn định và hiệu suất. Tham số thiết kế thứ nhất là tham số bề mặt trượt mà các bề mặt trượt thay đổi theo thời gian [65] hoặc phi tuyến [66]. Tuy nhiên, quy luật điều khiển và điều kiện ổn định trở nên khó khăn hơn với mặt trượt phức tạp. Tham số thiết kế thứ hai là độ lợi điều khiển của điều khiển không liên tục. Về lý thuyết, hệ số khuếch đại điều khiển không liên tục hoạt động ở chế độ trượt khi quỹ đạo của hệ thống nằm trên mặt trượt. Tuy nhiên, trong quá trình triển khai thời gian thực, hiện tượng nhiễu xảy ra, xuất hiện dưới dạng dao động không mong muốn trên quỹ đạo hệ thống với tần số và biên độ hữu hạn, dẫn đến độ chính xác của điều khiển thấp như hệ thống cơ khí, tổn thất nhiệt độ và điều khiển mất ổn định vòng lặp [67]. Hai lý do gây ra hiện tượng “chattering” đã được xác định bởi [68] đó là động lực ‘không có mô hình’ của hệ thống thường bị bỏ qua trong quá trình thiết kế điều khiển và tốc độ lấy mẫu vốn có giới hạn trong bộ điều khiển. Để giảm nhiễu có một số phương pháp đã được phân tích bao gồm phương pháp thích ứng độ lợi chuyển đổi [69], [70] và phương pháp dựa trên người quan sát [71]. Ngoài ra, độ bão hòa [16], hoặc sử dụng hàm Sigmoid [72] thay vì hàm dấu cũng được sử dụng để giảm hoặc loại bỏ độ nhiễu. Các phương pháp giảm độ nhiễu khác dựa trên SMC được nghiên cứu bởi [73]. Về cơ bản, bộ điều khiển SMC có thể được thiết kế theo ba cách tiếp cận sau: Dựa trên quy luật tiếp cận mặt trượt (reaching law), dựa trên tín hiệu điều khiển tương đương (equivalent control) và dựa trên tham số cận trên (upper bound)[74].

2.8.2.1 Bộ điều khiển SMC theo luật tiếp cận mặt trượt.

Xét hệ thống như sau:

$$\ddot{x}(t) = -f(x, t) + bu(t) + d(t) \quad (2-42)$$

Trong đó  $-f(x, t)$  và  $b$  đã biết,  $b > 0$ ,  $d(t)$  là nhiễu của hệ thống.

Mặt trượt của bộ điều khiển SMC được định nghĩa như sau:

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (2-43)$$

Trong đó  $c$  thỏa điều kiện Hurwitz,  $c > 0$ .

Sai lệch và đạo hàm của sai lệch theo thời gian giữa tín hiệu mong muốn và tín hiệu thực tế được xác định như sau:

$$e(t) = x_d - x(t), \quad \dot{e}(t) = \dot{x}_d - \dot{x}(t)$$

Với  $r$  là tín hiệu mong muốn,  $x(t)$  là tín hiệu thực tế.

Đạo hàm mặt trượt được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= c\dot{e}(t) + \ddot{e}(t) = c(\dot{x}_d - \dot{x}(t)) + (\ddot{x}_d - \ddot{x}(t)) \\ &= c(\dot{x}_d - \dot{x}(t)) + (\ddot{x}_d + f - bu - d) \end{aligned} \quad (2-44)$$

Áp dụng luật tiếp cận hàm mũ, ta có:

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks, \quad \varepsilon > 0, \quad k > 0 \quad (2-45)$$

Từ phương trình (2-44) và (2-45) ta có;

$$c(\dot{x}_d - \dot{\theta}) + (\ddot{x}_d + f - bu - d) = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks$$

Từ (2-44) và (2-45) ta có:

$$u(t) = \frac{1}{b} (\varepsilon \text{sgn}(s) + ks + c(\dot{x}_d - \dot{x}) + \ddot{x}_d + f - d) \quad (2-46)$$

Trong luật điều khiển (2-46), tất cả các đại lượng ở phía bên phải của phương trình (2-46) là các đại lượng đã biết, ngoại trừ nhiễu  $d$  chưa biết. Do đó luật điều khiển ở phương trình (2-46) không thể sử dụng được. Để giải quyết vấn đề này,  $d$  trong phương trình (2-46) được thay thế bằng một đại lượng đã biết  $d_c$ .

Quy luật điều khiển của bộ điều khiển SMC được định nghĩa lại như sau:

$$u(t) = \frac{1}{b} (\varepsilon \text{sgn}(s) + ks + c(\dot{x}_d - \dot{\theta}) + \ddot{x}_d + f - d_c) \quad (2-47)$$

Trong đó  $d_c$  được chọn để đảm bảo hệ thống tiến về mặt trượt.

Thay thế phương trình (2-47) vào phương trình (2-44) và đơn giản hóa kết quả, ta nhận được:

$$\dot{s}(t) = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks + d_c - d \quad (2-48)$$

Với  $d_c$  được chọn để đảm bảo hệ thống tiến về mặt trượt. Giả sử  $d$  là giá trị được giới hạn trong phạm vi nhỏ nhất và lớn nhất ta có:

$$d_L \leq d(t) \leq d_U \quad (2-49)$$

Trong đó  $d_L$  và  $d_U$  là các giới hạn nhỏ nhất và giới hạn lớn nhất đã biết.

Từ phương trình (2-48),  $d_c$  được chọn như sau:

Khi  $s(t) > 0$ ,  $\dot{s}(t) = -\varepsilon - ks + d_c - d$ , muốn  $\dot{s}(t) < 0$  thì  $d_c = d_L$

Khi  $s(t) < 0$ ,  $\dot{s}(t) = \varepsilon - ks + d_c - d$ , muốn  $\dot{s}(t) > 0$  thì  $d_c = d_U$

Giả sử:  $d_1 = \frac{d_U - d_L}{2}$ ,  $d_2 = \frac{d_U + d_L}{2}$  thì ta có:

$$d_c = d_2 - d_1 \text{sgn}(s) \quad (2-50)$$

### 2.8.2.2 Bộ điều khiển SMC theo tín hiệu điều khiển tương đương

Trong bộ điều khiển chế độ trượt, quy luật điều khiển thường bao gồm điều khiển tương đương  $u_{eq}$  và điều khiển chuyển đổi  $u_{sw}$ . Điều khiển tương đương giữ trạng thái của hệ thống trên mặt trượt, trong khi điều khiển chuyển đổi buộc hệ thống trượt trên mặt trượt.

Xét một hệ thống phi tuyến SISO thứ tự  $n$  được mô tả như sau:

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, t) + bu(t) + d(t) \quad (2-51)$$

$$x = [x \quad \dot{x} \quad \dots \quad x^{(n-1)}]^T \quad (2-52)$$

Ở đây  $b > 0$ ,  $x \in \mathbf{R}^n$ ,  $u \in \mathbf{R}$ ,  $d(t)$  là nhiễu và các yếu tố không chắc chắn bên ngoài và được giả định  $|d(t)| \leq D$ .

Khi bỏ qua nhiễu và các yếu tố không chắc chắn bên ngoài, hệ được mô tả như sau:

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, t) + bu(t) \quad (2-53)$$

Vector sai số:

$$e = x_d - x = [e \quad \dot{e} \quad \dots \quad e^{(n-1)}]^T \quad (2-54)$$

Khi đó mặt trượt được xác định như sau:

$$s(x, t) = \mathbf{C}e = c_1 + c_2 \dot{e} + \dots + e^{(n-1)} \quad (2-55)$$



Ở đây  $\mathbf{C} = [c_1 \quad c_1 \quad \dots \quad c_{n-1} \quad 1]$  là véc tơ  $1 \times n$ .

Chọn  $\dot{s} = 0$ , ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x, t) &= c_1 \dot{e} + c_2 \ddot{e} + \dots + e^{(n)} = c_1 \dot{e} + c_2 \ddot{e} + \dots + c_{n-1} e^{(n-1)} + x_d^{(n)} - x^{(n)} \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x_d^{(n)} - f(x, t) - bu(t) = 0 \end{aligned} \quad (2-56)$$

Luật điều khiển tương đương được thiết kế như sau:

$$u_{eq} = \frac{1}{b} \left( \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x_d^{(n)} - f(x, t) \right) \quad (2-57)$$

Để đáp ứng các điều kiện của điều khiển chế độ trượt  $s(x, t)$ .  $\dot{s}(x, t) \leq -\eta|s|$ ,  $\eta \geq 0$  thì ta chọn luật điều khiển chuyển đổi là:

$$u_{sw} = \frac{1}{b} K \operatorname{sgn}(s) \quad (2-58)$$

Với  $K = D + \eta$

Bộ điều khiển trượt bao gồm luật điều khiển tương đương và luật điều khiển chuyển đổi được biểu diễn như sau:

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (2-59)$$

Sự ổn của hệ thống:

$$\dot{s}(x, t) = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x_d^{(n)} - f(x, t) - bu(t) - d(t) \quad (2-60)$$

Từ (2-59), (2-60) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x, t) &= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x_d^{(n)} - f(x, t) - b \left( \frac{1}{b} \left( \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x_d^{(n)} - f(x, t) \right) + \frac{1}{b} K \operatorname{sgn}(s) \right) - d(t) \\ &= -K \operatorname{sgn}(s) - d(t) \end{aligned}$$

Do đó ta có:

$$s\dot{s} = s(-K \operatorname{sgn}(s)) - s.d(t) = -\eta|s| \leq 0 \quad (2-61)$$

Hệ thống ổn định.

### 2.8.2.3 Bộ điều khiển SMC theo tham số cận trên.

Xét một hệ phi tuyến bậc 2 như sau:

$$\ddot{\theta} = f(x, \dot{x}) + \Delta f(\cdot, \dot{x}) + g(x, \dot{x})u + \Delta g(x, \dot{x})u + d_0(t) \quad (2-62)$$

Trong đó  $f$  và  $g$  là hàm phi tuyến đã biết,  $u$  và  $x$  là tín hiệu điều khiển đầu vào và sự đo lường đầu ra tương ứng ( $u \in R$  và  $x \in R$ ),  $d_0(t)$  là nhiễu của hệ thống và với  $|d(x, \dot{x}, t)| \leq D$ ,  $D$  là hằng số dương.

Giả sử:  $d(x, \dot{x}, t) = \Delta f(x, \dot{x}) + \Delta g(x, \dot{x})u + d_0(t)$ , khi đó phương trình (2-62) được viết lại như sau:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}) + g(x, \dot{x})u + d(x, \dot{x}, t) \quad (2-63)$$

Sai lệch tín hiệu mong muốn đầu vào và tín hiệu thực tế đầu ra được định nghĩa như sau:  $e = x_d - x$ .

Mặt trượt được định nghĩa như sau:

$$s = \dot{e} + ce \quad (2-64)$$

Trong đó  $c$  thỏa điều kiện Hurwitz  $c > 0$ .

Đạo hàm mặt trượt được xác định như sau:

$$\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e} = \ddot{x}_d - \ddot{x} + c\dot{e} = \ddot{x}_d - f - gu - d + c\dot{e}$$

Tín hiệu điều khiển được xác định như sau:

$$u = \frac{1}{g}[-f + \ddot{x}_d + c\dot{e} + \eta \text{sgn}(s)] \quad (2-65)$$

Sự ổn định của hệ thống được chứng minh như sau:

Áp dụng hàm Lyapunov:  $L = \frac{1}{2}s^2$

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} = s(\ddot{x}_d - f - gu - d + c\dot{e}) \\ &= s(\ddot{x}_d - f - (-f + \ddot{x}_d + c\dot{e} + \eta \text{sgn}(s)) - d + c\dot{e}) \\ &= s(-d - \eta \text{sgn}(s)) \\ &= -sd - \eta|s| \end{aligned}$$

Nếu  $\eta \geq D$  thì:

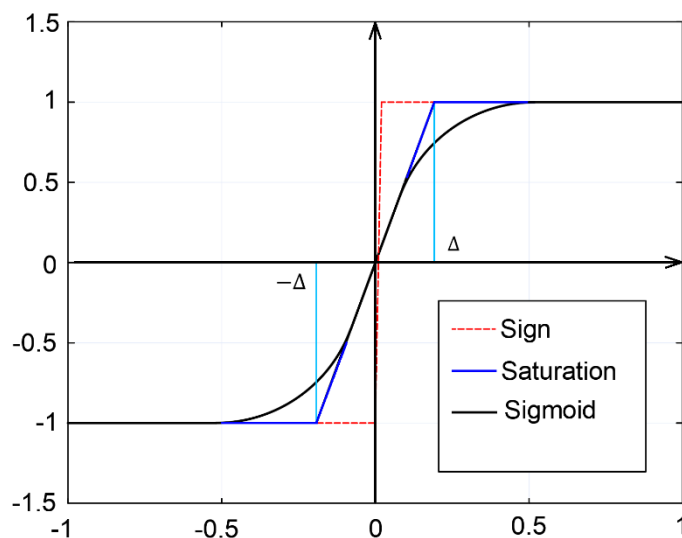
$$\dot{L} = -sd - \eta|s| \leq 0, \text{ hệ thống ổn định.}$$

Để hạn chế hiện tượng nhiễu (chattering), hàm bão hòa  $\text{sat}(s)$  được sử dụng thay vì  $\text{sgn}(s)$  trong phương trình (2-66) như sau:

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ ks, & |s| \leq \Delta, k = 1/\Delta \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (2-66)$$

với  $\Delta$  là lớp biên (boundary layer)

Ngoài việc sử dụng hàm bão hòa sat(s) thì hàm mũ và hàm lượng giác cũng được áp dụng như hàm sigmoid để giảm thiểu hiện tượng nhiễu của bộ điều khiển trượt Hình 2.12.



**Hình 2.12:** Đồ thị hàm bão hòa.

## Chương 3

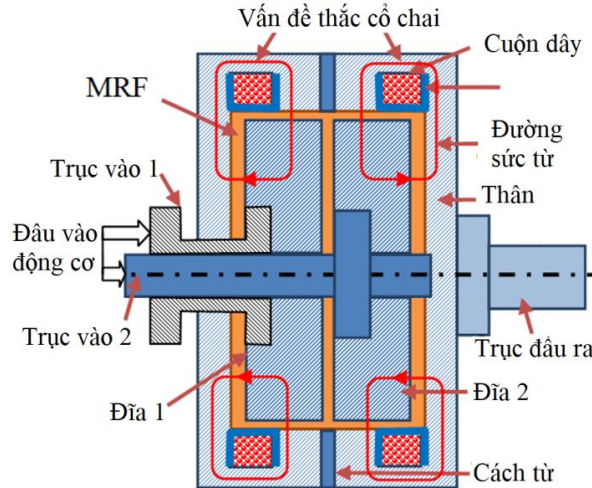
# PHÁT TRIỂN CƠ CẤU HAI CHIỀU DÙNG MRF

Các cơ cấu sử dụng MRF truyền thống đều bố trí cuộn dây phía trên mặt trụ của đĩa điều này sẽ hạn chế việc từ trường đi qua các vị trí cần thiết của phanh, đôi khi rơi vào hiện tượng “thắt nút chai” dẫn tới làm giảm hiệu suất của cơ cấu, kết cấu công kênh làm tăng khối lượng của cơ cấu. Một vấn đề khác của hệ thống phản hồi lực là khi ở trạng ban đầu đều mong muốn lực bằng không. Nhược điểm của phanh MRF là khi không có dòng điện áp dụng thì khó kiểm soát được lực cũng như mô men đầu ra. Khi đó một lực phản hồi nhỏ lên hệ thống thì nó không thể phản ánh được điều này sẽ làm giảm tính năng của hệ thống phản hồi. Ngoài ra, đối với hệ thống phản hồi sử dụng phanh MRF, để cảm nhận được lực phản hồi thì người vận hành cần di chuyển hệ thống phản hồi. Do đó, lực phản hồi không được phản ánh cho người vận hành nếu hệ thống đứng yên. Để khắc phục nhược điểm này gần đây cơ cấu hai chiều dùng MRF (BMRA) đã được phát triển cho ứng dụng trong hệ thống phản hồi lực.

### 3.1 Cơ cấu hai chiều dùng MRF (BMRA).

#### 3.1.1 Mô hình BMRA của Nguyen P. B [56].

Tác giả Nguyen P. B là người đầu tiên đề xuất cơ cấu hai chiều sử dụng MRF [56] (**Hình 3.1**). Do bố trí hai đĩa quay cùng tốc độ nhưng ngược chiều nên có thể khử được ma sát ban đầu của cơ cấu. Tuy nhiên BMRA của Nguyen P. B vẫn sử dụng kết cấu truyền thống đó là vị trí của cuộn dây vẫn bố trí phía trên mặt trụ của đĩa. Điều này sẽ hạn chế từ trường đi qua khe MRF, đôi khi rơi vào hiện tượng “thắt nút cổ chai”, dễ bão hoà từ dẫn tới hiệu suất của cơ cấu giảm. Hơn nữa việc tối ưu hoá hình học chưa được xem xét nên kết cấu BMRA còn khá lớn, mô men phản hồi không cao chỉ đạt 1.2 Nm.



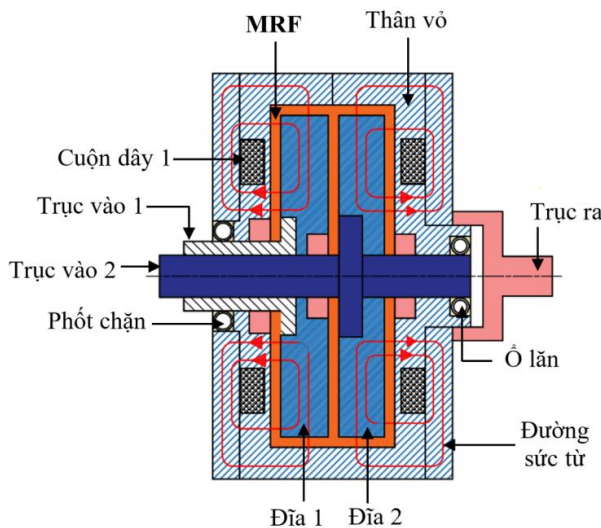
**Hình 3.1:** Cơ cấu hai chiều dùng BMRA\_[56].

### 3.1.2 Mô hình BMRA mới đề xuất.

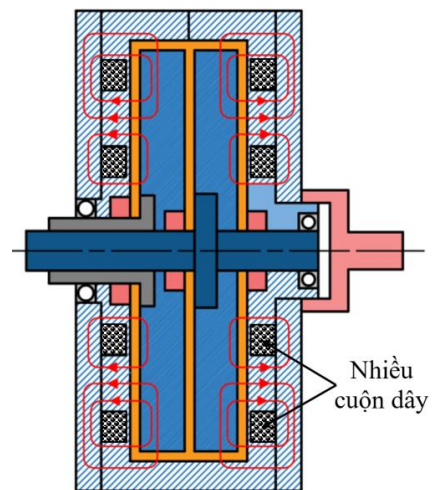
Để khắc phục một số tồn tại của mẫu BMRA\_[56], và trên cơ sở của cơ cấu 2 chiều đã phát triển bởi [76], tác giả đã phát triển một cơ cấu BMRA mới với các cuộn dây được bố trí tại mỗi bên mặt đầu thân vỏ của BMRA. Điều này sẽ khắc phục được hiện tượng thắt nút chai cũng như bão hòa từ tại một số vị trí của BMRA, đồng thời tác giả có xét tới bài toán tối ưu hình học BMRA sao cho khối lượng của BMRA đề xuất nhỏ nhất và mô men đầu ra đạt theo yêu cầu cho trước.

Tác giả đưa ra hai phương án cho BMRA của mình đó là:

- Phương án 1: BMRA có một cuộn dây ở mỗi bên (BMRA1) (**Hình 3.2**)
- Phương án 2: BMRA có hai cuộn dây ở mỗi bên (BMRA2) (**Hình 3.3**)



**Hình 3.2:** Cấu hình BMRA1.



**Hình 3.3:** Cấu hình BMRA2.

### 3.1.2.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động BMRA.

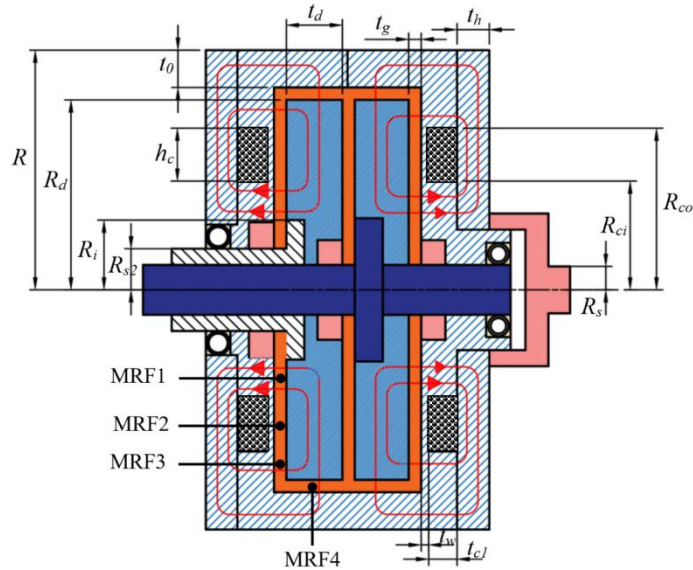
🔗 Về cấu tạo của BMRA1, BMRA2 là giống nhau chỉ khác nhau về số lượng cuộn dây bố trí trên thân vỏ. Cụ thể là đối với BMRA1 chỉ bố trí 1 cuộn dây ở mỗi bên thân vỏ, còn BMRA2 thì được bố trí 2 cuộn dây mỗi bên. Vì vậy cấu tạo của chúng bao gồm: đĩa 1 và đĩa 2 lần lượt được lắp chặt trên trục vào 1 và trục vào 2, hai trục này được cố định bằng các ổ lăn và trên các trục có bố trí các phốt chặn không cho MRF rò rỉ ra ngoài. Đồng thời hai trục này được dẫn động bởi hệ bánh răng bên ngoài sao cho hai trục đầu vào quay cùng tốc độ và ngược chiều nhau. Khe hở giữa thân vỏ và các đĩa sẽ được điền đầy MRF. Các cuộn dây được bố trí mặt bên BMRA có một màng mỏng ngăn cho cuộn dây không tiếp xúc với MRF.

🔗 Về nguyên lý hoạt động của BMRA: trục vào 1 và 2 sẽ được dẫn động bởi một động cơ AC servo thông qua một hệ thống truyền lực bên ngoài (hệ bánh răng côn) làm cả hai trục quay cùng tốc độ nhưng ngược chiều. Do hai đĩa được gắn cố định với hai trục tương ứng nên cũng được quay cùng tốc độ nhưng ngược chiều. Khi một dòng điện chỉ áp dụng vào cuộn dây 1 của BMRA1 thì một từ trường tương ứng được tạo ra xung quanh cuộn dây. Khi đó từ trường sẽ làm cho MRF trong khe MRF bên trái của đĩa 1 trở nên sệt lại ngay lập tức. Từ ma sát giữa đĩa 1 với MRF và MRF với thân vỏ BMRA sẽ tạo ra mô men ma sát đầu ra của BMRA ( $T_1$ ) thông qua trục đầu ra được găng cố định trên thân vỏ BMRA quay cùng chiều với đĩa 1 (CW). Mô men đầu ra chủ yếu sinh ra đĩa 1, bên còn lại có mô men đi qua nhưng tương đối nhỏ. Độ lớn của mô men đầu ra của BMRA1 phụ thuộc vào dòng điện áp dụng cho cuộn dây 1. Tương tự cuộn dây của đĩa 2, khi dòng điện chỉ áp dụng vào cuộn dây 2 thì mô men ma sát đầu ra do đĩa 2 của BMRA1 ( $T_2$ ) được tạo ra thông qua trục ra của BMRA1 và trục ra quay cùng chiều quay với đĩa 2 (CCW).

### 3.1.2.2 Mô men ma sát đầu ra của các BMRA.

🔗 Mô men ma sát BMRA1.

Để tính mô men ma sát sinh ra trên hai đĩa của BMRA1, tác giả chia khe lưu chất thành 4 vùng để tính mô men đó là MRF1, MRF2, MRF3, MRF4 tương ứng với các bán kính  $R_i$ ,  $R_{ci}$ ,  $R_{co}$ ,  $R_d$  được thể hiện bởi **Hình 3.4**.



**Hình 3.4:** Thông số hình học BMRA1.

Mô men đầu ra của BMRA1 được tạo ra bởi ma sát của hai đĩa 1 và đĩa 2 và ma sát của các phốt với trục. Do hai đĩa quay ngược chiều, cùng tốc độ nên mô men đầu ra BMRA được tính như sau:

$$T_{01} = T_1 - T_2 + T_{s1} - T_{s2} \quad (3-1)$$

Trong đó:

- $T_{01}$ : mô men đầu ra của BMRA1.
- $T_1$ : mô men sinh ra giữa đĩa 1 (bên trái) và thân vỏ.
- $T_2$ : mô men sinh ra giữa đĩa 2 (bên phải) và thân vỏ.
- $T_{s1}$ : mô men ma sát giữa các phốt và trục 1.
- $T_{s2}$ : mô men ma sát giữa các phốt và trục 2.

Mô men ma sát trên từng đĩa của BMRA1 được tính theo công thức (2-18), (2-19):

$$\begin{aligned} T_1 = & \frac{\pi\mu_{d11}R_{ci}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{ci}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{yd11}}{3} (R_{ci}^3 - R_i^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{d12}R_{co}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci}}{R_{co}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{yd12}}{3} (R_{co}^3 - R_{ci}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{d13}R_d^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{yd13}}{3} (R_d^3 - R_{co}^3) \\ & + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{yd14} + \mu_{d14} \frac{|\omega_1| R_d}{t_g}) \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned}
 T_2 = & \frac{\pi\mu_{d21}R_{ci}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{ci}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{yd21}}{3} (R_{ci}^3 - R_i^3) \\
 & + \frac{\pi\mu_{d22}R_{co}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci}}{R_{co}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{yd22}}{3} (R_{co}^3 - R_{ci}^3) \\
 & + \frac{\pi\mu_{d23}R_d^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{yd23}}{3} (R_d^3 - R_{co}^3) \\
 & + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{yd24} + \mu_{d24} \frac{|\omega_2|R_d}{t_g})
 \end{aligned} \tag{3-3}$$

Với thông số lưu biến của MRF:

- $\mu_{d11}, \mu_{d12}, \mu_{d13}, \mu_{d14}$ : độ nhớt sau chảy dẻo của MRF tương ứng tại các vị trí MRF1, MRF2, MRF3, MRF4 của đĩa 1
- $\tau_{d11}, \tau_{d12}, \tau_{d13}, \tau_{d14}$ : ứng suất chảy dẻo của MRF tương ứng tại các vị trí MRF1, MRF2, MRF3, MRF4 của đĩa 1
- $\mu_{d21}, \mu_{d22}, \mu_{d23}, \mu_{d24}$ : độ nhớt sau chảy dẻo của MRF tương ứng tại các vị trí MRF1, MRF2, MRF3, MRF4 của đĩa 2
- $\tau_{d21}, \tau_{d22}, \tau_{d23}, \tau_{d24}$ : ứng suất chảy dẻo của MRF tương ứng tại các vị trí MRF1, MRF2, MRF3, MRF4 của đĩa 2

Với thông số hình học của BMRA:

- $R$  là bán kính BMRA,  $R_d$  là bán kính đĩa,  $R_{di}$  là bán kính mặt bích trục 1
- $R_{ci}$  là bán kính trong cuộn dây,  $R_{co}$  là bán kính ngoài cuộn dây
- $h_c$  là chiều cao cuộn dây,  $t_0$  là bề dày mặt trụ,  $t_d$  bề dày đĩa
- $t_g$  là bề dày khe MRF,  $t_h$  là bề dày thành đứng BMRA
- $t_{c1}$  là bề rộng cuộn dây BMRA1,  $t_w$  là bề dày thành mỏng
- $R_{s1}$  là bán kính trục 1,  $R_{s2}$  là bán kính trục
- Vận tốc góc của đĩa hai đĩa:  $\omega_l, \omega_l$

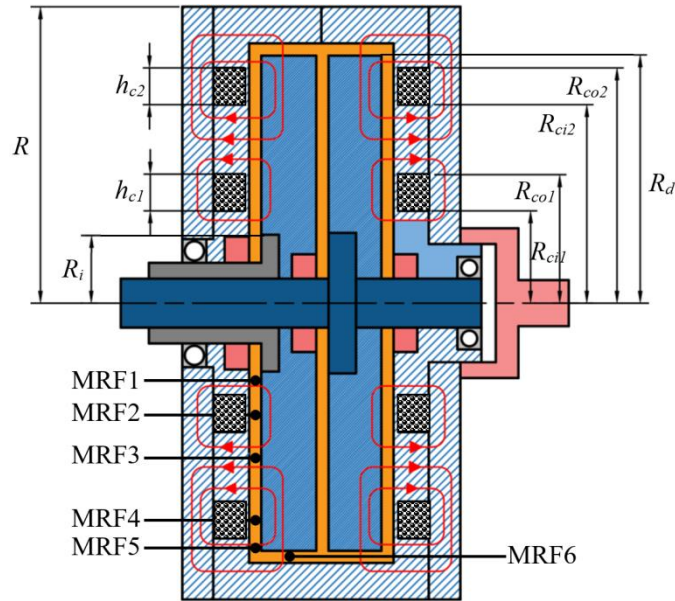
Với  $T_{s1} = 0,65(2R_{s1})^2\omega_1^{1/3}$ ;  $T_{s2} = 0,65(2R_{s2})^2\omega_2^{1/3}$  theo công thức (2-24)

✚ Mô men ma sát của BMRA2.

Trong thực tế với yêu cầu mô men lớn thì BMRA một cuộn dây khó đạt được. Vì vậy, tác giả khảo sát thêm trường hợp nhiều cuộn dây, cụ thể là 2 cuộn dây. Cấu hình đề xuất BMRA hai cuộn dây bên thân vỏ (BMRA2) thể hiện bởi **Hình 3.5**.



Để tính mô men ma sát đầu ra của BMRA2, tác giả chia khe lưu chất thành 6 vùng lưu chất tính mô men đó là MRF1, MRF2, MRF3, MRF4, MRF5, MRF6 tương ứng với các bán kính  $R_i$ ,  $R_{ci1}$ ,  $R_{co1}$ ,  $R_{ci2}$ ,  $R_{co2}$ ,  $R_d$  được thể hiện bởi **Hình 3.5**.



**Hình 3.5:** Thông số hình học BMRA2.

Mô men đầu ra của BMRA2 được tính như sau:

$$T_{o2} = T_{d1} - T_{d2} + T_{s1} - T_{s2} \quad (3-4)$$

Trong đó:

- $T_{o2}$ : mô men đầu ra của BMRA2
- $T_{d1}$ : mô men sinh ra giữa đĩa 1 (bên trái) và thân vỏ
- $T_{d2}$ : mô men sinh ra giữa đĩa 2 (bên phải) và thân vỏ
- $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ : được tính tương tự như BMRA1

Mô men sinh ra trên hai đĩa của BMRA2 được tính theo công thức (2-18), (2-19):

$$\begin{aligned} T_{d1} = & \frac{\pi\mu_{11}R_{ci1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{ci1}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y11}}{3} (R_{ci1}^3 - R_i^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{12}R_{co1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci1}}{R_{co1}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y12}}{3} (R_{co1}^3 - R_{ci1}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{13}R_{ci2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co1}}{R_{ci2}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y13}}{3} (R_{ci2}^3 - R_{co1}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\pi\mu_{14}R_{co2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci2}}{R_{co2}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y14}}{3} (R_{co2}^3 - R_{co1}^3) \\
 & + \frac{\pi\mu_{15}R_d^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co2}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y15}}{3} (R_d^3 - R_{co2}^3) \\
 & + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{d16} + \mu_{16} \frac{|\omega_1| R_d}{t_g}) \tag{3-5}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{d2} = & \frac{\pi\mu_{21}R_{ci1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{ci1}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y21}}{3} (R_{ci1}^3 - R_i^3) \\
 & + \frac{\pi\mu_{22}R_{co1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci1}}{R_{co1}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y22}}{3} (R_{co1}^3 - R_{ci1}^3) \\
 & + \frac{\pi\mu_{23}R_{ci2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co1}}{R_{ci2}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y23}}{3} (R_{ci2}^3 - R_{co1}^3) \\
 & + \frac{\pi\mu_{24}R_{co2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci2}}{R_{co2}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y24}}{3} (R_{co2}^3 - R_{co1}^3) \\
 & + \frac{\pi\mu_{25}R_d^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co2}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y25}}{3} (R_d^3 - R_{co2}^3) \\
 & + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{d26} + \mu_{26} \frac{|\omega_2| R_d}{t_g}) \tag{3-6}
 \end{aligned}$$

### 3.2 Thiết kế tối ưu cho các BMRA.

Thiết kế tối ưu cho các BMRA là chúng ta đi tìm giá trị các kích thước hình học của BMRA sao cho khối lượng của các BMRA ( $m_b$ ) là nhỏ nhất với mô men đầu ra của các BMRA ( $T_b$ ) được ràng buộc bằng hoặc lớn hơn giá trị yêu cầu (giá trị yêu cầu được đưa ra tùy thuộc vào từng ứng dụng cụ thể).

Từ đó ta có các yếu tố ban đầu cho bài toán tối ưu hóa bao gồm:

- Hàm mục tiêu: khối lượng của BMRA ( $m_b$ ) là nhỏ nhất.

$$m_b = V_{d1}\rho_{d1} + V_{d2}\rho_{d2} + V_h\rho_h + V_{s1}\rho_{s1} + V_{s2}\rho_{s2} + V_{MRF}\rho_{MRF} + V_c\rho_c \tag{3-7}$$

Trong đó:

- $V_{d1}, V_{d2}, V_h, V_{s1}, V_{s2}, V_{MRF}, V_c$  là thể tích của các bộ phận cấu tạo nên BMRA tương ứng đó là thể tích của đĩa 1, đĩa 2, vỏ, trục 1, trục 2, MRF và cuộn dây.
- Khối lượng riêng tương ứng đó là  $\rho_{d1}, \rho_{d2}, \rho_h, \rho_{s1}, \rho_{s2}, \rho_{MRF}, \rho_c$
- Biến thiết kế: tất các thông số hình học chủ yếu của BMRA.

- Điều kiện ràng buộc: mô men đầu ra của BMRA  $T_b \geq 5 \text{ Nm}$ .
- Vật liệu áp dụng phải là vật liệu từ tính nên tác giả sử dụng thép hợp kim C45, áp dụng cho thân vỏ, đĩa của BMRA. Hơn nữa, vật liệu C45 thông dụng trên thị trường, chi phí phù hợp.
- Vật liệu Inox 304 áp dụng cho các trục đầu vào và ra của BMRA để lưu chất xung quanh phốt không bị cứng lại khi kích hoạt từ trường ở BMRA.
- MRF sử dụng là MRF-132DG. Đây là lưu chất có từ tính trung bình, tính đáp ứng tốt.

**Bảng 3.1:** Vật liệu và khối lượng riêng các chi tiết của BMRA.

Bộ phận	Vật liệu	Khối lượng riêng ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )
Trục	Inox 304	7900
Đĩa và vỏ	Thép C45	7850
Cuộn dây	Đồng (24 gage)	8900
MRF	MRF-132DG	2400

Trong quá trình tính toán tối ưu thì các kích thước hình học quan trọng của BMRA1 và BMRA2 như chiều cao của cuộn dây ( $h_c$  của BMRA1 và  $h_{c1}$ ,  $h_{c2}$  của BMRA2), chiều rộng của cuộn dây ( $w_c$ ), bán kính ngoài đĩa ( $R_d$ ), bán kính trong của đĩa ( $R_{di}$ ), vị trí của các cuộn dây trên vỏ ( $R_{ci}$  đối với BMRA1 và  $R_{ci1}$ ,  $R_{ci2}$  đối với BMRA2), độ dày của đĩa ( $t_d$ ), bề dày của vỏ hình trụ ( $t_0$ ), bề dày bên ngoài của vỏ ( $t_h$ ) được chọn làm biến thiết kế.

Tuy nhiên, kích thước khe hở nhỏ làm tăng mô men BMRA ở trạng thái dòng điện không áp dụng, sẽ làm giảm hiệu suất của cơ cấu, năng lượng tiêu tán cao, sinh nhiệt cao và nhanh mòn, ngoài ra kích thước khe hở nhỏ sẽ gây khó khăn trong chế tạo. Vì vậy, kích thước khe MRF không được chọn làm biến thiết kế trong tối ưu hóa mà được xác định theo kinh nghiệm và được chọn  $t_g = 0,8 \text{ mm}$ . Đối với độ dày thành mỏng của vỏ ở vị trí cuộn dây ( $t_w$ ) nên càng nhỏ càng tốt để hạn chế từ thông đi qua nhưng buộc từ thông đi qua các ống MRF,  $t_w$  cũng không nên chọn quá nhỏ vì dẫn tới khó khăn trong chế tạo và độ cứng của kết cấu không đảm bảo. Vì vậy, độ dày của

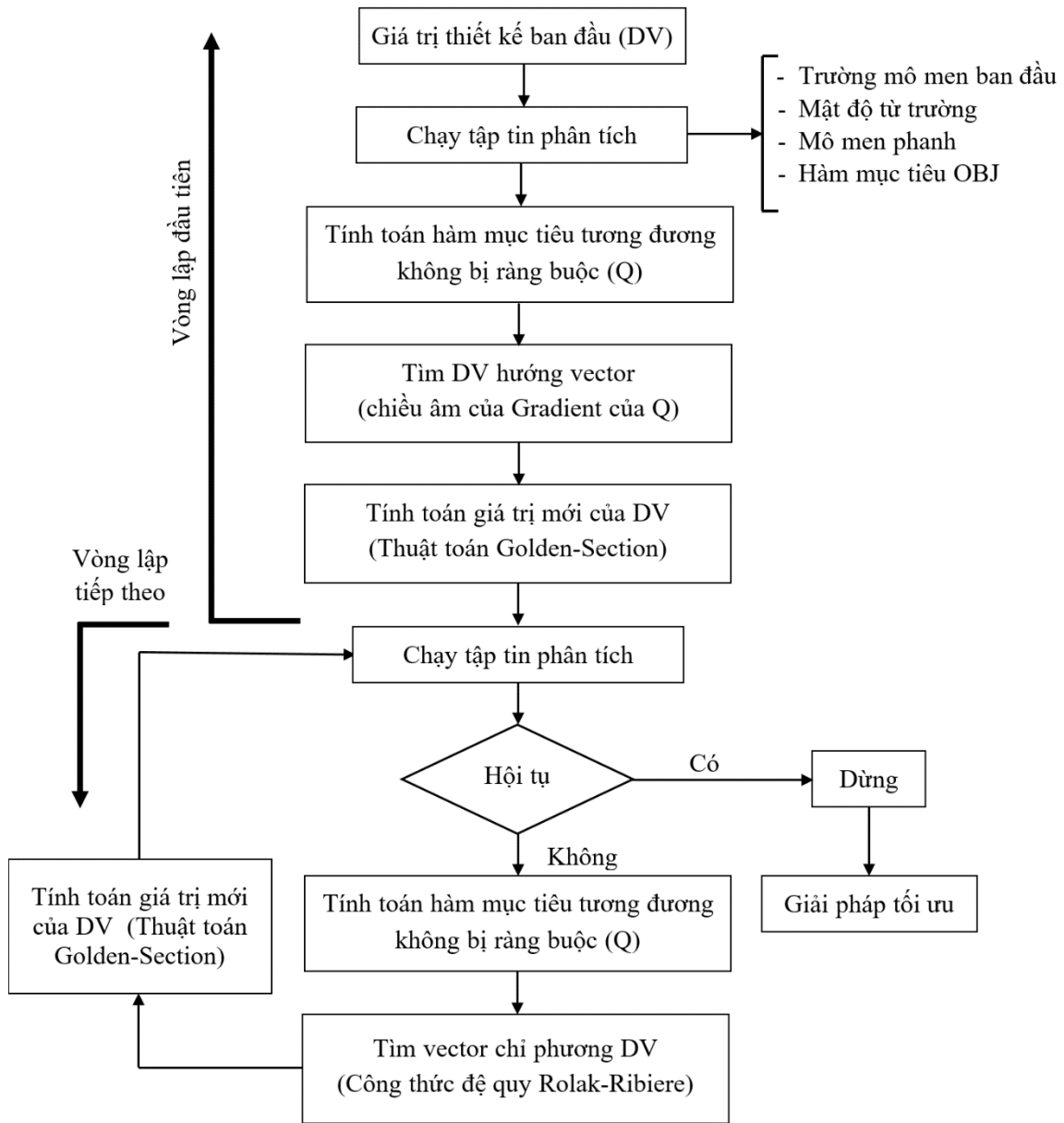
thành mỏng cũng không được coi là biến thiết kế mà được xác định theo kinh nghiệm và chọn  $t_w = 0,6$  mm.

### 3.2.1 Tối ưu hoá một mục tiêu cho BMRA.

Trong các phương pháp tối ưu cục bộ thì phương pháp First Orders hội tụ nhanh. Hơn nữa, phương pháp này được tích hợp trong công cụ tối ưu của phần mềm thương mại ANSYS, nên có thể sử dụng dễ dàng và tính toán nhanh hơn và không cần tương tác giữa các phần mềm. Tuy nhiên, các giá trị ban đầu của biến thiết kế phải chọn tương đối chính xác (phụ thuộc vào kinh nghiệm). Một số thuật toán tối ưu hóa đạo hàm bậc nhất điển hình là phương pháp độ dốc, độ dốc liên hợp được áp dụng trong nghiên cứu này thể hiện bởi **Hình 3.6**. Trong phần mềm ANSYS có hỗ trợ về vấn đề thiết kế tối ưu bằng công cụ tối ưu tích hợp. Vì thế, trong hầu hết các trường hợp, bài toán tối ưu của các cơ cấu dùng MRF có thể được giải quyết trực tiếp bằng phần mềm ANSYS mà không cần phải thông qua bất kỳ phần mềm lập trình nào khác.

Trước hết giá trị ban đầu của các biến thiết kế (Design Variable - DV) được chọn từ ban đầu. Thời gian tính toán tối ưu phụ thuộc đáng kể vào giá trị được chọn ban đầu. Do đó, giá trị ban đầu của các biến thiết kế nên được tính toán dựa trên tính toán sơ bộ hoặc dựa trên kinh nghiệm thực tế. Sau đó, một tập phân tích để giải quyết mạch từ và tính toán đặc tính hiệu suất của các thiết bị như năng lượng điều khiển, hằng số thời gian cảm ứng, giảm áp suất, lực, mô men phanh. Trong ANSYS, tập tin phân tích được xây dựng bằng ngôn ngữ thiết kế tham số (APDL). Cần lưu ý rằng tập tin phân tích này được tạo từ mô hình giao diện người dùng đồ họa (GUI) của ANSYS. Trong tập tin phân tích, các biến thiết kế phải được sử dụng làm biến tượng trưng và giá trị ban đầu được gán cho chúng.

Để tính toán các đặc tính hiệu suất của cơ cấu thì cần tính toán mật độ từ thông trên toàn bộ thể tích hoạt động của MRF. Mật độ từ thông ( $B$ ) và cường độ từ trường ( $H$ ) không phải là hằng số dọc theo ống MRF. Mật độ từ thông và cường độ từ trường trung bình trên ống MRF được tính bằng cách tích phân mật độ từ thông dọc theo đường dẫn được xác định trước, sau đó chia cho chiều dài đường dẫn.



**Hình 3.6:** Lưu đồ tối ưu hóa bằng phương pháp First Order.

Để tính hằng số thời gian quy nạp trước tiên từ thông được xác định như sau:

$$\Phi = 2\pi \cdot R_d \int_{L_p} B(s) \cdot ds \tag{3-8}$$

Trong đó  $B(s)$  là mật độ từ thông tại mỗi điểm nút trên đường dẫn,  $s$  là một biến giả của tích phân. Việc tích phân được thực hiện dọc theo chiều dài đường dẫn  $L_p$ . Đáng chú ý là kích thước hình học của các cơ cấu MRF thay đổi trong quá trình tối ưu hóa, do đó kích thước chia lưới của mô hình phần tử hữu hạn phải được chỉ định bởi số lượng phần tử trên mỗi dòng thay vì kích thước phần tử.

Công cụ tối ưu hóa ANSYS sẽ chuyển đổi vấn đề tối ưu hóa bị ràng buộc thành vấn đề không bị ràng buộc thông qua hàm Penalty (hàm phạt), đó là hàm mục tiêu không thứ nguyên, không ràng buộc. Hàm Penalty được xây dựng từ các giá trị khởi tạo ban đầu của các biến thiết kế, sau đó chạy tập tin phân tích ta có được giá trị khởi tạo của các đặc tính hoạt động của cơ cấu như năng lượng điều khiển, hằng số thời gian điện cảm, lực/mô men của BMRA. Với công cụ tối ưu của ANSYS, sau đó sẽ chuyển đổi các bài toán tối ưu bị ràng buộc thành không ràng buộc thông qua hàm Penalty. Hàm mục tiêu tương đương không ràng buộc có phương trình:

$$Q(x, q) = \frac{OBJ}{OBJ_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \sum_{i=1}^m P_g(g_i) \quad (3-9)$$

Trong đó:

- $OBJ_0$  là giá trị hàm mục tiêu tham chiếu được xác định từ giá trị của các biến thiết kế ban đầu,  $q$  là tham số bề mặt kiểm soát thỏa mãn ràng buộc;
- $P_x$  là hàm phạt Penalty bên ngoài áp dụng cho biến thiết kế  $x$ ;
- $P_g$  là hàm phạt Penalty nội bộ áp dụng cho biến trạng thái  $g$ .

Đối với vòng lặp ban đầu ( $j=0$ ), hướng tìm kiếm của biến thiết kế là độ dốc âm của hàm mục tiêu không ràng buộc. Khi đó vector chỉ phương được tính như sau:

$$d^{(0)} = -\nabla Q(x^{(0)}, 1) \quad (3-10)$$

Các giá trị của DV trong lần lặp tiếp theo ( $j+1$ ) được lấy từ phương trình sau:

$$x^{(j+1)} = x^{(j)} + s_j d^{(j)} \quad (3-11)$$

Trong đó tham số tìm kiếm  $s_j$  được tính bằng cách sử dụng kết hợp giải thuật Golden-Section với kỹ thuật “Local quadratic fitting”. Tập tin phân tích sau đó tính với giá trị mới DV và kiểm tra sự hội tụ của hàm mục tiêu. Nếu quá trình hội tụ xảy ra thì các giá trị DV tại vòng lặp thứ  $j$  là giá trị tối ưu, còn nếu không vòng lặp tiếp theo sẽ được tiếp tục. Tại vòng lặp tiếp theo, diễn ra tương tự như vòng lặp đầu tiên ngoại trừ vector chỉ phương được tính theo công thức đệ quy Polak-Ribiere:

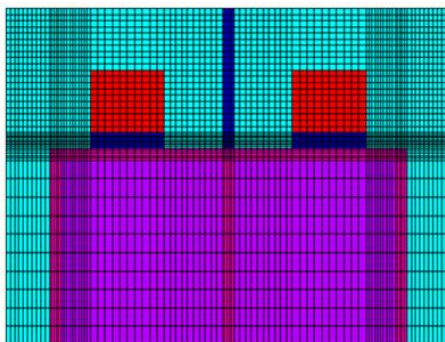
$$d^{(j)} = -\nabla Q(x^{(j)}, q_k) + r_{j-1} d^{(j-1)} \quad (3-12)$$

$$r_{j-1} = \frac{[\nabla Q(x^{(j)}, q) - \nabla Q(x^{(j-1)}, q)]^T \nabla Q(x^{(j)}, q)}{|\nabla Q(x^{(j-1)}, q)|^2} \quad (3-13)$$

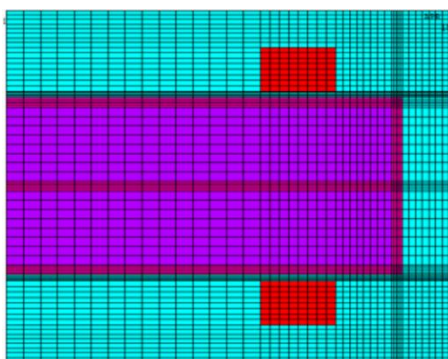
Để xác định thông số lưu biến của MRF tác giả sử dụng phương trình (2-12), trước hết từ thông B qua khe MRF được xác định. Trong nghiên cứu này, phân tích phần tử hữu hạn (FEA) được thực hiện để giải quyết mạch từ của các BMRA. Mô hình phần tử hữu hạn sử dụng phần tử đối xứng trục 2D (PLANE 13) của phần mềm ANSYS thương mại để giải các mạch từ của BMRA.

Trong quá trình tối ưu, các giá trị của kích thước hình học được thay đổi liên tục trong mỗi lần lặp. Do đó kích thước chia lưới được xác định bởi số phần tử của mỗi dòng để đảm bảo số phần tử không thay đổi trong quá trình tối ưu hóa. Lưới càng nhỏ thì kết quả càng chính xác, tuy nhiên thời gian tính toán sẽ lớn. Lưới xác định bởi số phần tử trên mỗi đường thẳng, khi số phần tử được chia trên mỗi đường lớn hơn hoặc bằng 10 thì kết quả mô phỏng đã hội tụ. Sai lệch khi tăng lưới từ 10 phần tử lên 12 phần tử chỉ khoảng 0,2 % đảm bảo được độ hội tụ mong muốn.

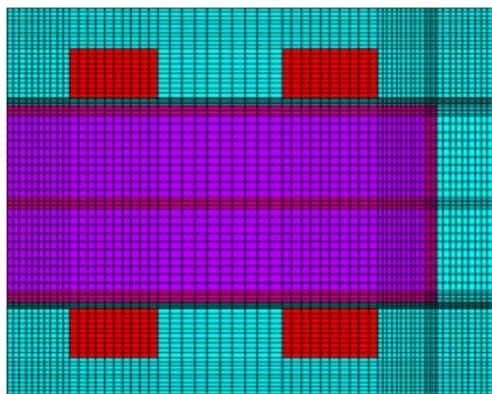
Để so sánh hiệu quả của cơ cấu mới đề xuất thì việc tối ưu hóa BMRA\_[56] cũng được xem xét trong nghiên cứu này và mô hình phần tử hữu hạn của các BMRA được thể hiện trong **Hình 3.7**, **Hình 3.8**, **Hình 3.9**.



**Hình 3.7:** Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA\_[56].



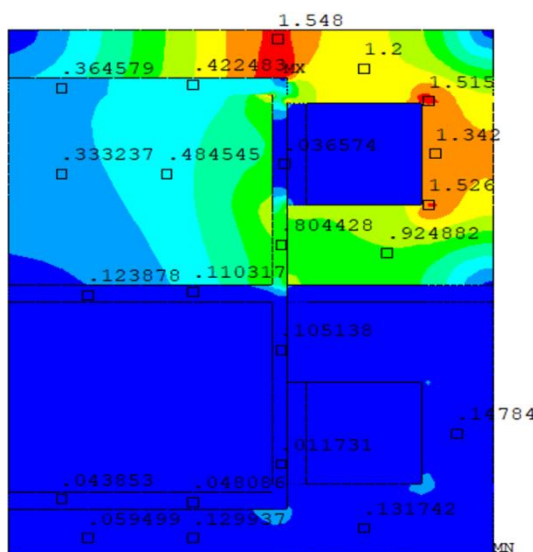
**Hình 3.8:** Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA1.



**Hình 3.9:** Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA2.

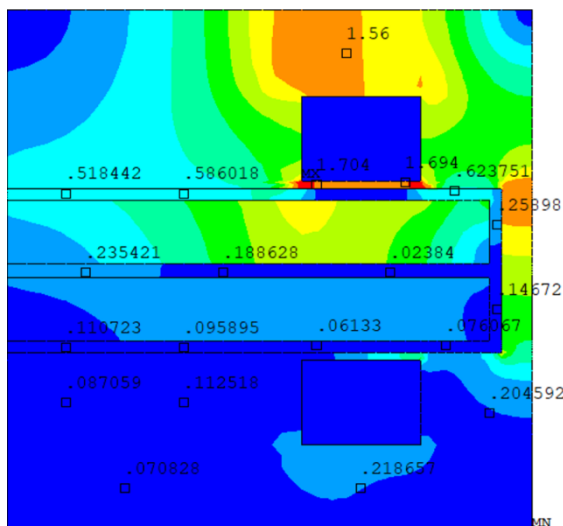
Trong nghiên cứu này một số thuật toán tối ưu hóa được tích hợp trong công cụ tối ưu hóa của ANSYS. Cụ thể là phương pháp bậc nhất với thuật toán mặt cắt vàng được sử dụng [57, 58]. Trong quá trình tối ưu hóa, dòng điện tối đa 2,5 A được áp dụng cho các cuộn dây để đảm bảo an toàn cho dây (đường kính dây đồng chọn là 0,5 mm). Do BMRA được thiết kế đối xứng nên dòng điện chỉ cấp cho cuộn dây ở một bên của BMRA. Tỷ lệ lấp đầy của cuộn dây được lấy bằng 80%, trong khi tổn thất từ trường được giả định là 10% dựa trên kinh nghiệm thực nghiệm. Tỷ lệ hội tụ của tối ưu hóa được đặt 0,1%.

Kết quả phân bố mật độ từ thông của các BMRA ở mức tối ưu được thể hiện bởi **Hình 3.10**, **Hình 3.11**, **Hình 3.12**.

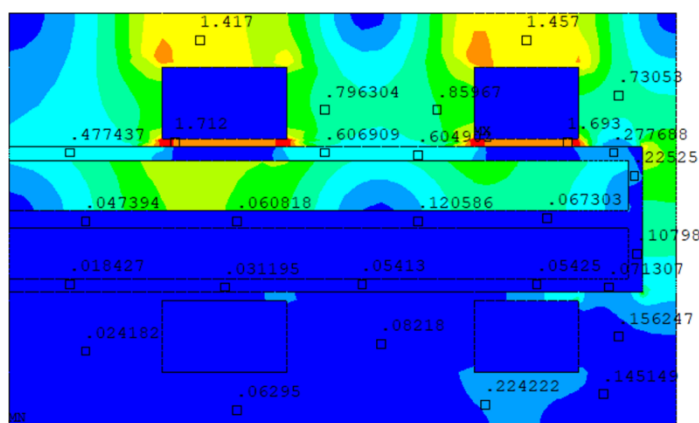


**Hình 3.10:** Phân bố mật độ từ thông của BMRA\_[56].





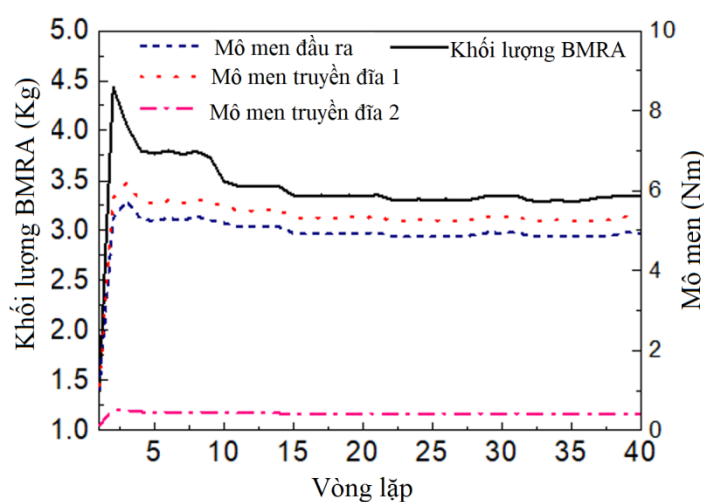
**Hình 3.11:** Phân bố mật độ từ thông của BMRA1.



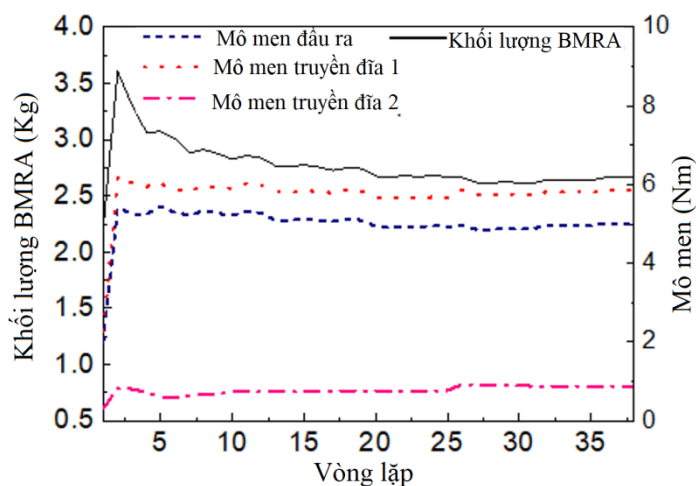
**Hình 3.12:** Phân bố mật độ từ thông của BMRA2.

Các số liệu cho thấy mật độ từ thông tại vị trí bức thành mỏng đạt đến độ bão hòa từ của vật liệu vỏ của BMRA1, BMRA2. Khi đó từ thông buộc phải chạy qua khe MRF, chúng ta cũng thấy rằng vấn đề thắt nút cổ chai đã xảy ra ở vị trí vỏ hình trụ bên ngoài phía trên cuộn dây của BMRA\_[56], do đó muốn tránh vấn đề này thì BMRA\_[56] cần phải tăng kích thước vỏ hình trụ lên để từ thông qua dễ dàng, điều này sẽ làm tăng thể tích dẫn tới khối lượng BMRA\_[56] tăng đáng kể. Ngoài ra, thiết kế BMRA\_[56] tuy có bộ phận cách từ nhưng từ thông vẫn bị rò rỉ sang phía bên kia của BMRA\_[56]. Sự rò rỉ từ thông của BMRA2 thậm chí còn ít hơn của BMRA\_[56]. Đồng thời, ta thấy rằng mật độ từ thông tại các khe MRF ở vùng hình trụ của BMRA1 và BMRA2 nhỏ hơn so với BMRA\_[56]. Tuy nhiên mật độ từ thông tại mặt cuối khe lưu chất của BMRA1, BMRA2 cao hơn đáng kể so với BMRA\_[56]. Do đó, mô men

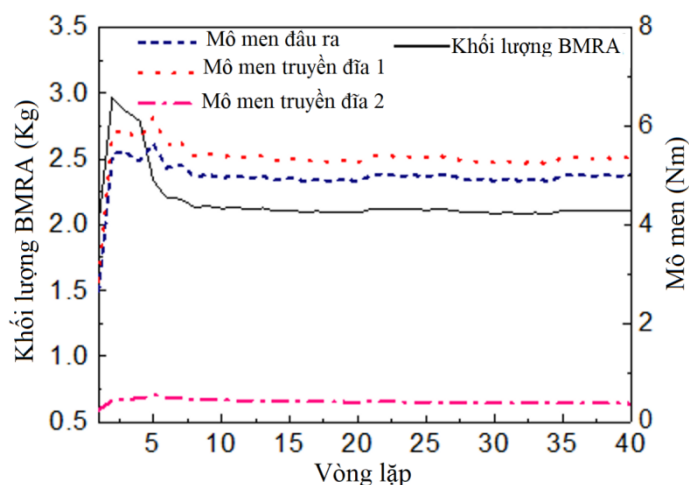
đầu ra của BMRA1, BMRA2 chủ yếu được truyền qua khe lưu chất ở mặt cuối của MRF. Kết quả hội tụ của các BMRA thể hiện bởi **Hình 3.13**, **Hình 3.14**, **Hình 3.15**, với  $T_b \geq 5$  Nm với độ chính xác 2%, số vòng lặp bằng 40. Quan sát thấy rằng mô men xoắn truyền từ đĩa 1 cao hơn một chút so với mô men xoắn đầu ra (7,4 % trong trường hợp BMRA\_[56], 13 % trong trường hợp BMRA1 và 7 % trong trường hợp của BMRA2). Điều đó cho thấy rằng chênh lệch mô men xoắn truyền của BMRA\_[56] nhỏ hơn BMRA1 do BMRA\_[56] có sử dụng bộ phận cách từ. Tuy nhiên, đối với BMRA2 không có bộ phận cách từ mà chênh lệch về mô men truyền BMRA2 vẫn nhỏ hơn BMRA\_[56].



**Hình 3.13:** Kết quả tối ưu hóa của BMRA\_[56].



**Hình 3.14:** Kết quả tối ưu hóa của BMRA1.



**Hình 3.15:** Kết quả tối ưu hóa của BMRA2.

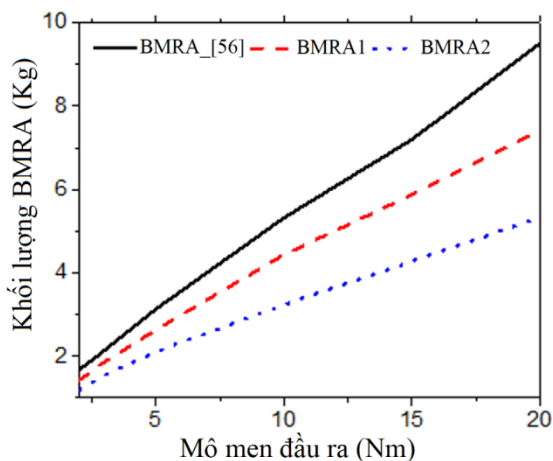
**Bảng 3.2:** Kết quả tối ưu của các BMRA.

Loại BMRA	Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
BMRA_[56]	$t_c = 6,3; h_c = 6,1; L_{a1} = 5,0; L_{a2} = 0,5$ $R_i = 36,3; R_o = 50,2; t_d = 11,9$ $R = 61,8; t_0 = 3,8; t_h = 3,1; L = 32,2$	$T_{max} = 4,96 \text{ Nm}$ $m_{max} = 3,21 \text{ kg}$ $P_w = 21,8 \text{ W}; R_c = 49 \Omega$
BMRA1	$w_c = 5,6; h_c = 7,65; R_{ci} = 40,7$ $R_i = 21,5; R_o = 52,8; t_d = 4,2$ $R = 55,6; t_0 = 2; t_h = 5,83; L = 34,8$	$T_{max} = 4,97 \text{ Nm}$ $m_{max} = 2,64 \text{ kg}$ $P_w = 19,8 \text{ W}; R_c = 3,2 \Omega$
BMRA2	$w_{c1} = w_{c2} = 4,25; h_{c1} = 7,4; h_{c2} = 6,2$ $R_{ci1} = 29; R_{ci2} = 47,5; R_i = 20$ $R_o = 56,6; t_d = 4; R = 59,4$ $t_0 = 2; t_h = 3,2; L = 24,3$	$T_{max} = 4,98 \text{ Nm}$ $m_{max} = 2,1 \text{ kg}$ $P_w = 24 \text{ W}$ $R_{c1} = 1,68 \Omega; R_{c2} = 2,16 \Omega$

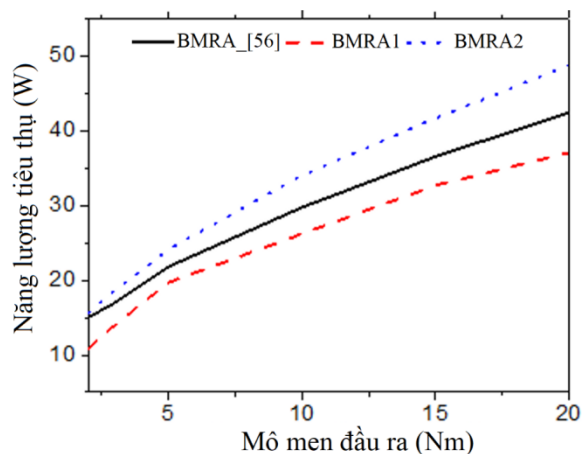
Về công suất tiêu thụ với kết quả trình bày bởi **Bảng 3.2** thì công suất tiêu thụ của BMRA\_[56] cao hơn so với BMRA1, do cuộn dây trong trường hợp BMRA\_[56] được đặt ở vỏ hình trụ bên ngoài nên chiều dài cuộn dây phải lớn hơn. Cụ thể là điện trở cuộn dây của BMRA\_[56] là  $3,49 \Omega$  và BMRA1 là  $3,2 \Omega$ . Đối với trường hợp BMRA2 thì công suất tiêu thụ cao hơn một chút so với BMRA\_[56] bởi vì trong trường hợp này sử dụng hai cuộn dây.

Giải pháp tối ưu với các giá trị khác nhau mô men đầu ra của BMRA bằng phương pháp First Order. Các tiêu chí quan trọng của BMRA được đánh giá như sau:

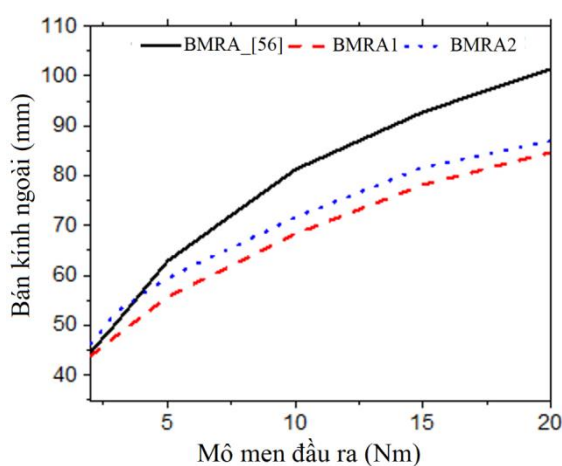
- Khối lượng của các BMRA ( $m_b$ ) được tối ưu hóa như một hàm của mô men đầu ra ( $T_b$ ) thể hiện bởi **Hình 3.16**. Ở cùng mức mô men đầu ra yêu cầu lớn nhất, khối lượng của BMRA\_[56] ( $m = 3,21$  kg) luôn cao hơn khối lượng của các BMRA được đề xuất. Chúng ta cũng thấy rằng bằng cách sử dụng cấu hình hai cuộn dây, khối lượng của BMRA2 ( $m = 2,1$  kg) được đề xuất giảm đáng kể ở mô men xoắn đầu ra cao. Khi yêu cầu mô men xoắn đầu ra cao ta có thể bố trí nhiều hơn hai cuộn dây để giảm thể tích và khối lượng của BMRA.
- Công suất tiêu thụ ( $P_w$ ) của các BMRA được tối ưu hóa như một hàm của mô men đầu ra thể hiện bởi **Hình 3.17**. Mức tiêu thụ điện của BMRA2 ( $P = 24$  W) luôn cao hơn các BMRA khác và mức tiêu thụ của BMRA1 ( $P_w = 19,8$  W) luôn nhỏ hơn BMRA\_[56] ( $P_w = 21,8$  W). Khi mức tiêu thụ điện năng cao của BMRA có thể gây ra một số vấn đề như nhiệt độ làm việc cao dẫn tới làm giảm hiệu suất của MRF do đó cần lưu ý khi lựa chọn cấu hình BMRA sao cho phù hợp.
- Bán kính ngoài ( $R$ ) của các BMRA được tối ưu hóa như một hàm của mô men đầu ra được trình bày trong **Hình 3.18**. Ở đây có thể thấy rằng bán kính ngoài của BMRA\_[56] ( $R = 61,8$  mm) cao hơn so với các bán kính của BMRA1 ( $R = 55,6$  mm) và BMRA2 ( $R = 59,4$  mm) tại mô men đầu ra lớn (5 Nm). Ở các giá trị mô men đầu ra yêu cầu nhỏ với  $T < 5$  Nm thì bán kính ngoài của BMRA\_[56] nhỏ hơn một chút so với bán kính của BMRA2 nhưng luôn lớn hơn bán kính của BMRA1, bán kính của BMRA1 luôn nhỏ hơn bán kính của BMRA2. Vì vậy, trong trường hợp giới hạn không gian làm việc thì BMRA1 là phù hợp nhất.
- Chiều dài tổng thể ( $L$ ) của các BMRA được tối ưu hóa ở các mô men đầu ra khác nhau được thể hiện trong **Hình 3.19**. Cụ thể với BMRA2 ( $L = 24,3$  mm) nhỏ hơn đáng kể so với các BMRA khác. Ở mô men xoắn đầu ra cao thì chiều dài tổng thể của BMRA\_[56] ( $L = 32,2$  mm) nhỏ hơn của BMRA1 ( $L = 34,8$  mm), nhưng ở mô men xoắn nhỏ hơn 5 Nm nó trở nên lớn hơn.



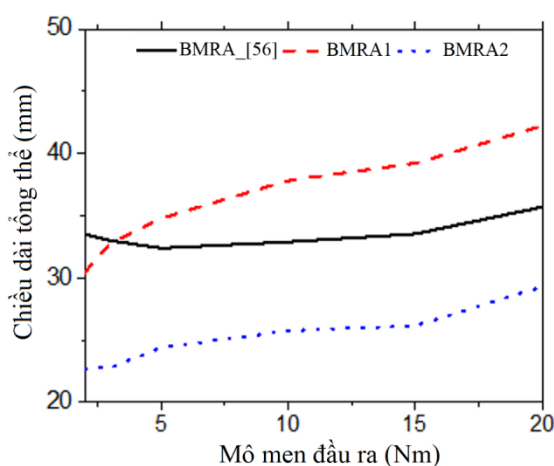
**Hình 3.16:** Quan hệ  $T_b - m_b$ .



**Hình 3.17:** Quan hệ  $T_b - P_w$ .



**Hình 3.18:** Quan hệ  $T_b - R$ .



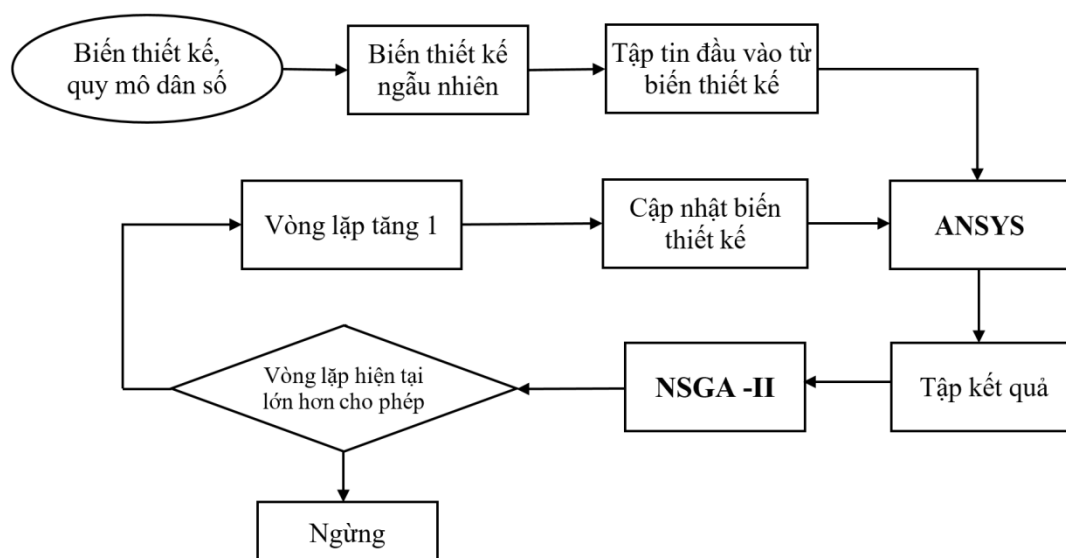
**Hình 3.19:** Quan hệ  $T_b - L$ .

### 3.2.2 Tối ưu hoá đa mục tiêu cho BMRA.

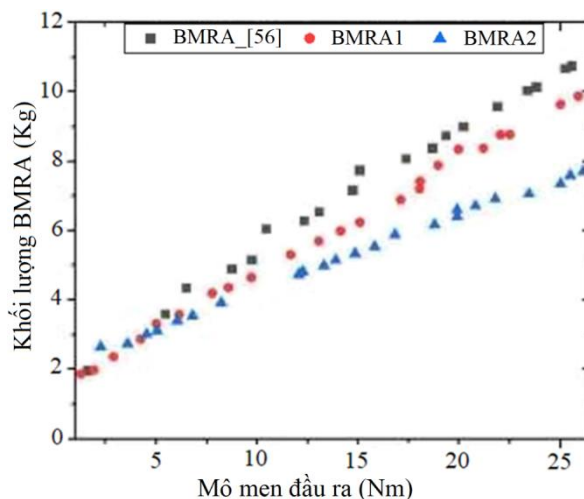
Vì phương phát First Order phụ thuộc rất nhiều vào các giá trị ban đầu của biến thiết kế phải chọn tốt (phụ thuộc vào kinh nghiệm), nếu không bài toán sẽ dẫn tới tối ưu cục bộ. Nên tác giả sử dụng thêm thuật toán tối ưu di truyền sắp xếp không chi phối II (NSGA-II) là một trong những thuật toán tối ưu đa mục tiêu toàn cục. Để tối ưu đa mục tiêu đó là khối lượng nhỏ nhất và mô men lớn nhất BMRA nên phải sử dụng phương pháp tối ưu đa mục tiêu. NSGA-II là phương pháp tối ưu thông dụng cho bài toán đa mục tiêu. Thay vì chạy nhiều mô men khác nhau để tìm các khối lượng tốt nhất thì chỉ một lần chạy bằng NSGA-II thì kết quả sẽ có được khối lượng tốt nhất với các mô men khác nhau.

Trong nghiên cứu này thuật toán di truyền sắp xếp không chi phối II (NSGA-II) [55] được áp dụng để giải bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu. Lược đồ tối ưu được thể hiện bởi **Hình 3.20** nhằm tối ưu hóa đa mục tiêu cho các BMRA được áp dụng phương pháp tối ưu NSGA-II kết hợp với phần mềm ANSYS. Với **Hình 3.21** cho thấy biểu đồ Pareto của giải pháp tối ưu khi các tham số của NSGA-II được thiết lập như sau: Số lần lặp tối đa là 100, quy mô dân số bằng 20, tỷ lệ phần trăm chéo bằng 0,7%, phần trăm đột biến 0,005, tỷ lệ đột biến bằng 0,02. Từ các kết quả được đưa ra trong **Hình 3.21** có thể thấy rằng kết quả tối ưu rất gần với kết quả mong muốn. Nói chung, tại cùng một giá trị của mô men truyền, khối lượng tối ưu hóa thu được từ tối ưu hóa đa mục tiêu lớn hơn một chút so với khối lượng tối ưu hóa mục tiêu đơn khi mô men truyền bị ràng buộc. Tuy nhiên, để tránh giải pháp tối ưu cục bộ trong tối ưu hóa mục tiêu đơn lẻ sử dụng phương pháp bậc nhất thì các giá trị ban đầu của các biến thiết kế nên được chọn hợp lý.

Đầu tiên, thuật toán ngẫu nhiên trong công cụ tối ưu hóa ANSYS được thực hiện với 50 bộ giá trị ngẫu nhiên của các biến thiết kế. Từ kết quả, các giá trị của tham số thiết kế của trường hợp nào tốt nhất sẽ được chọn làm giá trị ban đầu của biến thiết kế trong thuật toán bậc nhất. Đáng chú ý, nếu giá trị mong muốn của mô men truyền tối đa thì sử dụng tối ưu hóa mục tiêu đơn với mô men truyền bị hạn chế có thể tiết kiệm nhiều chi phí tính toán so với tối ưu hóa đa mục tiêu.



**Hình 3.20:** Lược đồ tối ưu hóa đa mục tiêu áp dụng NSGA-II.



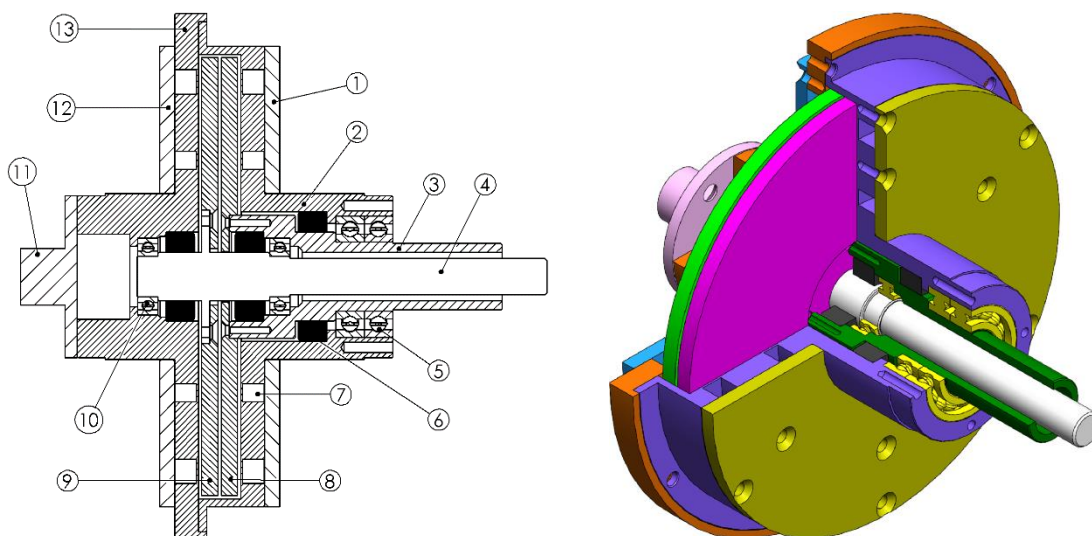
Hình 3.21: Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu.

### 3.3 Thiết kế và hoàn thiện hệ thống thí nghiệm BMRA2.

Trong số các yêu cầu của một cơ cấu ứng dụng trong các hệ thống phản hồi lực đó là tiêu chí về khối lượng, không gian làm việc, chế tạo và bảo trì dễ dàng. Vì vậy tác giả nhận thấy BMRA2 là phù hợp nhất trong các BMRA được khảo sát.

Với kết quả tối ưu của **Bảng 3.2**, tác giả tiến hành thiết kế chi tiết cho BMRA2 được biểu diễn bởi **Hình 3.22**.

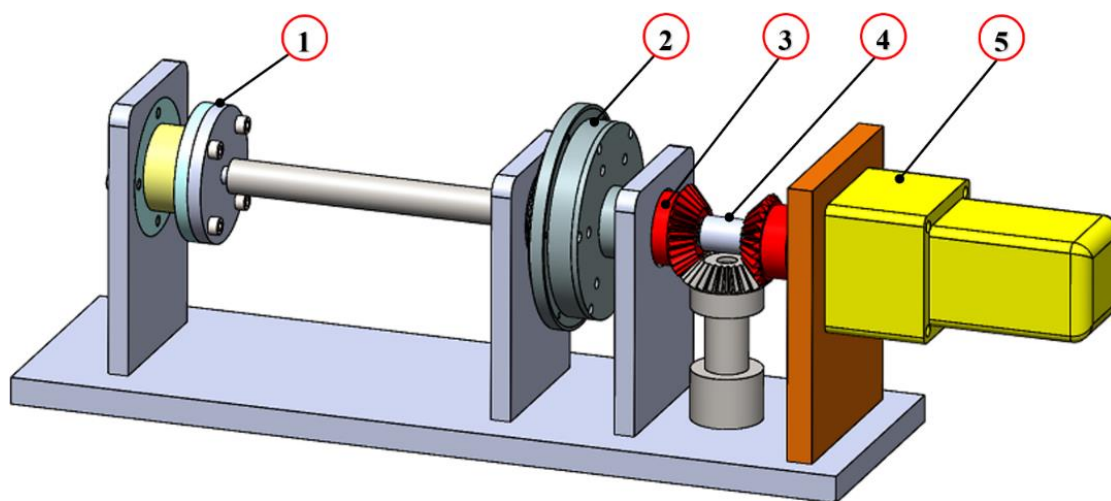
Kết cấu của của BMRA2 bao gồm: (1, 12) vỏ ngoài, (2, 13) vỏ trong, (3) trục vào 1, (4) trục vào 2, (5) ổ lăn kép, (6) phốt chặn, (7) cuộn dây, (8) đĩa 1, (9) đĩa 2, (10) ổ lăn trục 2, (11) trục đầu ra.



Hình 3.22: Mô hình CAD của BMRA2.

Một số đặc điểm trong quá trình chế tạo, lắp ráp và thử nghiệm cần chú ý đó là các cuộn dây (7) được quấn bên ngoài rồi cấp dòng điện sơ bộ để kiểm tra trường cảm ứng tạo ra bởi dòng điện đặt rồi sau đó mới đặt vào đúng các vị trí của nó, được lắp chặt bởi các bộ phận vỏ ngoài (1, 12) và được cố định với các bộ phận bên trong bằng vít. Một ổ lăn kép (5) được sử dụng giữa trục 1 và vỏ. Trục 2 được đỡ bởi hai ổ trục (10), một ở trục 1 và một thân vỏ. Để ngăn rò rỉ MRF thì ba vòng đệm được sử dụng tại các vị trí cần thiết đó là giữa trục với vỏ, giữa trục với trục. Kích thước khe hở MRF được chọn bằng 0,8 mm. Các cuộn dây có thể thay thế và kiểm tra dễ dàng mà không gây rò rỉ MRF.

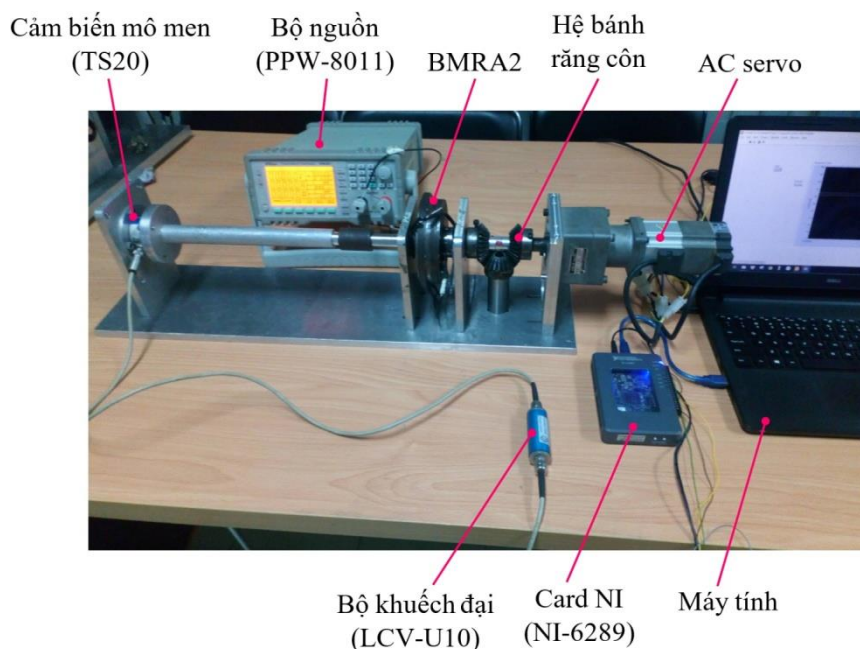
Sau khi mô hình CAD của BMRA2 được thiết kế thì bước tiếp theo tiến hành thiết kế mô hình thực nghiệm cho BMRA2 được biểu thị bởi **Hình 3.23**. Mô hình thí nghiệm bao gồm: cảm biến mô men xoắn (1); BMRA2 (2); bánh răng trục vào 1 (3); khớp nối trục vào 2 (4); động cơ AC servo.



**Hình 3.23:** Mô hình thực nghiệm của BMRA2.

Khi mô hình chế tạo được hoàn thành thì tiến hành kết nối các thiết bị để hoàn thiện hệ thống thực nghiệm như **Hình 3.24**. Quy trình thực nghiệm được tiến hành theo quy trình như sau: từ động cơ AC servo (MSMD022S1T, Panasonic) với bộ giảm tốc có tỉ lệ (15:1) thông qua hệ bánh răng côn đảo chiều sẽ dẫn động trục vào 1 và trục vào 2 của BMRA2 quay cùng tốc độ nhưng ngược chiều (trục vào 1 quay CW, trục vào 2 quay CCW).





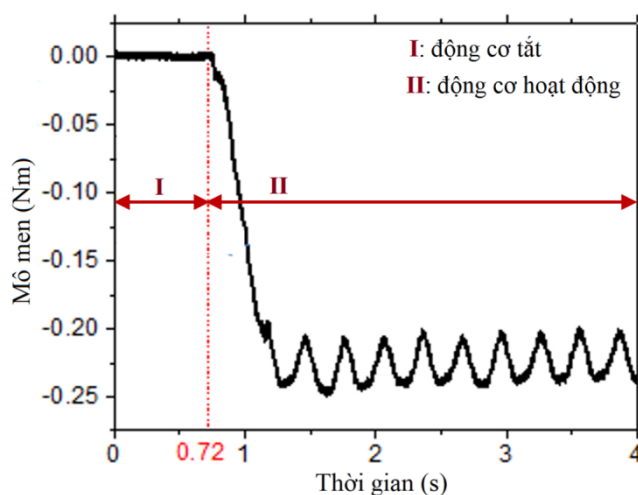
**Hình 3.24:** Hệ thống thực nghiệm của BMRA2.

Bộ nguồn (PPW-8011, TWINTEX) dùng để cấp nguồn cho các cuộn dây của BMRA2. Nguồn điện được điều khiển bởi máy tính thông qua bộ chuyển đổi DAQ (LCV-U10, Lorenz Messtechnik) để cung cấp dòng điện theo mong muốn. Trục đầu ra của BMRA2 được kết nối với cảm biến mô men xoắn (TS20, Interface) để đo mô men xoắn đầu ra. Tín hiệu của cảm biến mô men xoắn được truyền tới một đầu dò (LCV-U10, Lorenz Messtechnik) sau đó qua card giao tiếp NI (NI-6289 National Instruments) đến máy tính để xử lý dữ liệu. Phần mềm Labview dùng để đọc dữ liệu từ DAQ qua cổng COM.

### 3.4 Kết quả thực nghiệm và đánh giá.

Bước đầu mô men xoắn đầu ra khi không cấp dòng điện cho các cuộn dây (mô men xoắn đầu ra ở trạng thái tắt) được đo và kết quả đưa ra trong **Hình 3.25**. Quan sát ta thấy rằng khi động cơ hoạt động (II) thì mô men xoắn đầu ra thay đổi từ không đến khoảng  $-0,22$  Nm. Giá trị âm có nghĩa là mô men xoắn đầu ra cùng hướng của trục 1 (CW). Điều này là hiển nhiên vì đường kính của trục vào 1 lớn hơn đường kính của trục vào 2 dẫn đến mô men ma sát truyền đến vỏ cao hơn. Ngoài ra, ổ lăn kép sử dụng cho trục vào 1 gây ra ma sát lớn hơn ổ trục đơn dùng cho trục vào 2. Thời gian

mô men xoắn đáp ứng ở trạng thái tắt là khoảng 30 ms. Thời gian đáp ứng này do độ trễ cơ học của BMRA.

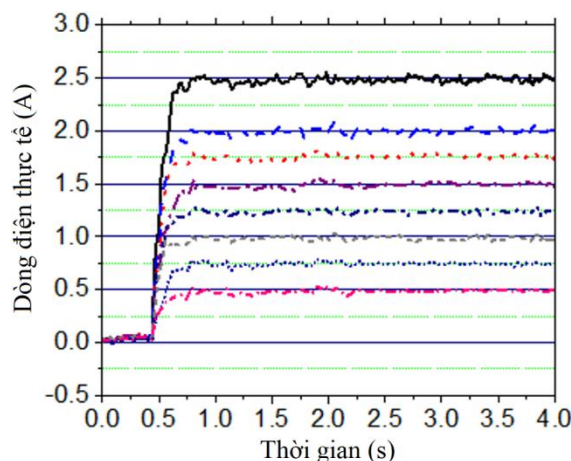


**Hình 3.25:** Mô men đầu ra của BMRA2 ở trạng thái tắt.

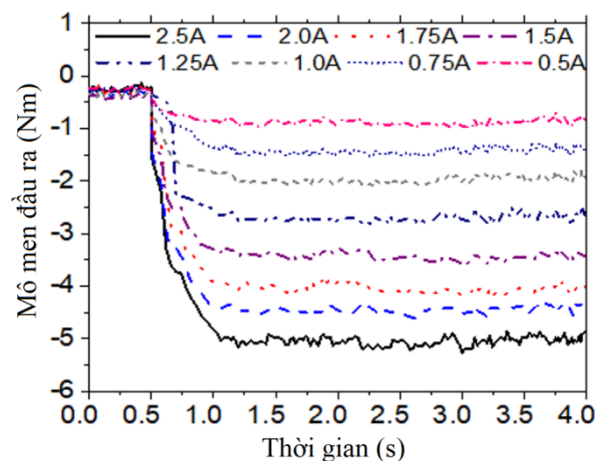
Khi cấp dòng điện dạng bậc khác nhau vào các cuộn dây ở mặt bên của đĩa 1 tại thời điểm 0,5 s thì đáp ứng từng bước của BMRA sẽ được xác định. Cụ thể, ứng với các bước dòng điện 0,5 A; 0,75 A; 1,0 A; 1,25 A; 1,5 A; 1,75 A; 2,0 A và 2,5 A. Các mức dòng điện đặt vào cuộn dây được đo và được trình bày trong **Hình 3.26**. Ở trạng thái ổn định, các dòng điện trung bình đo được gần như bằng các dòng mong muốn lần lượt là 0,51 A; 0,756 A; 1,05 A; 1,25 A; 1,5 A; 1,745 A; 1,98 A và 2,49 A với thời gian đáp ứng của dòng điện áp dụng là xấp xỉ 0,2 s.

Từ **Hình 3.27** có thể thấy rằng, ở trạng thái ổn định thì mô men xoắn đầu ra trung bình đo được của BMRA trong trường hợp 2,5 A là khoảng 5,1 Nm, lớn hơn một chút so với thiết kế tối ưu (4,98 Nm). Nguyên nhân có thể do việc ước tính mô men ma sát và mô men truyền động chưa chính xác hoặc có thể do tổn thất từ trường gây ra. Mô men trung bình đầu ra tại các dòng điện 0,5 A; 0,75 A; 1,0 A; 1,25 A; 1,5 A; 1,75 A; 2,0 A tương ứng là -0,9 Nm; -1,35 Nm; -1,95 Nm; -2,6 Nm; -3 Nm; -3,95 Nm; -4,4 Nm. Mô men đầu ra đo được như **Hình 3.28** trong đó mô men đầu ra mô phỏng như một hàm của dòng điện áp dụng. Từ **Hình 3.28** ta thấy rằng mô men đầu ra đo được cũng phù hợp với mô men mô phỏng ở các giá trị khác nhau của dòng điện đặt vào, sai số dao động từ 1,5% đến 5%.

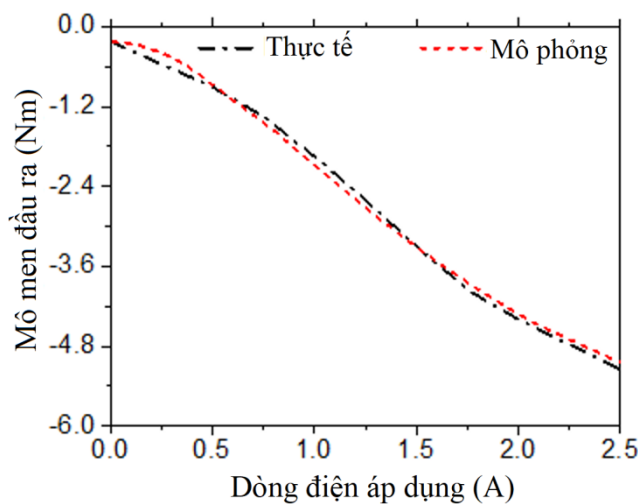
Từ **Hình 3.27**, ta cũng thấy rằng trong mọi trường hợp giá trị ổn định của mô men đo được hầu như đạt được tại thời điểm 1,05 s. Do đó, thời gian đáp ứng của mô men cảm ứng đầu ra là khoảng 0,55 s, trong đó thời gian đáp ứng cơ học là 30 ms như đã đề cập trong thí nghiệm trạng thái tắt.



**Hình 3.26:** Biểu đồ dòng điện.



**Hình 3.27:** Kết quả mô men đầu ra.

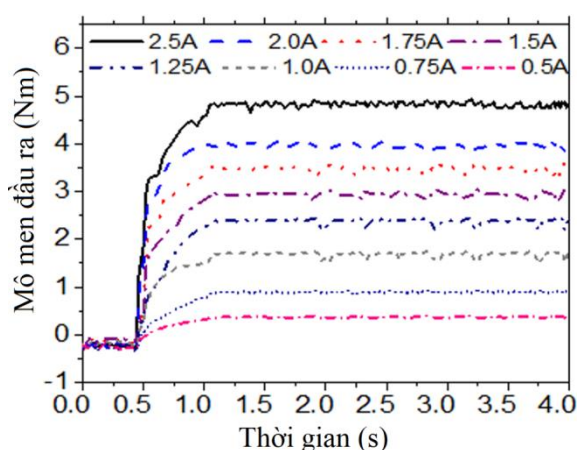
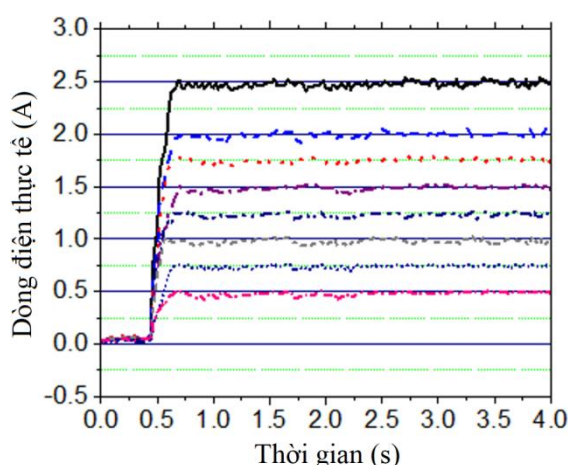


**Hình 3.28:** Mô men đầu ra và dòng điện áp dụng.

Tiến hành tương tự cho đĩa 2. Tại mức dòng điện 0,5 A; 0,75 A; 1,0 A; 1,25 A; 1,5 A; 1,75 A; 2,0 A; 2,5 A được áp dụng cho các cuộn dây ở mặt bên của đĩa 2 thì các dòng điện trung bình đo ở trạng thái ổn định thu được từ **Hình 3.29** lần lượt là 0,505 A; 0,751 A; 1,0 A; 1,24 A; 1,49 A; 1,74 A; 1,985 A; 2,48 A gần bằng với giá trị mong muốn. Thời gian đáp ứng của dòng điện áp dụng tương tự như trong **Hình 3.29** khoảng 0,2 s.

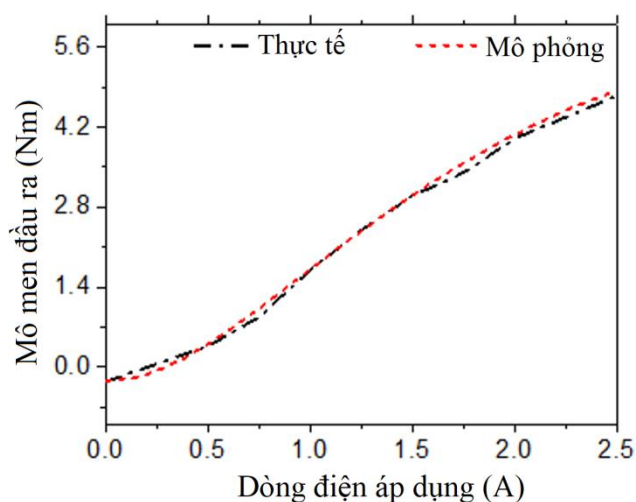
Từ **Hình 3.30** mô men xoắn đầu ra trung bình đo được trong trường hợp dòng điện 2,5 A ở trạng thái ổn định là 4,7 Nm nhỏ hơn một chút so với trong trường hợp đĩa 1. Nguyên nhân chính là ở trạng thái tắt giá trị mô men xoắn khoảng - 0,25 Nm như đã đề cập trong **Hình 3.25**. Mô men xoắn đầu ra trung bình ở các mức dòng áp dụng 0,5 A; 0,75 A; 1,0 A; 1,25 A; 1,5 A; 1,75 A; 2,0 A tương ứng 0,4 Nm; 0,9 Nm; 1,7 Nm; 2,4 Nm; 3,0 Nm; 3,4 Nm; 4,0 Nm.

Mô men đầu ra đo được và mô phỏng so với dòng điện được thể hiện ở **Hình 3.31**. Chúng ta thấy rằng mô men đầu ra đo được phù hợp với mô men mô phỏng ở các giá trị khác nhau của dòng điện đặt vào và sai số nhỏ hơn 5%.



**Hình 3.29:** Biểu đồ dòng điện.

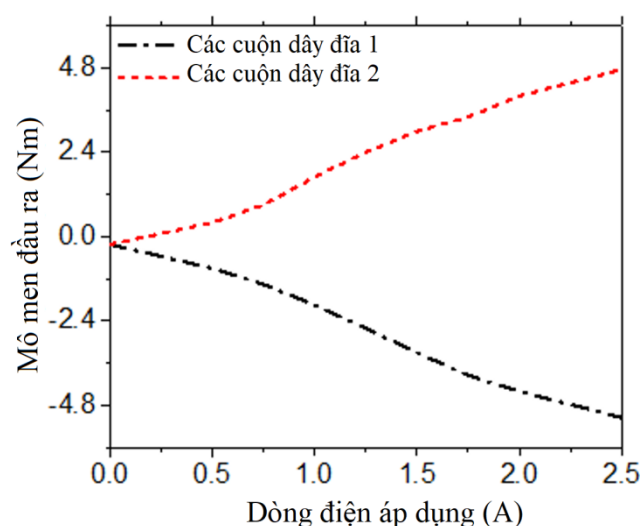
**Hình 3.30:** Kết quả mô men đầu ra.



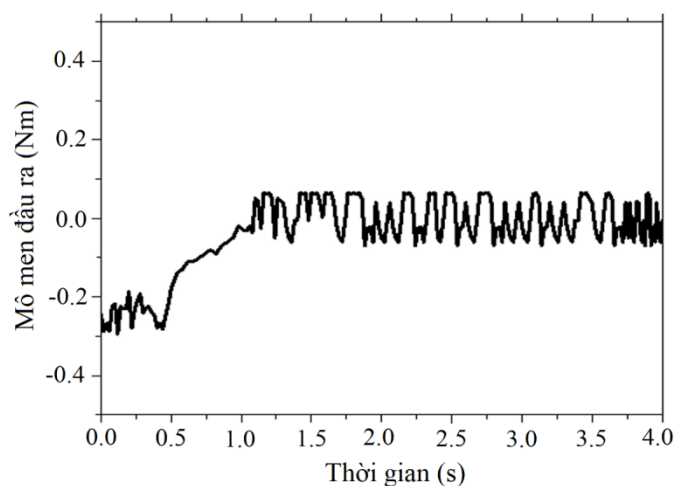
**Hình 3.31:** Mô men đầu ra và dòng điện áp dụng.

Với kết quả từ **Hình 3.28** và **Hình 3.31** thì mô men xoắn đầu ra đo được hai chiều của BMRA được mô tả bởi **Hình 3.32**. Kết quả cho thấy mô men xoắn đầu ra

hai chiều của BMRA được điều khiển bởi dòng điện áp dụng cho các cuộn dây. Cụ thể, nếu mô men xoắn đầu ra nhỏ hơn  $-0,22$  Nm (tính theo CW và độ lớn hơn hoặc bằng  $0,22$  Nm), thì dòng điện được cấp cho các cuộn dây của đĩa 1 và ngược lại nếu mô men xoắn đầu ra lớn hơn  $-0,22$  Nm thì dòng điện được đặt vào các cuộn dây của đĩa 2. Một điểm đáng chú ý rằng mô men ma sát trạng thái nghỉ có thể được loại bỏ bằng cách đặt một dòng điện thích hợp vào các cuộn dây của đĩa 2. Từ **Hình 3.33** ta có thể tính được dòng điện  $0,2$  A, nếu áp dụng dòng điện  $0,2$  A cho các cuộn dây của đĩa 2 thì loại bỏ được mô men xoắn trạng thái nghỉ của BMRA, khi đó mô men xoắn đầu ra bằng không có thể đạt được. **Hình 3.33** biểu diễn kết quả thí nghiệm khi cho dòng điện  $0,2$  A vào các cuộn dây của đĩa 2 tại thời điểm  $0,5$  s.



**Hình 3.32:** Mô men xoắn đầu ra của BMRA2.



**Hình 3.33:** Mô men xoắn đầu ra bằng không.

Chúng ta thấy mô men đầu ra chuyển từ giá trị trung bình ban đầu là 0,22 Nm thành mô men đầu ra gần như bằng không khi đặt dòng điện 0,2 A vào các cuộn dây của đĩa 2. Tuy nhiên, sai số do nhiễu trong khoảng  $\pm 0,09$  Nm. Lỗi do nhiễu này đến từ thiết bị đo và cũng có thể do dòng điện đặt vào cuộn dây không ổn định.

Tóm lại trong phần nghiên cứu này đã đạt một số kết quả đó là một mô hình cơ cấu tác động hai chiều sử dụng MRF với hai cuộn dây ở hai bên đã được chế tạo và các đặc tính của nó đã được nghiên cứu với kết quả thử nghiệm và mô phỏng. Kết quả thử nghiệm cho thấy chấp nhận với sai số mô phỏng nhỏ hơn 5%. Thời gian đáp ứng của mô men xoắn đầu ra là khoảng 55 ms (trong đó trễ cơ học là 30 ms) với mức này đáp ứng được cho các hệ thống phản hồi. Nghiên cứu cũng cho thấy rằng mô men ma sát có thể được loại bỏ bằng cách áp dụng dòng điện 0,2 A cho các cuộn dây của đĩa 2. Tóm lại BMRA được phát triển trong nghiên cứu này có thể cung cấp một mô men đầu ra mong muốn ở cả hai hướng.

Trong phần sau tác giả dựa trên cơ cấu hai chiều này để phát triển các hệ thống phản hồi lực áp dụng trong lĩnh vực điều khiển từ xa.

✚ Kết quả nghiên cứu trên công bố bởi:

Diep B. T., Le D. H., Nguyen Q. H., Choi S. B., Kim J. K. Design and Experimental Evaluation of a Novel Bidirectional Magnetorheological Actuator, *Smart Materials and Structures*, **29** 117001, 21/09/2020.

---

## Chương 4

# PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG JOYSTICK 3D PHẢN HỒI LỰC DÙNG MRF

Gần đây, một số nghiên cứu về hệ thống phản hồi lực dùng MRF đã được thực hiện. Hầu hết các hệ thống phản hồi sử dụng MRF được phát triển dựa trên các dạng phanh từ tính (MRB) với dạng kiểu đĩa, kiểu tang trống, kiểu lai, cuộn dây bố trí ở mặt trụ thân vỏ [36, 28, 59]. Tuy nhiên chúng có hai nhược điểm lớn của việc sử dụng MRB trong hệ thống phản hồi lực là không kiểm soát được mô men xoắn đầu ra ban đầu (mô men xoắn trạng thái chưa áp dụng dòng điện – trạng thái tắt) của phanh và phản hồi bị động của hệ thống (phản hồi lực chỉ có thể được phản hồi khi người điều khiển thực hiện chuyển động). Do lực tác động trạng thái tắt của các MRB còn lớn, trong trường hợp lực phản hồi của hệ thống nhỏ thì lực không được phản ánh dẫn tới làm giảm hiệu suất của hệ thống phản hồi lực. Để cảm nhận được lực phản hồi, người vận hành cần phải cố gắng di chuyển tay cầm điều khiển. Vì vậy lực phản hồi không được phản hồi cho người vận hành nếu hệ thống phản hồi đứng yên.

Để giải quyết những nhược điểm của hệ thống phản hồi lực dựa trên MRB, gần đây cơ cấu hai chiều sử dụng lưu chất từ biến đã được phát triển để ứng dụng cho hệ thống phản hồi lực. Các nghiên cứu [42, 43] đã phát triển cần điều khiển phản hồi lực 2D, 4D sử dụng các BMRA. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu này còn một số hạn chế đó là độ dày của đĩa lớn, hiện tượng thắt nút cổ chai của mạch từ ở phần vỏ hình trụ và khó khăn trong chế tạo và bảo trì. Để khắc phục những hạn chế của BMRA [56] do Nguyen P. B thì nhóm nghiên cứu đã đề xuất một hệ thống joystick 3D gồm cơ cấu gimbal kết hợp với BMRA, phanh tuyến tính MRF.

### 4.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của hệ joystick 3D.

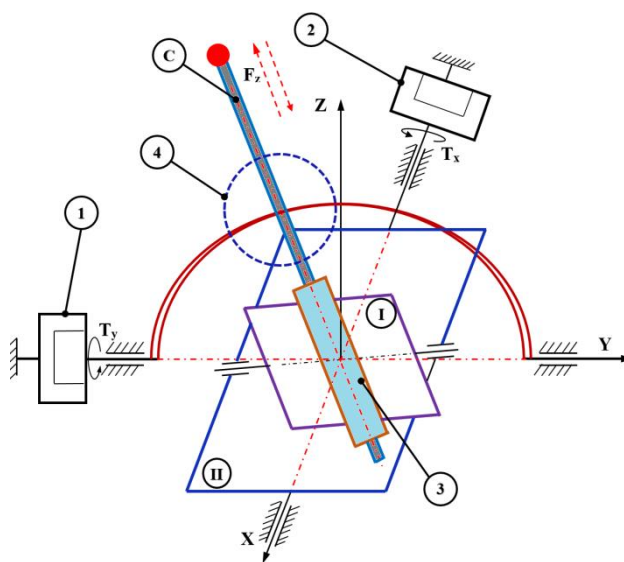
Trong thực tế, hầu hết các hệ thống phản hồi lực đều yêu cầu phản hồi lực 3D để phản hồi toàn bộ lực vận hành của người điều khiển. Do đó, cần có một hệ thống phản hồi lực 3D là rất cần thiết, cho nên trên cơ sở hệ thống phản hồi lực 2D [77] của



nhóm nghiên cứu trước đó tác giả phát triển một hệ thống joystick 3D phản hồi lực có các đặc điểm nổi bật như sau:

- *Về thiết kế:* Bố trí hai BMRA trên hai trục X và trục Y (biểu diễn mô men  $T_x$ ,  $T_y$ ), đồng thời bố trí một phanh tuyến tính sử dụng MRF (LMRB) trên trục Z (biểu diễn lực  $F_b$ ). Các cơ cấu BMRA và LMRB đều được tối ưu hóa có xét đến không gian làm việc, ma sát ngoài trạng thái (trạng thái không áp dụng dòng điện) và có xem xét lực tác động cần thiết phù hợp cho hệ phản hồi lực thông thường.
- *Về phân tích:* trong nghiên cứu trước đây các tác giả chỉ mới phân tích lực phản hồi đơn lẻ còn trong nghiên cứu này thì việc phân tích phản hồi lực 3D của hệ được thực hiện bằng cách sử dụng nguyên lý công ảo.
- *Về điều khiển:* xây dựng các bộ điều khiển cho hệ thống qua đó tại vị trí bất kỳ của núm điều khiển sẽ được xác định dựa trên ma trận quay và được ghi lại trong quá trình vận hành cần điều khiển. Ngoài ra, việc kiểm soát lực phản hồi thông thường được đưa vào sẽ tiến hành riêng biệt bằng cách kiểm soát lực hãm của LMRB.

Từ các phân tích trên nhóm nghiên cứu đã phát triển một hệ thống joystick 3D phản hồi lực dựa trên sự kết hợp của hai BMRA, một LMRB với cơ cấu gimbal được thể hiện bởi **Hình 4.1**



**Hình 4.1:** Sơ đồ động học hệ thống joystick 3D phản hồi lực.

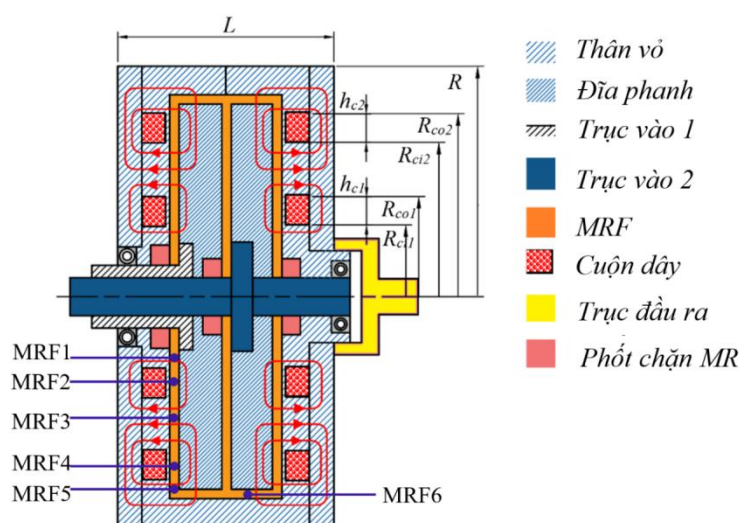


Hệ thống phản hồi lực 3D hoạt động như sau: mỗi BMRA (1, 2) có hai trục đầu vào sẽ được dẫn động bởi hai động cơ AC servo thông qua hệ thống bánh răng côn đảo chiều, trục đầu ra của hai BMRA được kết nối với hai trục của cơ cấu gimbal (4). Cơ cấu gimbal được vận hành thông qua một tay cầm (C) được tích hợp với LMRB (3). Núm điều khiển được gắn chặt trục của LMRB, trong khi vỏ của LMRB được kết nối với thân trục Y của cơ cấu gimbal thông qua chốt xoay hình cầu và xoay quanh chốt này dọc theo khe thân trục Y (mặt phẳng I). Tay cầm được đặt trong khe thân trục X của cơ cấu gimbal và có thể tự do di chuyển dọc theo khe này (mặt phẳng II). Với cấu hình này, lực tác động dọc theo tay cầm được phản ánh bằng lực hãm của LMRB (di chuyển lên xuống theo trục của LMRB), trong khi hai lực tiếp tuyến của tay cầm (lực vuông góc với tay cầm) được phản ánh bởi hai BMRA. Góc hoạt động của cần điều khiển trục X và Y trong khoảng  $-60^{\circ}$  đến  $+60^{\circ}$

## 4.2 Tính toán mô men/lực của BMRA và LMRB.

### 4.2.1 Tính toán mô men BMRA.

Trên cơ sở phát triển của BMRA [78] đã nghiên cứu trước đây thì tác giả chọn BMRA thể hiện bởi **Hình 4.2**.



**Hình 4.2:** Cấu hình của BMRA

Về nguyên lý cấu tạo cơ bản của BMRA không khác gì so với cấu tạo đã nghiên cứu phần trên (Chương 3) nên việc tính mô men tương tự. Trong trường hợp này lưu chất được sử dụng vẫn là lưu chất MRF132-DG với các giả thuyết ban đầu thì công

thức tính cho các tính chất lưu biến của MRF cũng tương tự như việc áp dụng cho BMRA ở Chương 3 thì mô men đầu của BMRA ra được tính như sau:

$$\mathbf{T}_b = \mathbf{T}_{d1} - \mathbf{T}_{d2} + \mathbf{T}_{s1} - \mathbf{T}_{s2} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{d1} = & \frac{\pi\mu_{11}R_{ci1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{ci1}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y11}}{3} (R_{ci1}^3 - R_i^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{12}R_{co1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co1}}{R_{co1}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y12}}{3} (R_{co1}^3 - R_{ci1}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{13}R_{ci2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co1}}{R_{ci2}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y13}}{3} (R_{ci2}^3 - R_{co1}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{14}R_{co2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci2}}{R_{co2}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y14}}{3} (R_{co2}^3 - R_{co1}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{15}R_d^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co2}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y15}}{3} (R_d^3 - R_{co2}^3) \\ & + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{y16} + \mu_{16} \frac{|\omega_1| R_d}{t_g}) \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{d2} = & \frac{\pi\mu_{21}R_{ci1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{ci1}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y21}}{3} (R_{ci1}^3 - R_i^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{22}R_{co1}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co1}}{R_{co1}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y22}}{3} (R_{co1}^3 - R_{ci1}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{23}R_{ci2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co1}}{R_{ci2}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y23}}{3} (R_{ci2}^3 - R_{co1}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{24}R_{co2}^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{ci2}}{R_{co2}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y24}}{3} (R_{co2}^3 - R_{co1}^3) \\ & + \frac{\pi\mu_{25}R_d^4}{2t_g} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co2}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y25}}{3} (R_d^3 - R_{co2}^3) \\ & + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{y26} + \mu_{26} \frac{|\omega_2| R_d}{t_g}) \end{aligned} \quad (4-3)$$

Trong đó:

- $\mathbf{T}_b$ : mô men đầu ra của BMRA;
- $\mathbf{T}_{d1}, \mathbf{T}_{d2}$ : mô men xoắn truyền từ đĩa 1 và đĩa 2 đến vỏ của BMRA;
- $\mathbf{T}_{s1}, \mathbf{T}_{s2}$ : mô men ma sát của phốt chặn trên trục 1 và trục 2;
- $R_d$ : bán kính ngoài của các đĩa;  $R_i$ : bán kính của mặt bích trục;
- $t_g$ : kích thước khe MRF;  $t_d$ : bề dày của đĩa;
- $\omega_1$  và  $\omega_2$ : vận tốc góc của trục 1 và trục 2;
- $R_{ci1}, R_{co1}$ : bán kính trong và ngoài của cuộn 1;
- $R_{ci2}, R_{co2}$ : bán kính trong và ngoài của cuộn 2;

- $\mu_d, \tau_{yd}$ : tương ứng là độ nhớt sau chảy dẻo, ứng suất chảy dẻo của các khu vực MRF1, MRF2, MRF3, MRF4, MRF5 và MRF6 của đĩa 1 và đĩa 2.

Mô men ma sát của phốt chặn MRF có thể được ước tính theo (2-24):

$$T_{s1} = 0,65(2R_{s1})^2 \omega_1^{1/3} \quad (4-4)$$

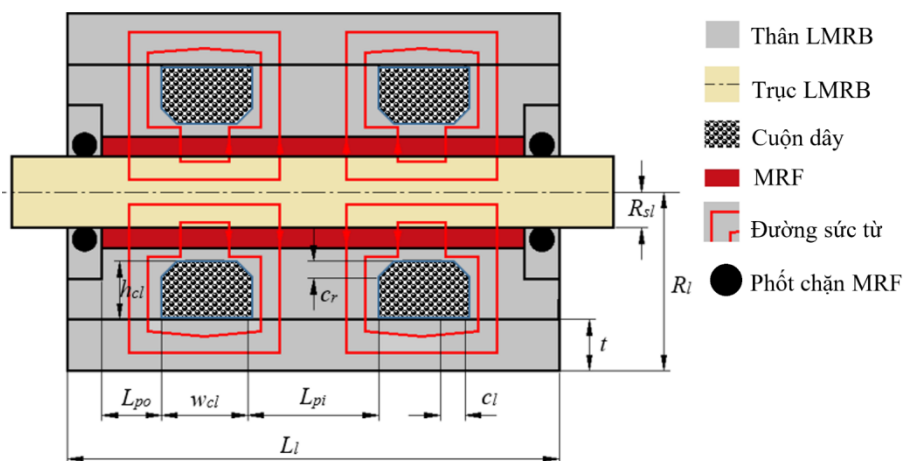
$$T_{s2} = 0,65(2R_{s2})^2 \omega_2^{1/3} \quad (4-5)$$

Với  $R_{s1}$  là bán kính trục 1;  $R_{s2}$  là bán kính trục 2.

$\omega$  là vận tốc vòng của trục (vòng/phút).

#### 4.2.2 Tính toán lực hãm LMRB.

Cấu tạo cơ bản của LMRB thể hiện bởi **Hình 4.3**. Nguyên lý hoạt động của LMRB là trục phanh sẽ được trượt trên hai bạc trượt ở hai đầu, hai bạc trượt này được cố định trên thân của LMRB, khe hở giữa trục và thân LMRB sẽ được điền đầy MRF, trên thân LMRB bố trí các cuộn dây để tạo ra từ thông cho LMRB. Để ngăn không cho MRF rò rỉ thì có bố trí hai O-ring ở hai đầu của LMRB.



**Hình 4.3:** Cấu hình của LMRB.

Lực hãm của LMRB được tính theo công thức (2-23):

$$F_{sd} = \frac{2\pi \cdot \mu \cdot R_{sl} \cdot L \cdot u}{t_g} + 2(\pi R_{sl} L \tau_y + F_{or}) \quad (4-6)$$

Trong đó:

- $R_{sl}$  là bán kính của trục;
- $t_g$  là kích thước khe MRF;
- $u$  là vận tốc tương đối giữa trục và vỏ;

- $\mu, \tau_y$  là độ nhớt sau chảy dẻo và ứng suất chảy MRF;
- $L$  : chiều dài của ống MRF;

Lực ma sát giữa trục và vòng chắn MRF [53]:

$$F_{or} = f_c L_o + f_h A_r \quad (4-7)$$

Trong đó:

- $L_o$  là chiều dài bề mặt ma sát;
- $f_c$  là ma sát trên một đơn vị chiều dài của chu vi trục ( $f_c = 87,5$  N/mm)
- $f_h$  là lực ma sát của vòng chắn;
- $A_r$  là diện tích tiếp xúc.

### 4.3 Tính toán tối ưu hóa cho BMRA và LMRB.

#### 4.3.1 Tối ưu hóa BMRA.

Việc thiết kế tối ưu của hai BMRA đã được trình bày như trên. Cần lưu ý rằng, trong thiết kế cơ cấu tác động dùng MRF thì mô men đầu ra và khối lượng hoặc thể tích là hai mục tiêu quan trọng nhưng lại mâu thuẫn với nhau. Trong nghiên cứu này trục của BMRA quay với tốc độ ổn định tương đối nhỏ (60 vòng/phút) nên lực quán tính của các BMRA có thể bỏ qua. Vì vậy thể tích của các BMRA được thiết lập làm hàm mục tiêu trong việc tối ưu hóa các BMRA để kích thước và chi phí nhỏ nhất. Ngoài ra, mô men đầu ra bị ràng buộc lớn hơn giá trị yêu cầu được xác định từ lực phản hồi tối đa theo mong muốn. Việc tối ưu hóa là đi tìm giá trị các kích thước hình học của BMRA để thể tích hiệu dụng của nó là nhỏ nhất và được xác định như sau:

$$V_{BMRA} = \pi R^2 \cdot L \quad (\text{với ràng buộc: } T_b \geq T_{br}) \quad (4-8)$$

Với  $R$  là bán kính ngoài BMRA;

$L$  là chiều rộng hiệu dụng của BMRA

$T_{br}$  là mô men đầu ra yêu cầu tối đa và được xác định từ lực phản hồi mong muốn tối đa mỗi hướng như sau:

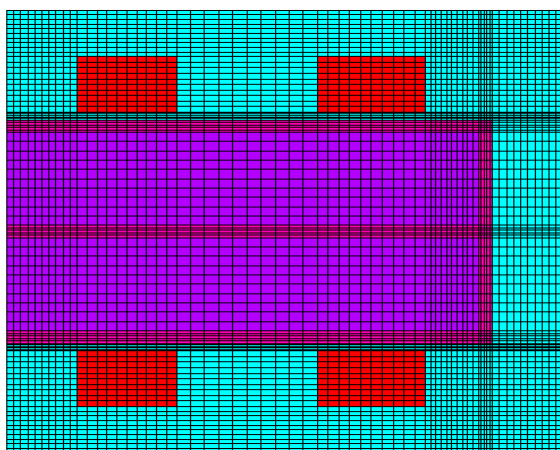
$$T_{br} = l_{max} F_{max} \quad (4-9)$$

Với  $F_{max}$  là lực phản hồi tối đa mong muốn mỗi hướng được chọn bằng 20 N;  $l_{max}$  là chiều dài tối đa của cần điều khiển là 200 mm. Từ đó, mô men đầu ra yêu cầu tối đa có thể được tính là 4 Nm. Trong nghiên cứu này, mô men đầu ra tối đa yêu cầu

của các BMRA được thiết lập bằng 5 Nm để bù cho việc mô hình thiếu chính xác và tổn thất năng lượng.

Các biến thiết kế của BMRA là chiều cao các cuộn dây ( $h_{c1}, h_{c2}$ ); chiều rộng của cuộn dây ( $w_c$ ); bán kính ngoài, trong của đĩa ( $R_{do}, R_{di}$ ); vị trí của cuộn dây ( $R_{ci1}, R_{ci2}$ ); độ dày của đĩa ( $t_d$ ); độ dày của vỏ hình trụ ( $t_o$ ); độ dày phần bên ngoài vỏ bên ( $t_h$ ), khe lưu chất ( $t_g$ ) theo kinh nghiệm chọn  $t_g = 0,8$  mm. Đối với độ dày thành mỏng của vỏ ( $t_w$ ), chọn theo kinh nghiệm là 0,6 mm.

Để tính toán ứng suất chảy dẻo và độ nhót sau chảy dẻo của MRF trong các khe MRF, trước hết phải xác định mật độ từ thông trên các ống dẫn này. Tác giả vẫn sử dụng phần mềm ANSYS để giải quyết vấn đề từ tính và sau đó mật độ từ thông được tính toán. Mô hình PTHH sử dụng là phần tử cặp đối xứng trục (PLANE 13) phần mềm ANSYS áp dụng cho BMRA được biểu diễn bởi **Hình 4.4**.

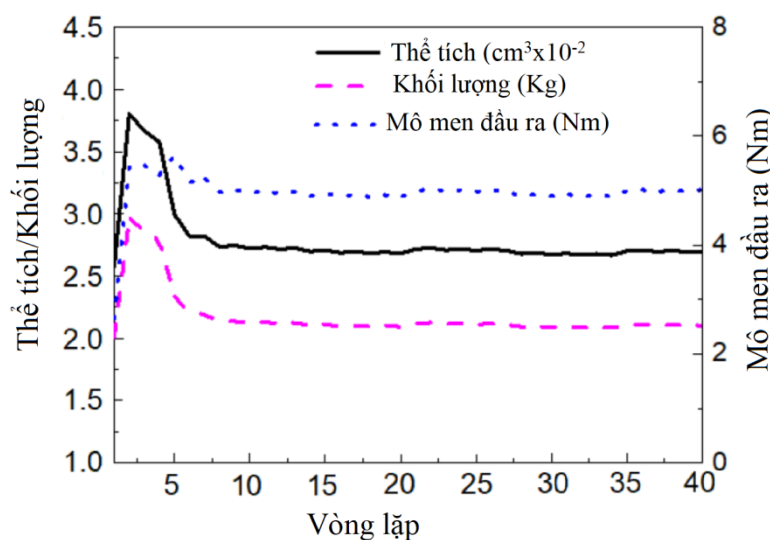


**Hình 4.4:** Mô hình PTHH phân tích mạch từ BMRA.

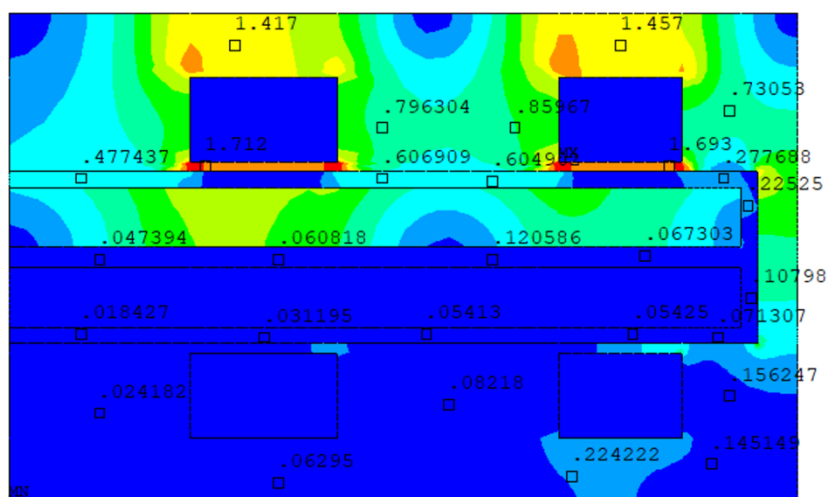
Kết quả tối ưu của BMRA được trình bày bởi **Hình 4.5** cho thấy khi mô men đầu ra tối đa bị ràng buộc bằng hoặc lớn hơn 5 Nm với độ chính xác 2%. Cũng cần lưu ý, tỷ lệ điền đầy cuộn dây được lấy bằng 80% trong khi tổn thất từ tính được giả định 10% dựa trên kinh nghiệm thực nghiệm. Tỷ lệ hội tụ của tối ưu hóa được đặt bằng 0,1%. Đường kính dây đồng bằng 0,511 mm và dòng điện tối đa ( $I = 2,5$  A) được áp dụng cho các cuộn dây trong quá trình tối ưu hóa.

Kết quả trong **Hình 4.5a** cho thấy rằng tối ưu được hội tụ ở vòng lặp thứ 40 ứng với thể tích hiệu dụng của BMRA là  $269 \text{ cm}^3$  và khối lượng tương ứng là 2,05 kg và

ta thấy rằng khối lượng BMRA gần như được giảm ở mức tối đa. Mô men xoắn đầu ra là 4,99 Nm gần bằng với mô men xoắn theo yêu cầu. Các kết quả tối ưu được đưa ra trong **Bảng 4.1**. Để hiểu rõ hơn về kết quả tối ưu của BMRA thì phân bố mật độ từ thông của BMRA ở mức tối ưu được thể hiện trong **Hình 4.5b**, cho thấy mật độ từ thông tại các bức tường mỏng đạt đến độ bão hòa từ của vật liệu vỏ theo yêu cầu.



a) Khối lượng và mô men của BMRA.



b) Mật độ từ thông ở mức tối ưu.

**Hình 4.5:** Giải pháp tối ưu hóa của BMRA.

**Bảng 4.1.** Kết quả tối ưu của BMRA.

Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_{c1} = w_{c2} = 4,25; h_{c1} = 7,4; h_{c2} = 6,2; R_{ci1} = 29;$ $R_{ci2} = 47,5; R_i = 20; R_o = 56,6; t_d = 4;$ $R = 59,4; t_h = 3,2; L = 24,3; t_w = 0,6; t_g = 0,8$	$T_{max} = 4,99 \text{ Nm}; P_w = 24 \text{ W}$ $V = 269 \text{ cm}^3; m_b = 2,05 \text{ Kg}$ $R_{c1} = 1,68 \Omega; R_{c2} = 2,16 \Omega$

### 4.3.2 Tối ưu hóa LMRB.

Đối với LMRB thì thân vỏ được gắn vào thân trục Y của cơ cấu gimbal và tự do chuyển động bên trong rãnh của thân trục Y. Trong trường hợp này, chiều rộng của khe được chọn là 32 mm và đường kính ngoài của LMRB thiết lập bằng 30 mm. Trong thực tế, lực trạng thái ban đầu của LMRB là không thể kiểm soát và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất của cần điều khiển. Nếu lực trạng thái ban đầu lớn thì cần điều khiển không thể phản xạ lực nhỏ cho người điều khiển. Do đó, trong thiết kế của LMRB thì lực trạng thái ban đầu càng nhỏ càng tốt.

Từ các vấn đề trên thì việc tìm các giá trị tối ưu các kích thước chủ yếu của LMRB sao cho có lực trạng thái ban đầu giảm đến thấp nhất có thể và được xác định bởi công thức sau:

$$F_{d0} = \frac{2\pi\mu_0 R_{sl} L_d u}{t_g} + 2(\pi R_{sl} L_d \tau_{y0} + F_{or}) \quad (4-10)$$

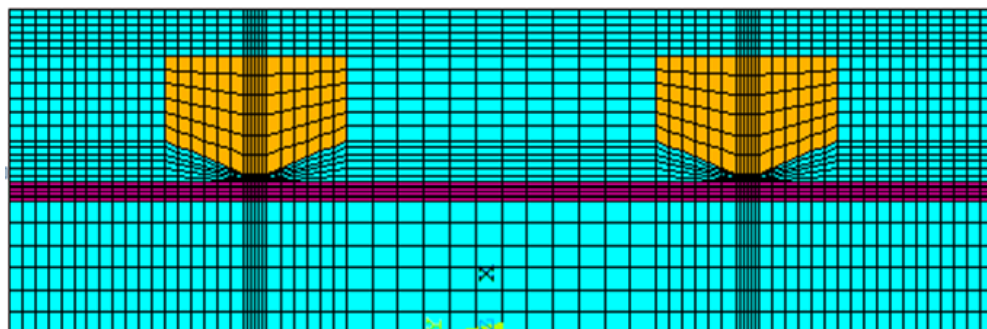
Với ràng buộc  $F_b \geq F_{br}, R_l \leq 30$  (mm)

Trong đó:

- $\mu_0$  và  $\tau_{y0}$  là độ nhớt chảy dẻo và ứng suất của MRF ở trạng thái tắt;
- $R_l$  là bán kính LMRB,  $L_d$  là chiều dài ống MRF,  $R_{sl}$  là bán kính trục;
- $F_{br}$  là lực hãm của LMRB ( $F_{br} = 20 \text{ N}$ , lực yêu cầu tối đa của LMRB được đặt bằng 25 N để bù cho mô hình thiếu chính xác và thất thoát năng lượng).

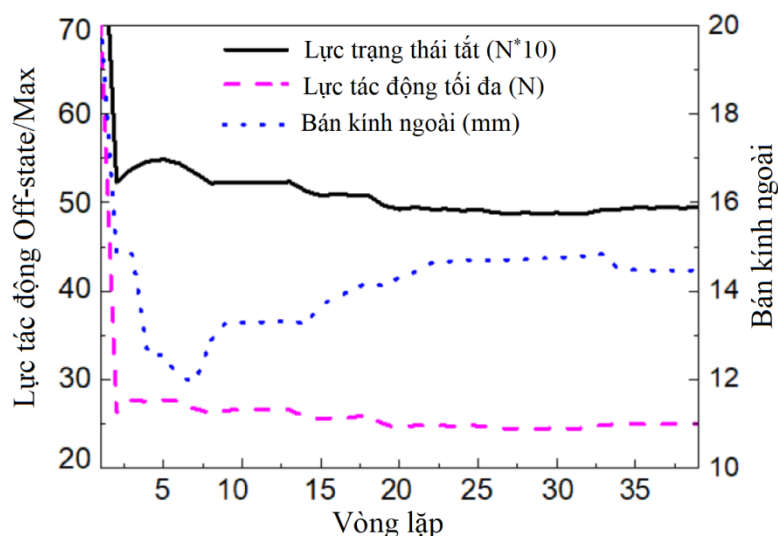
Chiều cao cuộn dây ( $h_{cl}$ ), chiều rộng cuộn dây ( $w_{cl}$ ), góc vát cuộn dây ( $c_r, c_l$ ); chiều dài lõi bên trong và ngoài ( $L_{po}, L_{pi}$ ), bán kính trục ( $R_{sl}$ ) và độ dày vỏ ( $t_h$ ). Tất cả thông số hình học của LMRB trên đều được chọn làm biến thiết kế khi tối ưu hóa hình học cho LMRB. Tương tự để tính toán ứng suất chảy dẻo và độ nhớt sau chảy dẻo của MRF trong khe lưu chất của LMRB, tác giả vẫn ứng dụng phần mềm ANSYS

để giải quyết vấn đề từ tính và sau đó mật độ từ thông được tính toán. Mô hình phần tử hữu hạn sử dụng là phần tử cặp đối xứng trục (PLANE 13) của phần mềm ANSYS áp dụng cho LMRB được hiển thị trong **Hình 4.6**.



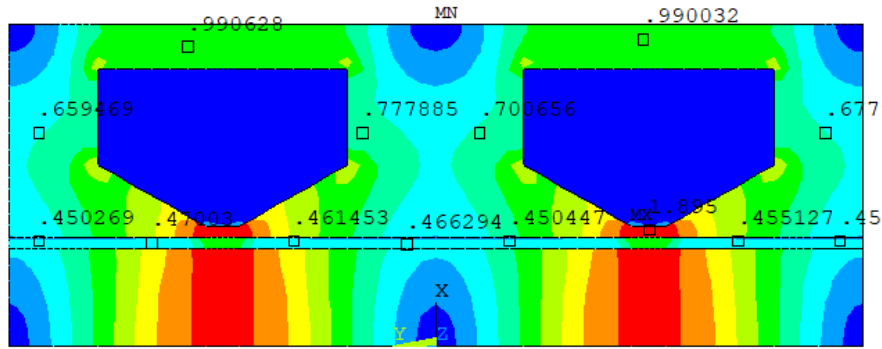
**Hình 4.6:** Mô hình PTHH phân tích mạch từ LMRB.

Tương tự cho giải pháp tối ưu cho LMRB với lực phanh tối đa 25 N. Với kích thước khe MRF được lấy theo kinh nghiệm là 0,6 mm trong khi độ dày thành mỏng (độ dày giữa cuộn dây MRF) được lấy 0,5 mm. Từ **Hình 4.7** ta thấy rằng sự hội tụ xảy ra sau vòng lặp thứ 39, tại đó lực trạng thái ban đầu là 4,95 N. Lực phanh tối đa là 24,94 N gần bằng với lực cần thiết. Bán kính ngoài của vỏ là 14.5 mm nhỏ hơn giá trị ràng buộc. Chiều dài hiệu dụng của LMRB là 39 mm trong khi khối lượng của nó là 0,2 kg. Phân bố mật độ từ tính của LMRB thể hiện trong **Hình 4.8**. Các giá trị tối ưu của biến thiết kế và tham số hiệu suất của LMRB thể hiện bởi **Bảng 4.2**.



**Hình 4.7:** Kết quả tối ưu của LMRB.





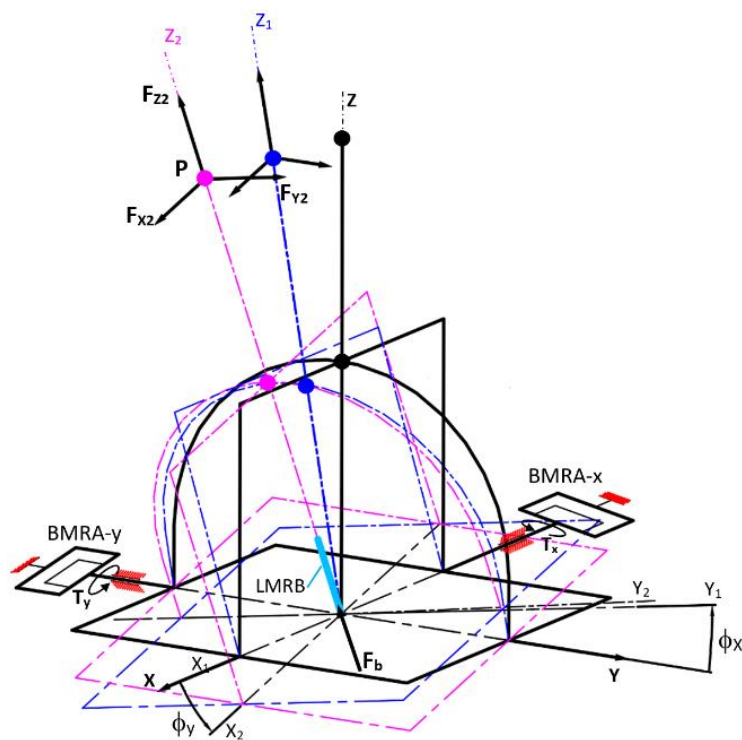
**Hình 4.8:** Phân bố từ thông ở mức tối ưu LMRB.

**Bảng 4.2.** Kết quả tối ưu của LMRB.

Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_{cl} = 11,3; h_{cl} = 7,4; c_l = 4,85; c_r = 2,85;$	$F_{tinh} = 4,95 \text{ N};$
$R = 14,8; L_{po} = 4,0; L_{pi} = 8,0; L_l = 38,7$	$F_{max} = 24,94 \text{ N}; m_b = 0,2 \text{ Kg}$
$t_w = 0,5; t_o = 2,1; R_{sl} = 4,5; t_g = 0,5$	$P_w = 4,5 \text{ W}; R = 2,3 \Omega$

#### 4.4 Phân tích lực của hệ thống phản hồi lực 3D.

Sơ đồ động học của cần điều khiển của hệ phản hồi lực như **Hình 4.9**



**Hình 4.9:** Sơ đồ động học của cần điều khiển.

Tại vị trí bất kỳ của tay cầm ở vị trí P với trục Z có chiều dài  $l$ , ta xoay cần một góc  $\phi_x$  theo trục X và  $\phi_y$  theo trục Y thì vị trí của điểm hoạt động P (vị trí núm điều khiển) được xác định bởi:

$$r_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = R_Y R_X \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix} = R_{XY} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lc(\phi_x)s(\phi_y) \\ -ls(\phi_x) \\ lc(\phi_x)c(\phi_y) \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Với  $R_X$  và  $R_Y$  tương ứng là ma trận xoay trục X và Y.

$$R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\phi_x) & -s(\phi_x) \\ 0 & s(\phi_x) & c(\phi_x) \end{bmatrix}; R_Y = \begin{bmatrix} c(\phi_y) & 0 & s(\phi_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -s(\phi_y) & 0 & c(\phi_y) \end{bmatrix}$$

$$R_{XY} = \begin{bmatrix} c(\phi_y) & s(\phi_x)s(\phi_y) & c(\phi_x)s(\phi_y) \\ 0 & c(\phi_x) & -s(\phi_x) \\ -s(\phi_y) & c(\phi_y)s(\phi_x) & c(\phi_x)c(\phi_y) \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

Với  $s$ : sin;  $c$ : cos

Với giả thuyết rằng lực quán tính, mô men quán tính của hệ thống được bỏ qua thì quan hệ giữa mômen/lực tác động (mô men đầu ra của BMRA và lực hãm của LMRB) với lực hoạt động tại núm điều khiển có thể được xác định theo nguyên lý công ảo như sau:

$$T_x \delta \phi_x + T_y \delta \phi_y + F_b dl + F_{xp} \delta x_p + F_{yp} \delta y_p + F_{zp} \delta z_p = 0 \quad (4-13)$$

Phương trình (4-13) cơ thể viết lại như sau:

$$[T_x \quad T_y \quad F_b] \begin{bmatrix} \delta \phi_x \\ \delta \phi_y \\ \delta l \end{bmatrix} + [F_{xp} \quad F_{yp} \quad F_{zp}] \begin{bmatrix} \delta x_p \\ \delta y_p \\ \delta z_p \end{bmatrix} = 0 \quad (4-14)$$

Với:

- $T_x$  và  $T_y$  tương ứng là mô men xoắn đầu ra của BMRA đối với trục X và Y và  $F_b$  là lực hãm của LMRB;
- $\delta \phi_x$ ,  $\delta \phi_y$ ,  $\delta l$  tương ứng là chuyển vị ảo theo phương X, Y và hướng  $l$  (dọc theo cần điều khiển);
- $F_{xp}$ ,  $F_{yp}$  và  $F_{zp}$  lần lượt là lực vận hành tại núm thao tác theo hướng X, Y và Z;
- $\delta x_p$ ,  $\delta y_p$ ,  $\delta z_p$  là chuyển vị ảo của núm thao tác ở các hướng X, Y và Z.

Chuyển vị ảo của nùm có thể tính như sau:

$$\delta r_p = \begin{bmatrix} \delta x_p \\ \delta y_p \\ \delta z_p \end{bmatrix} = \delta r_{p,xy} + \delta r_{p,l} \quad (4-15)$$

Với  $\delta r_{p,xy}$  là dịch chuyển vị ảo của nùm điều khiển tương ứng với các dịch chuyển ảo  $\delta\phi_x$ ,  $\delta\phi_y$ , còn  $\delta r_{p,l}$  là ứng với dịch chuyển ảo  $\delta l$ . Do đó phương trình (4-15) được viết lại như sau:

$$\delta r_{p,xy} = [R_{\delta\phi_x} R_{\delta\phi_y} - I] r_p \quad (4-16)$$

$$\delta r_{p,l} = \frac{r_p}{l} \cdot \delta l = \begin{bmatrix} c(\phi_x)s(\phi_y) \\ -s(\phi_x) \\ c(\phi_x)c(\phi_y) \end{bmatrix} \delta l \quad (4-17)$$

Trong đó  $R_{\delta\phi_x}$  là ma trận xoay của chuyển vị ảo  $\delta\phi_x$  theo phương X,  $R_{\delta\phi_y}$  là ma trận xoay của chuyển vị ảo  $\delta\phi_y$  theo phương Y. Vì chuyển vị ảo  $\delta\phi_x$ ,  $\delta\phi_y$  rất bé nên ta có các quan hệ sau:

$$\begin{aligned} R_{\delta\phi_x} R_{\delta\phi_y} &= \begin{bmatrix} c(\delta\phi_y) & s(\delta\phi_x)s(\delta\phi_y) & c(\delta\phi_x)s(\delta\phi_y) \\ 0 & c(\delta\phi_x) & -c(\delta\phi_x) \\ -s(\delta\phi_y) & c(\delta\phi_y)s(\delta\phi_x) & c(\delta\phi_x)c(\delta\phi_y) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta(\phi_y) \\ 0 & 1 & -\delta(\phi_x) \\ -\delta(\phi_y) & \delta(\phi_x) & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-18)$$

Từ phương trình (4-11),(4-15) đến (4-18) có thể đạt được:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta x_p \\ \delta y_p \\ \delta z_p \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & z_p & x_p/l \\ -z_p & 0 & y_p/l \\ y_p & -x_p & z_p/l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(\phi_x) \\ \delta(\phi_y) \\ \delta l \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & lc(\phi_x)c(\phi_y) & c(\phi_x)s(\phi_y) \\ -lc(\phi_x)c(\phi_y) & 0 & -s(\phi_x) \\ -ls(\phi_x) & -lc(\phi_x)s(\phi_y) & c(\phi_x)c(\phi_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\phi_x \\ \delta\phi_y \\ \delta l \end{bmatrix} = J_{XY} \cdot \begin{bmatrix} \delta\phi_x \\ \delta\phi_y \\ \delta l \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-19)$$

Thế phương trình (4-19) vào (4-14) ta đạt như sau:

$$[T_x \quad T_y \quad -F_b] \begin{bmatrix} \delta\phi_x \\ \delta\phi_y \\ \delta l \end{bmatrix} + [F_{xp} \quad F_{yp} \quad F_{zp}] J_{XY} \begin{bmatrix} \delta\phi_x \\ \delta\phi_y \\ \delta l \end{bmatrix} = 0 \quad (4-20)$$

Từ phương trình (4-20), mô men/lực tác động có thể được tính từ lực hoạt động tại núm cần điều khiển.

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ F_b \end{bmatrix} = -J_{XY}^T \begin{bmatrix} F_{xp} \\ F_{yp} \\ F_{zp} \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

Quan hệ giữa lực tác động cục bộ với lực tác động toàn cục cho bởi:

$$\begin{bmatrix} F_{xp} \\ F_{yp} \\ F_{zp} \end{bmatrix} = R_{XY} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

Từ phương trình (4-21) và (4-22) quan hệ giữa lực cục bộ tại núm và lực tác động (mô men đầu ra của các BMRA và lực hãm của LMRB) được thể hiện bằng:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ F_b \end{bmatrix} = -J_{XY}^T R_{XY} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ls(\phi_x)s(\phi_y) & lc(\phi_y) & 0 \\ -lc(\phi_x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

Nếu làm tương tự, thì từ vị trí ban đầu nếu tay cầm quay một góc  $\phi_y$  theo trục Y sau đó quay một góc  $\phi_x$  theo trục X, quan hệ lực hoạt động cục bộ tại núm điều khiển và lực/mô men tác động có thể xác định bởi:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ F_b \end{bmatrix} = -J_{XY}^T R_{YX} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & lc(\phi_y) & 0 \\ -lc(\phi_x) & ls(\phi_x)s(\phi_y) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

Từ phương trình (4-23) và (4-24) nhận thấy rằng lực pháp tuyến chỉ phụ thuộc vào lực giảm chấn tuyến tính ( $F_b = -F_{z2}$ ). Do đó, việc điều khiển lực phản hồi pháp tuyến  $F_{z2}$  có thể điều khiển bởi lực giảm chấn của LMRB, còn việc điều khiển các lực tiếp tuyến  $F_{x2}$  và  $F_{y2}$  bằng cách kết hợp điều khiển các mô men đầu ra  $T_x$  và  $T_y$  của BMRA. Tổng quát với vị trí của tay cầm tùy ý thì được xác định bởi ma trận xoay tổng quát  $R$  như sau:

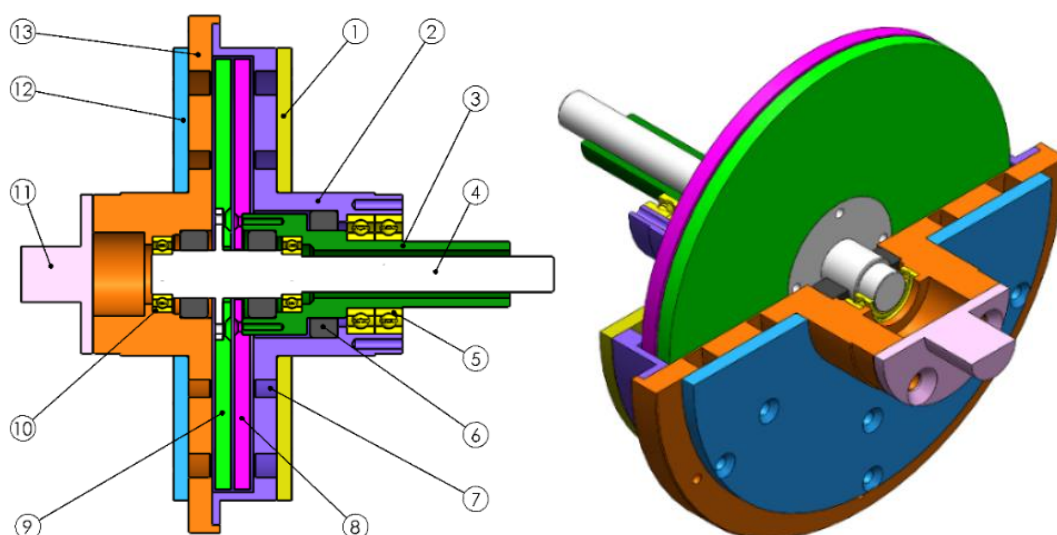
$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ F_b \end{bmatrix} = -J_{XY}^T R \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix}; \quad J_{XY} = \begin{bmatrix} 0 & z_p & x_p/l \\ -z_p & 0 & y_p/l \\ y_p & -x_p & z_p/l \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

Với phương trình (4-25) chúng ta có  $F_b = -F_{z2}$ ,  $T_x$  và  $T_y$  là hai hàm của  $F_{x2}$  và  $F_{y2}$ .

### 4.5 Thiết kế, chế tạo hệ thống phản hồi lực 3D.

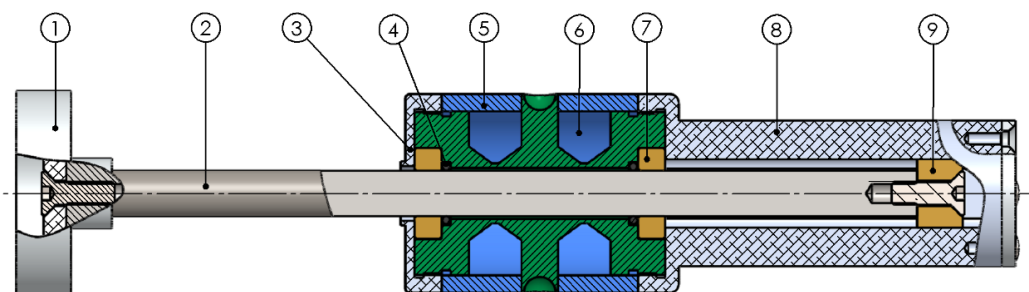
Sau khi có các giá trị các thông số tối ưu của BMRA và LMRB thì nhóm nghiên cứu dựa trên các số liệu tối ưu kết hợp với các tiêu chuẩn cơ khí để tiến hành thiết kế hệ thống phản hồi lực 3D hoàn chỉnh.

- Đối với BMRA (**Hình 4.10**): (1, 12) vỏ ngoài; (2, 13) vỏ trong; (3) trục 1; (4) trục 2; (5) ổ lăn kép; (6) phốt chặn MRF; (7) cuộn dây; (8) đĩa 1; (9) đĩa 2; (10) ổ đỡ trục; (11) trục đầu ra.



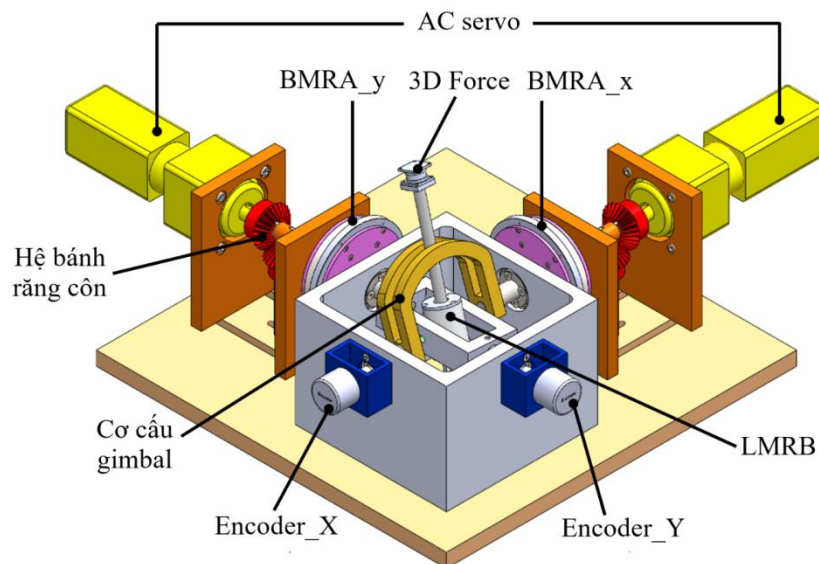
**Hình 4.10:** Bản vẽ CAD của BMRA.

- Đối với LMRB (**Hình 4.11**): (1) đế cảm biến lực; (2) trục; (3) nắp trên; (4) phốt chặn; (5) vỏ ngoài; (6) cuộn dây; (7) bạc trượt; (8) nắp dưới; (9) bạc dẫn hướng.



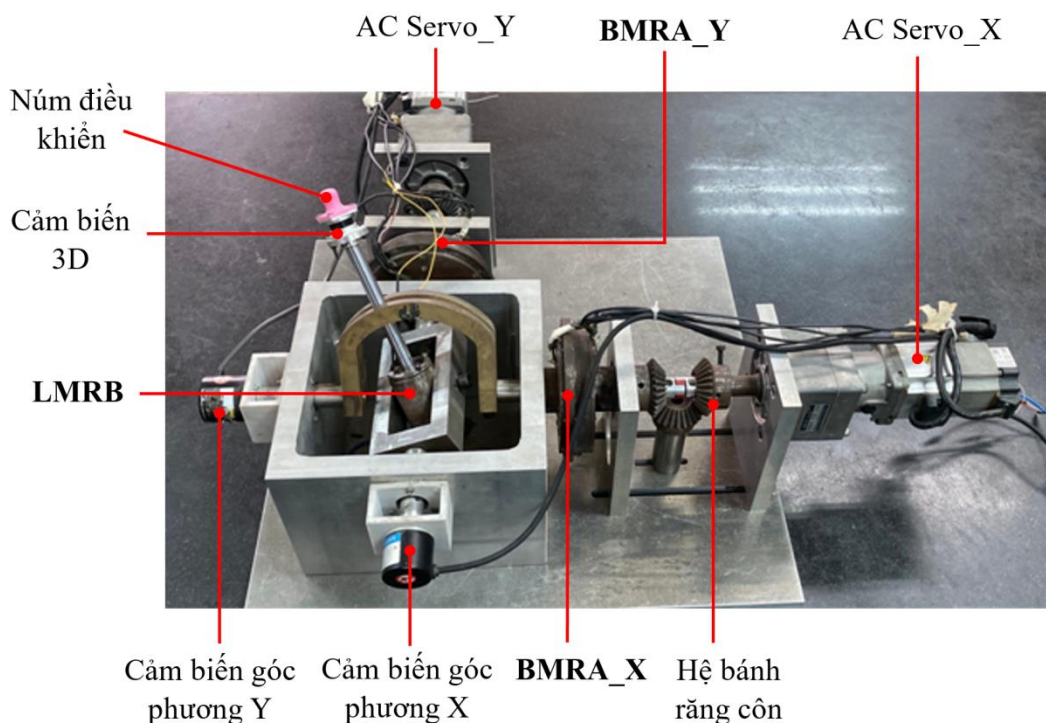
**Hình 4.11:** Mô hình CAD của LMRB.

Sau khi thiết kế BMRA và LMRB tác giả tiến hành hoàn thiện mô hình 3D của hệ thống joystick 3D phản hồi lực biểu diễn bởi **Hình 4.12**.



**Hình 4.12:** Mô hình CAD và thực tế của hệ joystick 3D.

Từ kết quả thiết kế tác giả tiến hành chế tạo và hoàn thiện hệ thống với sự kết nối các thiết bị cần thiết được thể hiện bởi **Hình 4.13**.



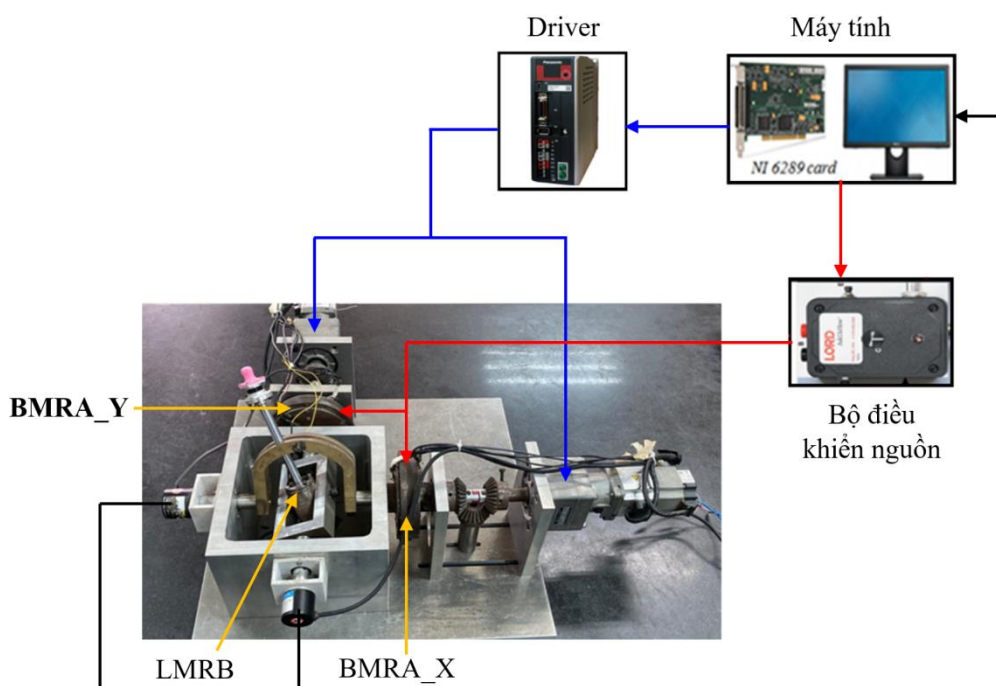
**Hình 4.13:** Mô hình thực tế hệ joystick 3D.

#### 4.6 Thực nghiệm và kết quả mô men BMRA và lực LMRB.

Chú ý rằng số vòng thực tế các cuộn dây của BMRA là  $n_1 = 90$ ,  $n_2 = 80$  (trong tính toán là 97 và 81), với LMRB thực tế là 220 (trong tính toán là 230 vòng).

Mô hình thực nghiệm cần điều khiển phản hồi lực 3D được thiết lập thể hiện ở **Hình 4.14**. Thẻ PCI (NI-6289) được sử dụng để tương tác giữa cần điều khiển và máy tính sử dụng công cụ hệ thống DSP (Matlab). Một cảm biến lực 3D được lắp tại cuối tay cầm để xác định lực vận hành thực tế  $F_{x2}$ ,  $F_{y2}$  và  $F_{z2}$ .

Vị trí góc trục X và Y của cơ cấu được đo bằng cảm biến góc. Từ thông tin của cảm biến góc thì vị trí góc ( $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ) của tay cầm được xác định và vị trí của điểm vận hành được tính bằng công thức (4-11). Dòng điện cung cấp cuộn dây từ 0 - 2,5 A, được điều khiển bởi máy tính (tín hiệu điều khiển với điện áp 0 - 5 V). Thông qua bộ khuếch đại các động cơ được điều khiển bởi máy tính để động cơ quay với tốc độ không đổi 600 (vòng/phút) nhưng qua hộp số có tỷ số truyền 10:1 làm các trục BMRA quay với tốc độ 60 (vòng/phút).



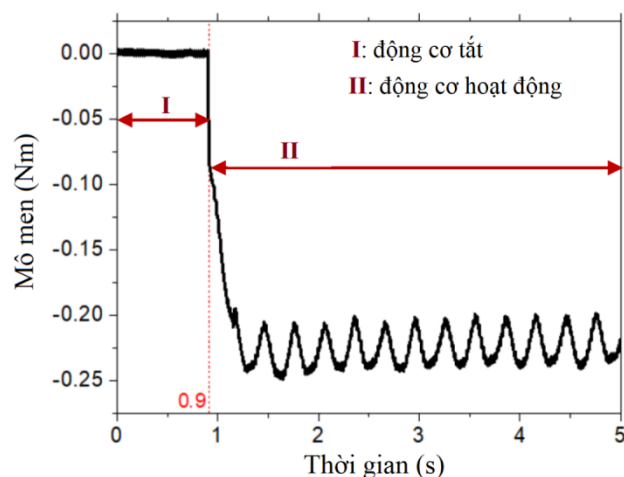
**Hình 4.14:** Mô hình thực nghiệm cần điều khiển phản hồi 3D.

Trước hết, mô men xoắn đầu ra của các BMRA như là một hàm của dòng điện áp dụng cho cuộn dây được nghiên cứu. Với các kết quả thử nghiệm này sau đó được sử dụng để kiểm soát lực phản hồi của cần điều khiển, mô men đầu ra của các BMRA được đo trực tiếp trên cần điều khiển. Để đánh giá mô men đầu ra của BMRA là hàm số của dòng điện áp dụng, trục của LMRB (cần điều khiển) được điều chỉnh sao cho

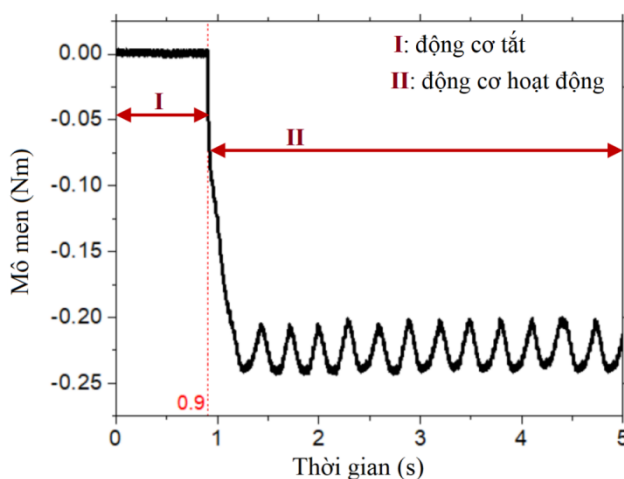


khoảng cách từ vị trí cảm biến lực đến tâm của cần điều khiển là 200 mm, sau đó tay cầm được cố định theo hướng Z (vị trí thẳng đứng).

Các động cơ được điều khiển để quay với tốc độ không đổi 600 vòng/phút và các lực tại điểm vận hành ( $F_{x2}$ ,  $F_{y2}$  và  $F_{z2}$ ) được đo bằng cảm biến lực. Từ các lực đo được, mô men đầu ra của BMRA\_x và BMRA\_y sau đó có thể được tính bằng cách nhân của lực đo tương ứng và chiều dài tay cầm (200 mm). Trong thử nghiệm đầu tiên, mô men đầu ra ở trạng thái ban đầu (không có dòng điện áp dụng cho cuộn dây) được ghi nhận và được biểu diễn trong **Hình 4.15**.



a) BMRA\_x



b) BMRA\_y

**Hình 4.15:** Mô men xoắn của BMRA ở trạng thái ban đầu.

Kết quả từ **Hình 4.15** có thể tính giá trị ổn định trung bình của các mô men đầu ra trạng thái ban đầu tương ứng là -0,218 Nm và -0,215 Nm. Giá trị âm có nghĩa là

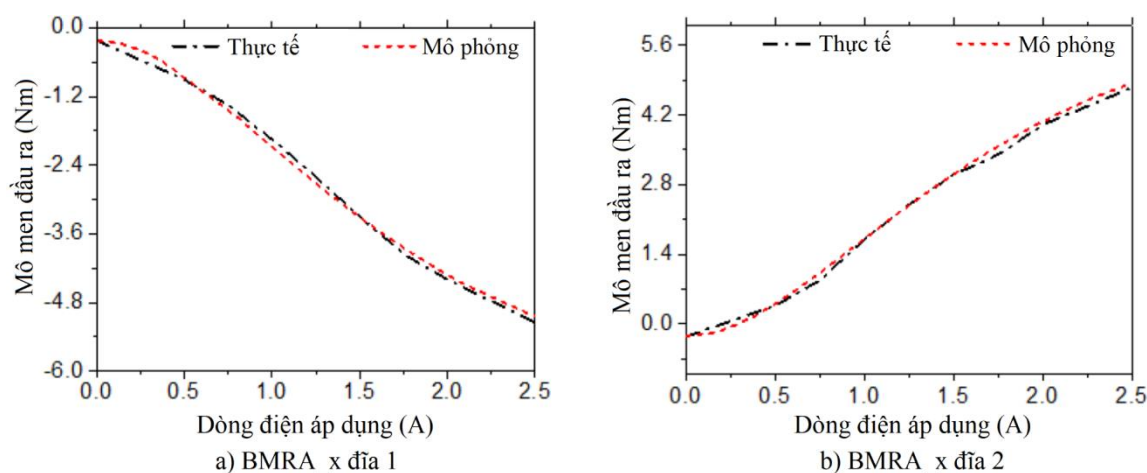


mô men đầu ra nằm cùng hướng với trục 1 (CW) của BMRA. Điều này là do đường kính của trục 1 lớn hơn trục 2 dẫn đến mô men ma sát cao hơn truyền đến vỏ. Ngoài ra, ổ lăn kép được sử dụng cho trục 1 làm cho ma sát cao hơn ổ lăn đơn được sử dụng cho trục 2. Với cách thay đổi dòng điện áp dụng, các mô men đầu ra của BMRA ở các giá trị khác nhau của dòng được áp dụng có thể được đo theo cùng một cách. **Hình 4.16** cho thấy kết quả thử nghiệm mô men đầu ra của BMRA\_x như là một hàm của dòng điện được áp dụng. Trong **Hình 4.16a**, mô men đầu ra như là một hàm của dòng điện áp dụng cho các cuộn dây ở phía bên của đĩa 1, trong khi đó đối với các cuộn dây ở phía bên của đĩa 2 được hiển thị trong **Hình 4.16b**. Từ các số liệu, cho ta thấy sự phù hợp giữa mô men đầu ra được tính toán và mô men đầu ra đo được của BMRA\_x. Nó cũng được quan sát từ các số liệu rằng, tại dòng điện áp dụng 2,0 A thì cường độ của mô men đầu ra lớn hơn mức tối đa cần thiết (4 Nm).

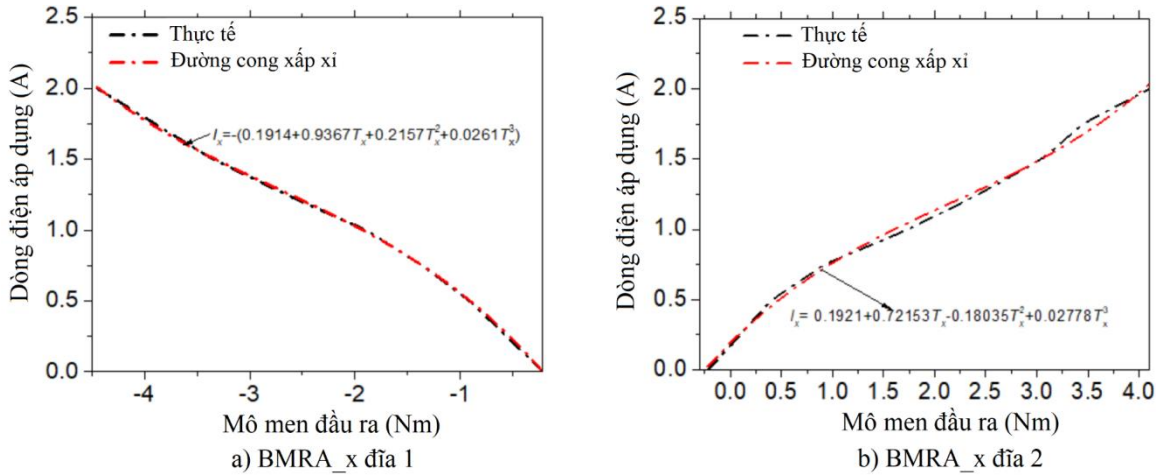
Từ **Hình 4.16**, dòng điện áp dụng cho các cuộn dây trong khoảng từ 0 – 2 A như là một hàm của mô men đầu ra có thể được lấy và thể hiện trong **Hình 4.17**. Áp dụng đường cong xấp xỉ bậc 3, có thể tính được dòng điện áp dụng cho cuộn dây của BMRA\_x mô men xoắn đầu ra bằng:

$$I_x = -(0,1914 + 0,9367T_x + 0,2157T_x^2 + 0,0261T_x^3) \quad (T_x \leq -0,218 \text{ Nm}) \quad (4-26)$$

$$I_x = 0,1921 + 0,72153T_x - 0,18035T_x^2 + 0,02778T_x^3 \quad (T_x > -0,218 \text{ Nm}) \quad (4-27)$$



**Hình 4.16:** Mô men đầu ra của BMRA\_x là một hàm của dòng điện.

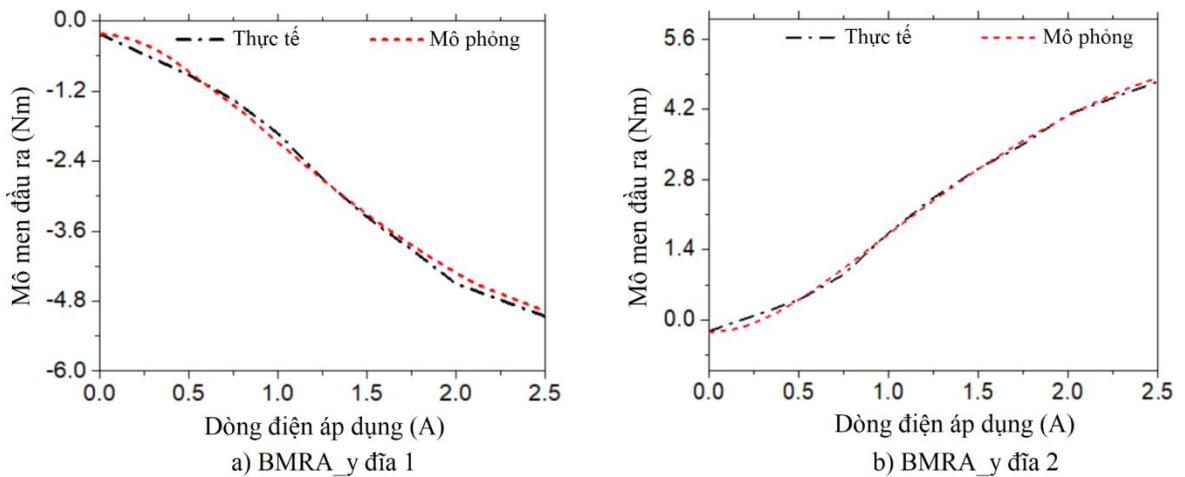


**Hình 4.17:** Dòng điện như hàm mô men đầu ra của BMRA\_x.

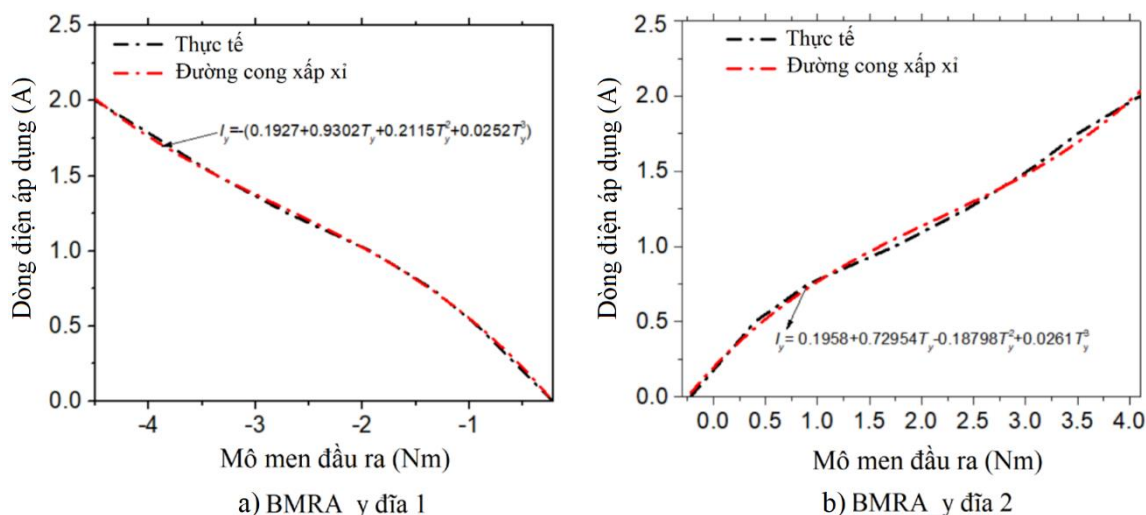
Đối với trục Y thì kết quả thử nghiệm mô men đầu ra của BMRA\_y như là một hàm của dòng điện được áp dụng thể hiện ở **Hình 4.18**. Có thể thu được nghịch đảo của mô men đầu ra so với dòng được áp dụng theo cách tương tự và được thể hiện trong **Hình 4.19**. Bằng cách áp dụng đường cong bậc 3 thì dòng điện áp dụng cho cuộn dây của BMRA\_y có thể được tính từ mô men đầu ra bằng cách:

$$I_y = -(0,1927 + 0,9302T_y + 0,2115T_y^2 + 0,0252T_y^3) \quad (T_y \leq - 0,22 \text{ Nm}) \quad (4-28)$$

$$I_y = 0,1958 + 0,72954T_y - 0,18798T_y^2 + 0,0261T_y^3 \quad (T_y > - 0,22 \text{ Nm}) \quad (4-29)$$



**Hình 4.18:** Mô men đầu ra BMRA\_y là hàm của dòng điện áp dụng.

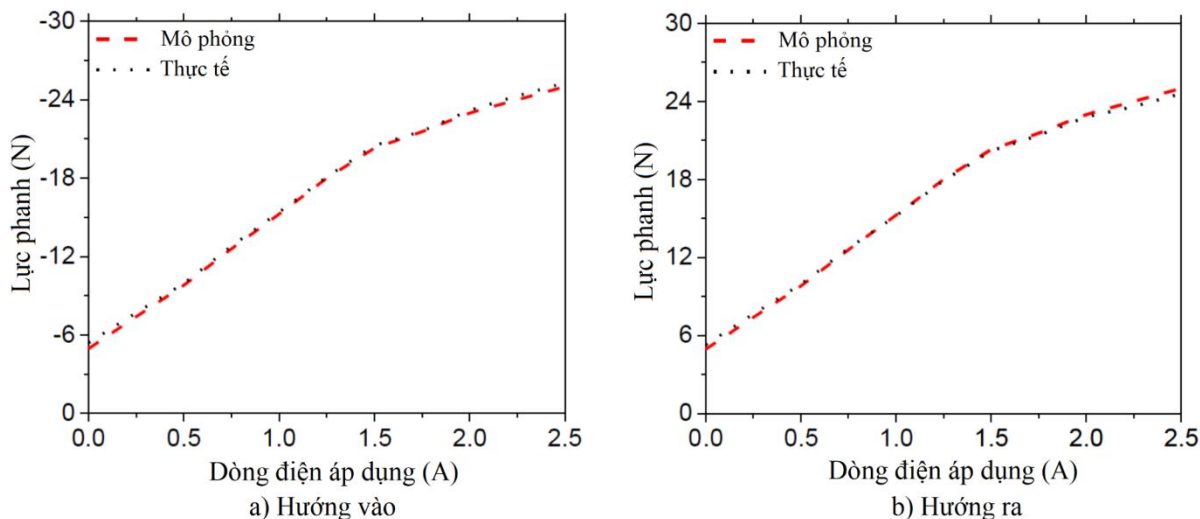


**Hình 4.19:** Dòng điện là hàm của mô men đầu ra BMRA\_y.

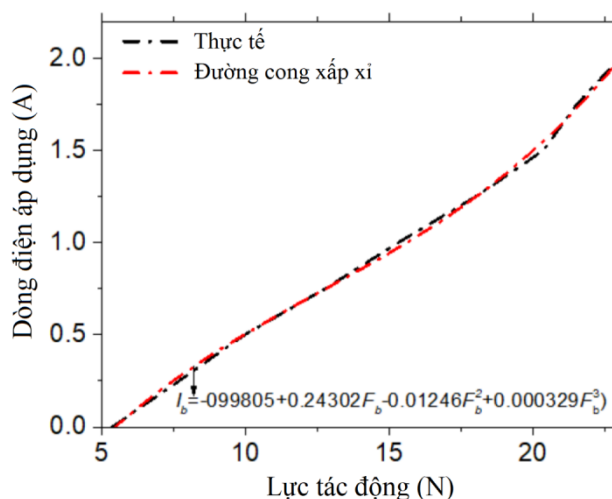
Để đánh giá lực tác động của LMRB là hàm của dòng điện áp dụng cho cuộn dây của nó thì trước hết các động cơ AC servo không hoạt động và tay cầm được cố định theo hướng thẳng đứng. Một dòng điện được điều khiển bởi máy tính được đưa vào các cuộn dây. Sau đó, trục LMRB được di chuyển vào/ra và lực theo hướng Z được đo bằng cảm biến lực 3D. Chú ý rằng cả hai lực tác động vào/ra đều được đo và độ lớn của chúng được tính bằng giá trị trung bình độ lớn của lực vào, ra. **Hình 4.20** cho thấy lực tác động của LMRB như một hàm của dòng điện. Chúng ta thấy rằng tại cường độ dòng điện 2,5 A đặt vào, độ lớn của lực đo được là 25,3 N trong khi lực mô phỏng là 24,98 N, điều này có nghĩa là kết quả mô phỏng và kết quả đo được chấp nhận được. Lực ban đầu (cuộn dây chưa cấp dòng điện) đo được là 5,35 N trong khi lực mô phỏng là 4,95 N. Tại dòng điện bằng 2.0 A đặt vào thì độ lớn của lực tác động là 23.0 N, nó lớn hơn lực cực đại cần thiết. **Hình 4.21** cho thấy dòng điện áp dụng (từ 0 - 2A) cho các cuộn dây dưới dạng hàm số với độ lớn trung bình của lực hướng vào/ra của LMRB. Sử dụng đường công xấp xỉ bậc 3 thì dòng điện đặt vào các cuộn dây có thể được tính từ độ lớn của lực tác động như sau:

$$I_b = -0,99805 + 0,24302|F_b| - 0,01246|F_b|^2 + 0,000329|F_b|^3, (|F_b| > 5,35 N) \tag{4-30}$$

$$I_b = 0 \text{ khi } |F_b| < 5,35 N \tag{4-31}$$



**Hình 4.20:** Lực hãm của LMRB với dòng điện áp dụng.



**Hình 4.21:** Dòng điện áp dụng với độ lớn lực đầu ra của LMRB.

#### 4.7 Điều khiển phản hồi lực cho hệ joystick 3D.

##### 4.7.1 Thiết kế bộ điều khiển vòng hở cho hệ phản hồi lực 3D.

Để điều khiển một lực phản hồi mong muốn đến người vận hành thì tác giả tiến hành xây dựng các bộ điều khiển vòng hở. **Hình 4.22** cho thấy lưu đồ để ghi nhận một lực phản hồi tiếp tuyến cần thiết tại một vị trí bất kỳ của cần. Vị trí góc của các trục cần điều khiển được đo bằng bộ mã hóa góc, trong khi chiều dài của cần điều khiển đo bằng bộ đo tuyến tính (LVDT). Vị trí của núm thao tác được xác định bởi:

$$r_p = [x_p, y_p, z_p]^T = R[0,0, l]^T \tag{4-32}$$

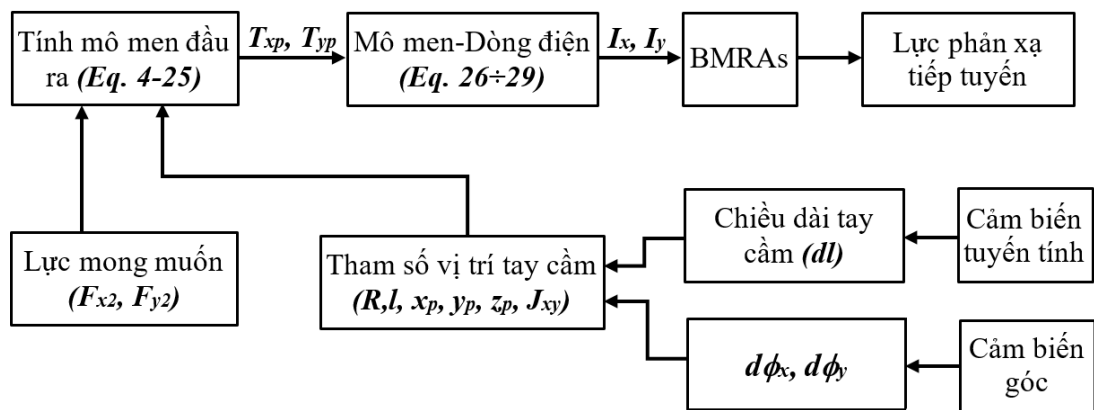
Trong đó  $R$  là tổng ma trận xoay của cần với hệ tọa độ toàn cục. Chú ý thời gian lấy mẫu là  $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ .

Khi đó ma trận  $R$  được viết lại như sau:

$$R(t + \Delta t) = R(\Delta t)R(t) \tag{4-33}$$

Khi đó  $R(\Delta t)$  được viết lại:

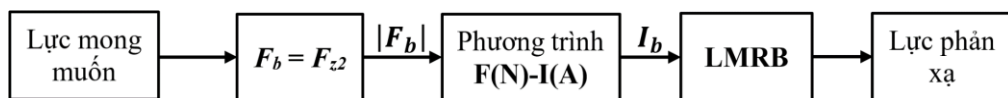
$$R(\Delta t) = R_{d\phi_x}R_{d\phi_y} = \begin{bmatrix} c(d\phi_y) & s(d\phi_x)s(d\phi_y) & c(d\phi_x)s(d\phi_y) \\ 0 & c(d\phi_x) & -s(d\phi_x) \\ -s(d\phi_y) & c(d\phi_y)s(d\phi_x) & c(d\phi_x)c(d\phi_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 9 & d\phi_y \\ 0 & 1 & -d\phi_x \\ -d\phi_y & d\phi_x & 1 \end{bmatrix} \tag{4-34}$$



**Hình 4.22.** Lưu đồ điều khiển hở cho lực phản hồi tiếp tuyến.

Sau khi vị trí của núm vận hành được xác định, ma trận  $J_{xy}$  được tính theo công thức (4-25). Từ lực phản xạ mong muốn ( $F_{x2}, F_{y2}$ ) và các thông số của vị trí núm, mô men đầu ra của các BMRA ( $T_x, T_y$ ) có thể xác định bằng công thức (4-25). Để ghi nhận các mô men đầu ra cần thiết, dòng điện áp dụng cho các cuộn dây của BMRA\_x được tính theo công thức (4-26) và (4-27), trong khi dòng điện áp dụng cho các cuộn dây của BMRA\_y được tính toán theo công thức (4-28) và (4-29).

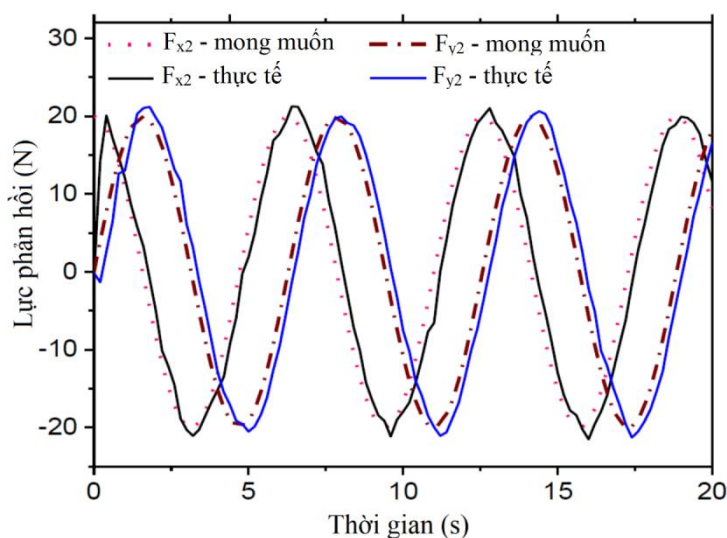
Thông thường lực phản hồi được điều khiển riêng biệt như trong **Hình 4.23**. Từ đây ta thấy rằng lực pháp tuyến mong muốn ( $F_{z2}$ ), lực hãm của LMRB ( $F_b$ ) được xác định bởi  $F_b = F_{z2}$ . Để ghi nhận lực phanh cần thiết ta cấp dòng điện cho các cuộn dây của LMRB được tính bởi công thức (4-30).



**Hình 4.23:** Lưu đồ điều khiển hở cho lực phản hồi thông thường.

Các bộ điều khiển vòng hở trên được thực hiện cho cần điều khiển và các kết quả thực nghiệm đã được thu thập và trình bày. Trong thí nghiệm này, một lực mong muốn phản hồi là dạng hình sin sẽ được thực hiện. Bước đầu tiên, núm vận hành được cố định ở vị trí tùy ý và các lực phản hồi theo hướng  $x_2$  và  $y_2$  được đo bằng cảm biến lực 3D và kết quả cho bởi **Hình 4.24**. Lưu ý rằng trong trường hợp này, lực bình thường ( $F_{z2}$ ) đo được gần như bằng không vì tay cầm được cố định và không có thao tác nào được thực hiện để di chuyển tay cầm dọc theo LMRB.

Theo như kết quả của **Hình 4.24** thì các lực tiếp tuyến phản hồi đo được tương đối tốt so với các lực mong muốn. Tuy nhiên vẫn có độ trễ khoảng 30 ms so với giá trị mong muốn. Điều này chủ yếu là do có độ trễ cơ học của phản ứng mô men xoắn của các BMRA, chúng ta có thể được quan sát trong **Hình 4.24**.

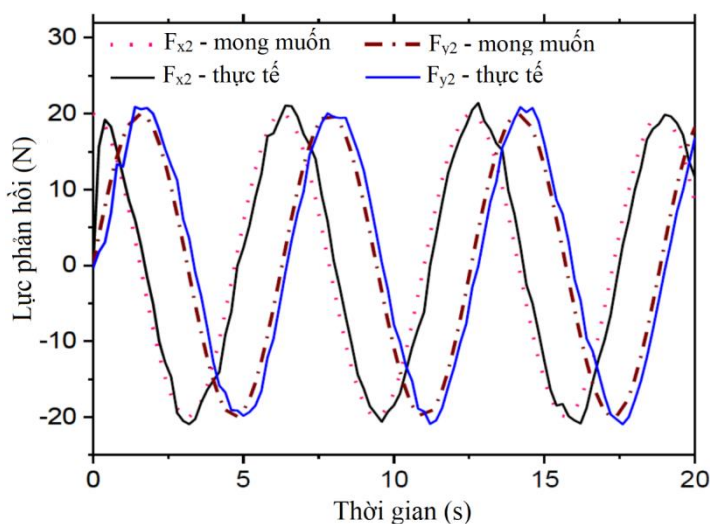


**Hình 4.24:** Kết quả của BMRA\_x, BMRA\_y (cần đứng yên).

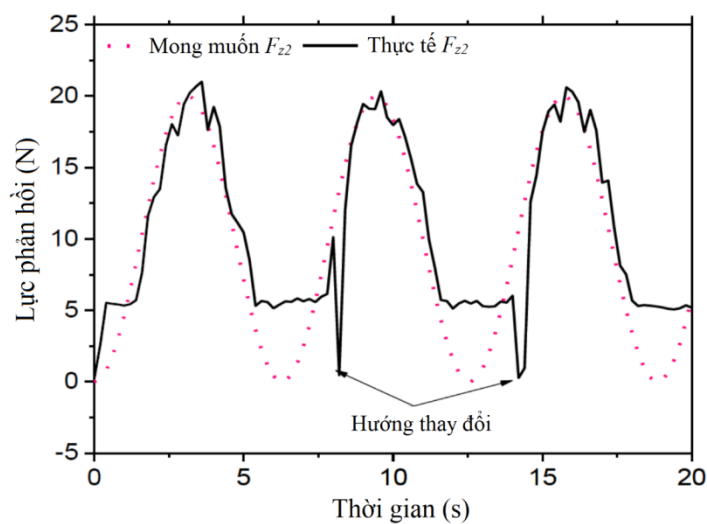
Bước thứ 2, từ vị trí ban đầu ( $x_p = 0$ ,  $y_p = 0$ ,  $z_p = 200$  mm), một chuyển động tùy ý của tay cầm được thực hiện và lực cố gắng từ người vận hành được đo bằng cảm biến lực 3D, kết quả được trình bày trong **Hình 4.25**. Với kết quả này thì ta cũng thấy độ trễ khoảng 30ms giữa giá trị đo được với giá trị mong muốn. So với kết quả trong trường hợp tay cầm được cố định, lực tiếp tuyến trong trường hợp này có sự thay đổi cao hơn một chút. Điều này rõ ràng là do chuyển động không ổn định của tay cầm. Đối với lực pháp tuyến, ta cũng thấy rằng hệ không thể phản xạ lực có độ lớn nhỏ hơn 5.3 N do lực ma sát ngoài trạng thái đã nói bên trên. Tại thời điểm người vận



hành thay đổi hướng chuyển động của tay cầm (từ hướng vào sang hướng ra và ngược lại), có một bước nhảy từ giá trị hiện tại của lực phản hồi về không, điều này là do sự thay đổi hướng của lực khi đo. Nói chung rằng lực phản hồi đo được trong trường hợp này không trơn tru như trong trường hợp lực tiếp tuyến chủ yếu đến từ chuyển động không ổn định của tay cầm do vận hành bằng tay.



a) Kết quả của BMRA\_x, BMRA\_y.



b) Kết quả của LMRB.

**Hình 4.25:** Kết quả thực nghiệm của lực phản hồi hệ 3D.

#### 4.7.2 Thiết kế bộ điều khiển vòng kín cho hệ phản hồi lực 3D.

Trên cơ sở mô hình thực tế của hệ phản hồi lực 3D đã được chế tạo thì tác giả tiếp tục xây dựng bộ điều khiển kín để điều khiển lực phản hồi mong muốn. Trong

điều kiện trạng thái tắt, khi động cơ quay với tốc độ không đổi 600 vòng/phút, mặc dù không có dòng điện nào cung cấp cho bất kỳ cuộn dây nào của BMRA, vẫn tồn tại một mô men đầu ra nhỏ được gọi là mô men đầu ra trạng thái tắt của BMRA. Điều này có thể được giải thích bởi mô men ma sát khác nhau của hai đầu vào. Cần phải bù về không trước khi xác định mô hình toán học của BMRA. Từ kết quả thực nghiệm với dòng điện đầu vào từng bước, mô men đầu ra được sử dụng để xác định mô hình toán học bằng phần mềm MATLAB [76] bằng cách sử dụng phương pháp nhận dạng hàm truyền. Với tín hiệu đầu vào ngẫu nhiên, dữ liệu đầu ra của cơ cấu được thu thập và sắp xếp theo chuỗi thời gian dùng để nhận dạng hệ thống. Thông qua bộ nguồn điều khiển thì dòng điện áp dụng cho BMRA từ - 2,5 đến 2,5 A và 0 - 2,5 A cho LMRB. Mô men truyền động của BMRA và lực của LMRB được đo bằng cảm biến lực cũng là dữ liệu đầu ra cho hệ thống dùng để xác định mô hình hàm truyền bằng cách sử dụng lệnh tfest với số pole bằng 2 và zero bằng 0. Dữ liệu đo được thực hiện trong vòng 10 s liên tục với thời gian lấy mẫu là 0,001 s. Các hệ số của hàm truyền được xấp xỉ để đạt độ chính xác cao nhất. Kết quả nhận dạng mô hình của BMRA đạt độ chính xác 92,7% và của LMRB là 87,3%.

Hàm truyền xấp xỉ cho BMRA được thể hiện như sau:

$$G = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2,105}{1/26590s^2 + 2452/26590s + 1} \quad (4-35)$$

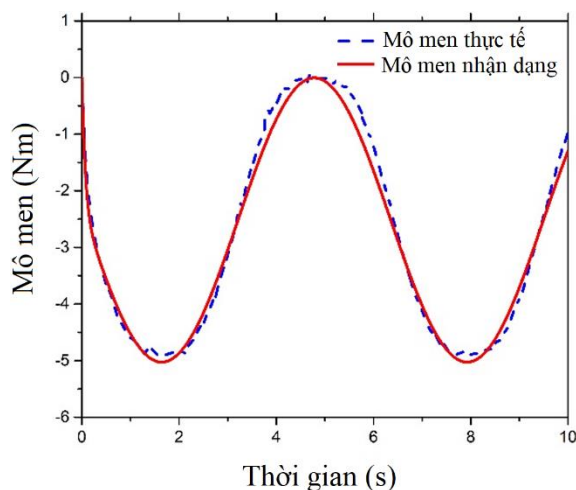
Mô hình viết lại như sau:

$$a\ddot{T} + b\dot{T} + T = f(I) = 2,105I \quad (4-36)$$

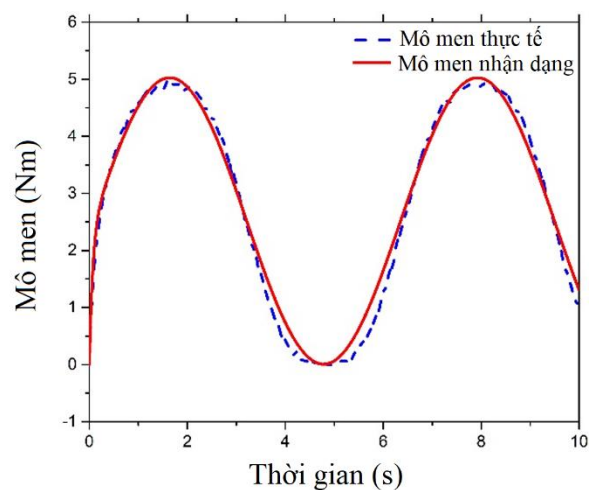
Với  $a, b$  tham số mô hình không đổi,  $I$  dòng điện đầu vào của BMRA,  $T$  là mô men cảm ứng của BMRA, với  $a = 1/26590$ ;  $b = 2452/26590$ .

Kết quả nhận dạng của BMRA và kết quả thực tế được thể hiện trong Hình 4.26. Có thể thấy rằng, kết quả nhận dạng của BMRA với tín hiệu đầu vào dưới dạng hàm sin là tương đối chính xác. Kết quả nhận dạng BMRA được so sánh với dữ liệu thực tế khi tín hiệu đầu vào là hàm nấc với các giá trị cường độ dòng điện 0,5 A; 0,75 A; 1 A; 1,25 A, 1,5 A, 1,75 A; 2 A; 2,5 A thể hiện trên Hình 4.27. Kết quả cho thấy sai số xác lập khi tín hiệu đầu vào là hàm nấc tương đối lớn. Đặc biệt là ở các mức dòng điện 0,5 A; 0,75 A, 1 A.



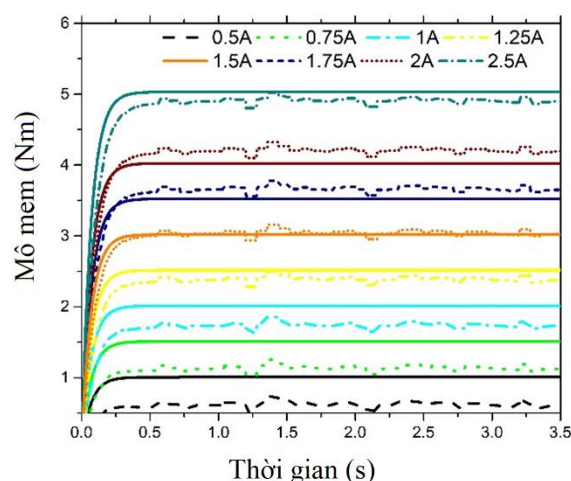


a) Đĩa 1 của BMRA.

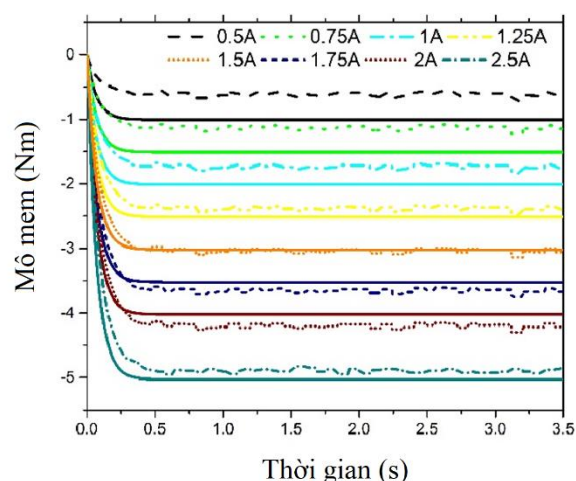


b) Đĩa 2 của BMRA.

**Hình 4.26:** Kết quả nhận dạng BMRA với đầu vào là hàm sin.



a) Dòng điện áp dụng cho đĩa 1.



b) Dòng điện áp dụng cho đĩa 2.

**Hình 4.27:** Đáp ứng bước của các BMRA.

Để giải quyết vấn đề trên, hàm xấp xỉ  $f(I)$  là hàm bậc 3 dựa trên mối quan hệ giữa  $T$  và  $I$  ở trạng thái xác lập được sử dụng. Hàm xấp xỉ  $f(I)$  được trình bày như sau:

$$f(I) = 0,01025 - 0,53308 * I - 1,63852 * I^2 + 0,42608 * I^3 \quad (4-37)$$

Đáp ứng bước và kết quả nhận dạng mới của hệ thống của BMRA được đưa ra trong **Hình 4.28**. Điều này có thể thấy rằng mô men truyền động đo được rất gần với mô men truyền động từ mô hình nhận dạng.

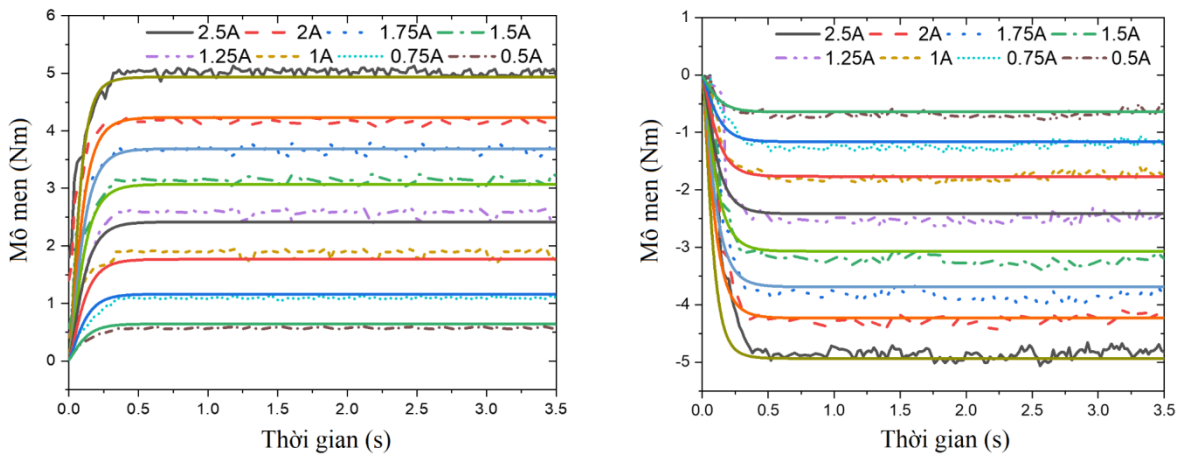
Tương tự cho đáp ứng bước của LMRB được đưa ra trong **Hình 4.29**. Mô hình của LMRB được áp dụng như sau:

$$c\ddot{F} + d\dot{F} + F = g(I) \tag{4-38}$$

Với  $F(N)$  là lực mong muốn,  $I(A)$  là dòng điện áp dụng,  $c, d$  tham số mô hình không đổi,  $g(I)$  là hàm số xấp xỉ được xác định theo giá trị trung bình của lực LMRB ở trạng thái xác lập và cường độ dòng điện áp dụng.

Kết quả nhận dạng như sau:  $c = 1/649,5, d = 60,69/649,5$

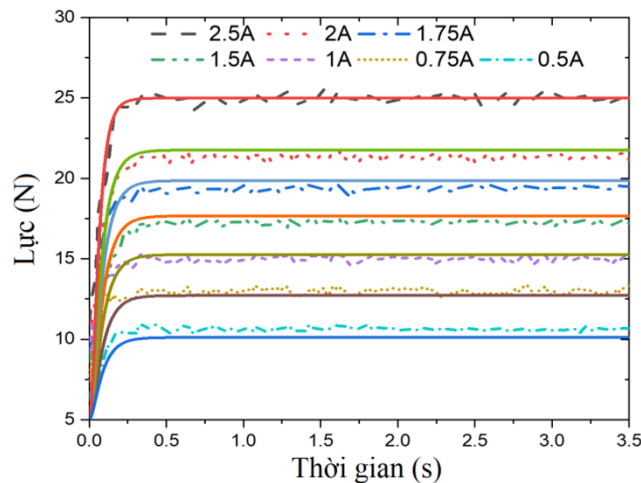
$$g(I) = 5,01899 + 9,75739 * I + 1,28363 * I^2 - 0,796 * I^3$$



a) Dòng điện áp dụng cho đĩa 1.

b) Dòng điện áp dụng cho đĩa 2.

**Hình 4.28:** Đáp ứng bước của các BMRA với hàm xấp xỉ bậc 3  $f(I)$ .



**Hình 4.29:** Đáp ứng bước của LMRB với hàm xấp xỉ bậc 3  $g(I)$ .

Như đã trình bày ở trên quan hệ giữa lực tác dụng cục bộ tại núm điều khiển với lực/mô men tác động (mô men đầu ra của BMRA và lực phanh của LMRB) tính theo

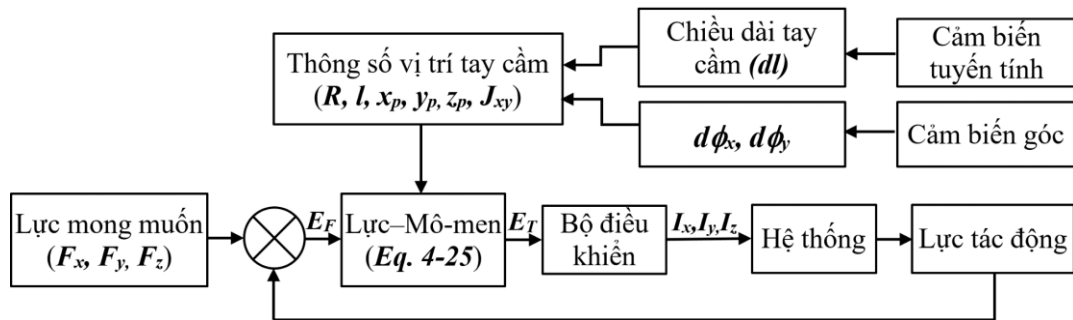
công thức (4-24). Cần lưu ý rằng lực phản hồi pháp tuyến luôn bằng lực tắt dần và tách khỏi lực tiếp tuyến.

Do đó phương trình (4-24) có thể viết như sau:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} = -[J^T R]_{22} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \end{bmatrix}; F_b = F_{z2} \quad (4-39)$$

Với  $-[J^T R]_{22}$  là ma trận con 2x2 của ma trận chính  $-[J^T R]$

Trên cơ sở các thông số của hệ thống phản hồi thì nhóm xây dựng bộ điều khiển vòng kín để phản ánh lực phản hồi mong muốn của người vận hành bởi **Hình 4.30**



**Hình 4.30:** Sơ đồ điều khiển vòng kín của lực mong muốn.

- Thiết kế bộ điều khiển PID cho lực phản hồi

Trong bộ điều khiển PID thì dòng điện được xác định như sau:

Đối với BMRA\_x

$$I_x(t) = k_{Px}e_x(t) + k_{Ix} \int e_x(t) + k_{Dx}\dot{e}_x(t) \quad (4-40)$$

Đối với BMRA\_y

$$I_y(t) = k_{Py}e_y(t) + k_{Iy} \int e_y(t) + k_{Dy}\dot{e}_y(t) \quad (4-41)$$

Đối với BMRA\_z

$$I_z(t) = k_{Pz}e_z(t) + k_{Iz} \int e_z(t) + k_{Dz}\dot{e}_z(t) \quad (4-42)$$

Trong đó:

$k_{Px}$ ,  $k_{Ix}$ , và  $k_{Dx}$  lần lượt là giá trị tỷ lệ, tích phân và đạo hàm,  $e_x$  là sai số giữa giá trị đầu vào và ra của BMRA\_x.

$k_{Py}$ ,  $k_{Iy}$ , và  $k_{Dy}$  lần lượt là giá trị tỷ lệ, tích phân và đạo hàm,  $e_y$  là sai số giữa giá trị đầu vào và ra của BMRA\_y

$k_{Pz}$ ,  $k_{Iz}$ , và  $k_{Dz}$  lần lượt là giá trị tỷ lệ, tích phân và đạo hàm,  $e_z$  là sai số giữa giá trị đầu vào và ra của LMRB

Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển, một trong những tiêu chuẩn thường được sử dụng là ITAE (Integral of Time-Weighted Absolute Error) là tích phân sai lệch theo thời gian được xác định bởi:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (4-43)$$

Trong đó  $t$  là thời gian mô phỏng,  $e(t)$  là sai lệch thời gian

SIMULINK là một công cụ tích hợp trong MATLAB cho phép mô hình hoá, mô phỏng, phân tích động học hệ thống. MATLAB optimization của MATLAB cung cấp các giải thuật tối ưu hoá để giải quyết các bài toán tối ưu ràng buộc và không ràng buộc. Trong luận án này, tác giả sử dụng công cụ tối ưu hoá với giải thuật có sẵn của MATLAB (fminsearch) để tìm ra các hệ số của bộ điều khiển khi mô phỏng hệ thống trên SIMULINK sao cho tiêu chuẩn sai lệch ITAE là nhỏ nhất. Từ các hệ số tìm được của bộ điều khiển dựa trên mô phỏng, các thông số thực tế của bộ điều khiển sẽ được điều chỉnh cho phù hợp. Các bước thực hiện tối ưu hoá thông số của bộ điều khiển được thực hiện như sau:

- Bước 1: mô hình hoá hệ thống joystick bao gồm bộ điều khiển trên SIMULINK.
- Bước 2: xây dựng tệp MATLAB (m-file) với hàm mục tiêu là tính toán tiêu chuẩn sai lệch ITAE
- Bước 3: sử dụng hàm “fminsearch” của MATLAB Optimization để tính toán các giá trị bộ điều khiển sao cho giá trị ITAE nhỏ nhất.

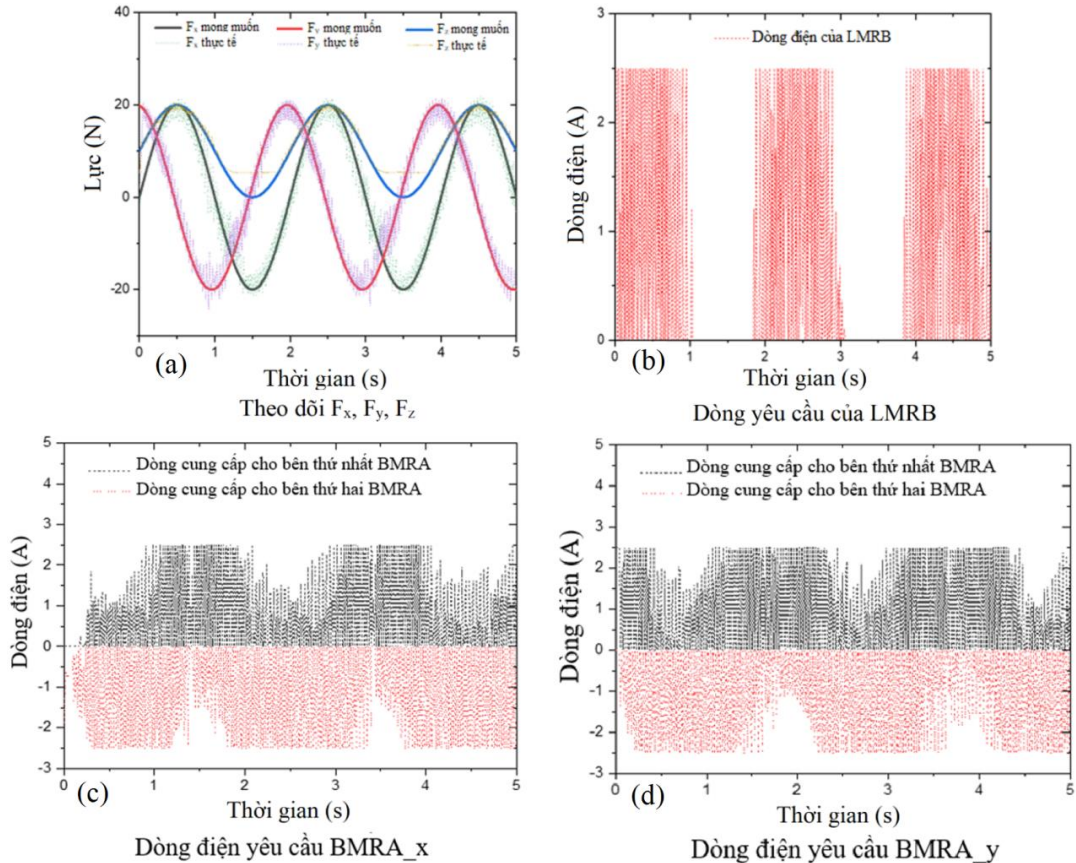
Từ các giá trị tối ưu của bộ điều khiển được thực hiện trên MATLAB SIMULINK sao cho tiêu chuẩn ITAE nhỏ nhất. Các giá trị thực tế được điều chỉnh như **Bảng 4.3**

**Bảng 4.3.** Thông số điều chỉnh của  $k_P$ ,  $k_I$ ,  $k_D$

BMRA_x	$k_{Px} = 10$	$k_{Ix} = 0$	$k_{Dx} = 8$
BMRA_y	$k_{Py} = 9$	$k_{Iy} = 0$	$k_{Dy} = 7$
LMRB	$k_{Pz} = 9$	$k_{Iz} = 0$	$k_{Dz} = 2$

Qua kết quả **Bảng 4.3** ta thấy thì khâu tích phân (khâu  $I$ ) không hưởng đáng kể đến kết quả nên trong thực tế chỉ là bộ điều khiển PD.

✚ Kết quả thực nghiệm: sai lệch của hệ thống sử dụng PID là 8%



**Hình 4.31:** Kết quả thực nghiệm phản hồi lực theo PID.

- Thiết kế bộ điều khiển SMC cho lực phản hồi.

Tổng quát ta có:  $a\ddot{T} + b\dot{T} + T = u(I)$

Đặt  $T = x_1; x_2 = \dot{x}_1 = \dot{T}$

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{4-44}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{u}{a} - \frac{x_1}{a} - \frac{bx_2}{a} + d \tag{4-45}$$

$[x_1 \ x_2]$  là vector trạng thái,  $u$  là điều khiển đầu vào.

$a, b$  là tham số xác định từ nhận dạng hệ thống ( $a = 1/26590, b = 2452/26590$ )

$d$ : bao gồm độ nhiễu và không chắc chắn của hệ thống,  $|d| \leq D$

$$\text{Mặt trượt được xác định bởi: } s = ce + \dot{e} \tag{4-46}$$

Trong đó  $e$  là sai số được xác định:  $e = x_d - x$

$x_d$ : giá trị mong muốn;  $x$ : giá trị đo được;  $c$ : hệ số độ dốc mặt trượt ( $c > 0$ )

Hàm điều khiển được định nghĩa như sau:

$$u = a \left[ k \text{sign}(s) + c\dot{e} + \dot{x}_{2d} + \frac{x_1}{a} + \frac{bx_2}{a} \right] \quad (4-47)$$

Tính ổn định của hệ thống sử dụng hàm Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} s^2$$

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(c\dot{e} + \ddot{e})$$

$$= s(c\dot{e} + (\dot{x}_{2d} - \dot{x}_2))$$

$$= s \left( c\dot{e} + \left( \dot{x}_{2d} - \left( \frac{a \left[ k \text{sign}(s) + c\dot{e} + \dot{x}_{2d} + \frac{x_1}{a} + \frac{bx_2}{a} \right]}{a} - \frac{x_1}{a} - \frac{bx_2}{a} + d \right) \right) \right)$$

$$= s \left( c\dot{e} + \left( \left[ -k \text{sign}(s) - c\dot{e} - \frac{x_1}{a} - \frac{bx_2}{a} \right] + \frac{x_1}{a} + \frac{bx_2}{a} - d \right) \right)$$

$$= s(-k \text{sign}(s) - d) = -k|s| - sd \quad (4-48)$$

Khi  $k \geq D$  thì  $\dot{V} = -k|s| - sd \leq 0$  hệ thống ổn định.

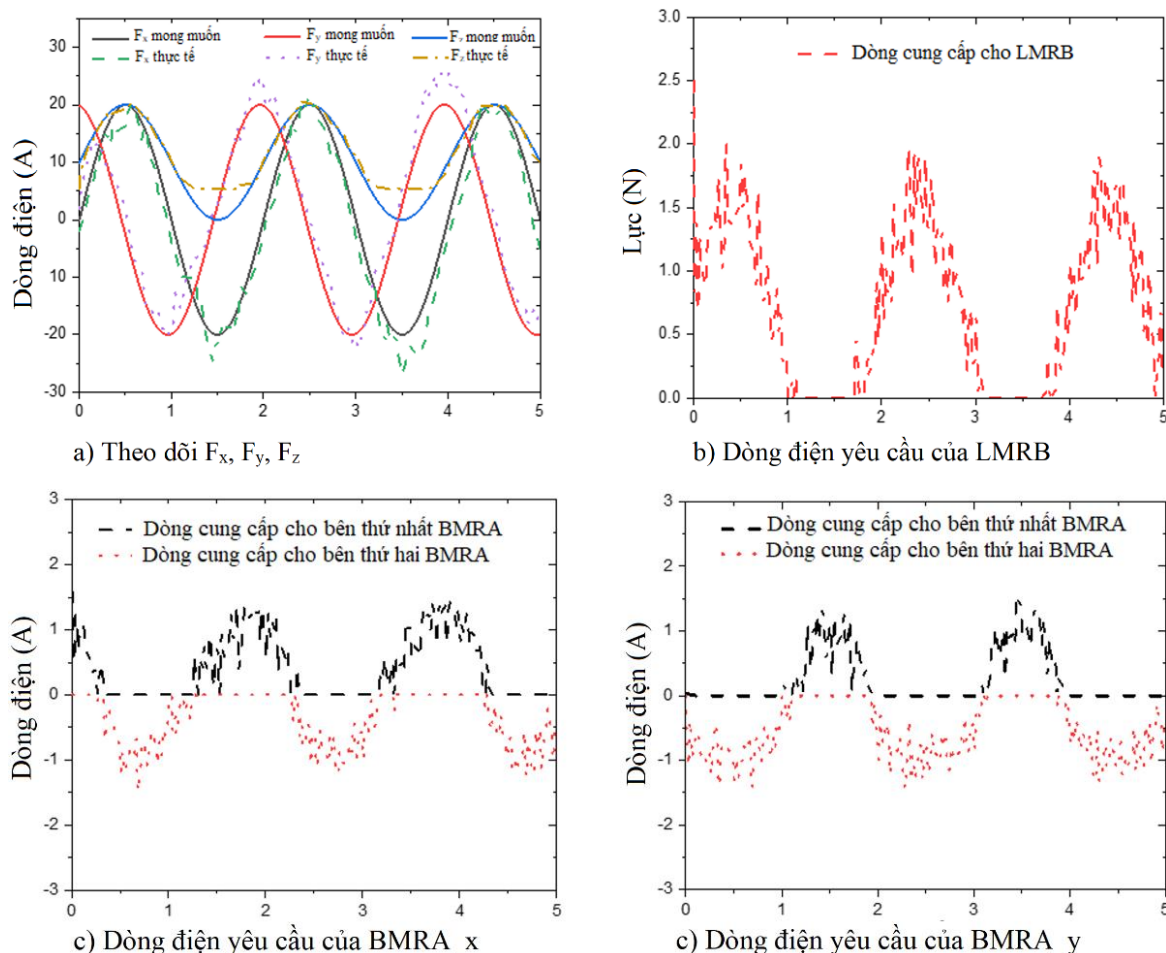
Từ các giá trị tối ưu của bộ điều khiển được thực hiện trên MATLAB SIMULINK sao cho tiêu chuẩn ITAE nhỏ nhất. Các giá trị thực tế được điều chỉnh như **Bảng 4.4**

**Bảng 4.4.** Thông số điều chỉnh của  $c, k$ .

BMRA_x	$c = 15$	$k = 14$
BMRA_y	$c = 14$	$k = 197$
LMRB	$c = 17$	$k = 10$

✚ Kết quả thực nghiệm: sai lệch của hệ thống sử dụng SMC là 4%.





**Hình 4.32:** Kết quả phản hồi lực theo SMC.

Theo **Hình 4.31** và **Hình 4.32** thì kết quả điều khiển lực phản hồi theo bộ điều khiển PID và SMC ở tần số 3 Hz của hàm sin tương ứng. Đối với bộ điều khiển SMC cho kết quả lực mong muốn tốt hơn với sai số nhỏ bằng 4%, nhỏ hơn bộ PID 8%. Lực theo dõi của PID dao động liên tục xung quanh lực mong muốn gây ra bởi sự liên tục của dòng điện của mỗi bộ truyền động. Điều này dễ hiểu là trong hệ thống có nhiễu và cơ cấu không ổn định, PID không thể giải quyết tất cả các nhược điểm này. Tuy nhiên, dòng điện đầu vào của bộ điều khiển SMC mượt mà hơn bộ điều khiển PID. Bên cạnh đó, điều khiển lực của cơ cấu truyền động bằng SMC theo dõi tốt với lực mong muốn. Người ta cũng giải thích rằng SMC có thể giảm nhiễu, sự không chắc chắn và sự thay đổi của hệ thống. Trong cả hai bộ điều khiển, có thể thấy rằng lực thực tế  $F_z$  không thể theo dõi lực yêu cầu với lực yêu cầu nhỏ hơn 5,3 N, gây ra bởi lực ngoài trạng thái của LMRB. Hệ thống thí nghiệm phản hồi lực trên có thể được

sử dụng cho các nghiên cứu tiếp theo về hệ thống phản hồi lực đặc biệt là trong hệ thống chủ tớ trong điều khiển từ xa, cũng như ứng dụng trong phẫu thuật từ xa trong y tế sau này.

Tóm lại trong phần nghiên cứu ở Chương 4 có một số kết quả đạt được:

- Thiết kế tối ưu về thông số hình học của BMRA và LMRB thỏa mãn các yêu cầu về mô men, lực đầu ra;
- Một hệ thống joystick 3D phản hồi lực với cơ chế gimbal kết hợp BMRA và LMRB đã được chế tạo và thực nghiệm;
- Các kết quả thử nghiệm về đặc tính hiệu suất của BMRA và LMRB thỏa mãn với kết quả mô phỏng;
- Thiết kế các bộ điều khiển PID và SMC áp dụng cho cần điều khiển 3D với kết quả cho thấy SMC phù hợp hơn PID trong việc kiểm soát lực của hệ thống phản hồi lực.
- Lực tiếp tuyến và tuyến tính mong muốn đáp ứng tốt theo yêu cầu;
- Độ trễ của hệ thống khoảng 30 ms.
- Hạn chế của hệ này là LMRB có lực ngoài trạng thái lớn nên ảnh hưởng tới khả năng phản hồi lực của hệ thống.

✚ Kết quả nghiên cứu công bố bởi:

- Diep B. T., Nguyen Q. H., Kim J. H., Choi S. B. Performance evaluation of a 3D haptic joystick featuring two bidirectional MR actuators and a linear MRB, *Smart Materials and Structures*, **30** 017003, 01/12/2020.
- Diep B. Tri., Le D. Hiep, Vu V. Bo., Nguyen T. Nien., Duc -Dai Mai., Nguyen Q. Hung. A sliding mode controller for force control of magnetorheological haptic joysticks, *Modern Mechanics and Applications*, LNME, pp. 1–13, 2022, [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6\\_83](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6_83).



---

## Chương 5

# PHÁT TRIỂN TAY MÁY 3D PHẢN HỒI LỰC

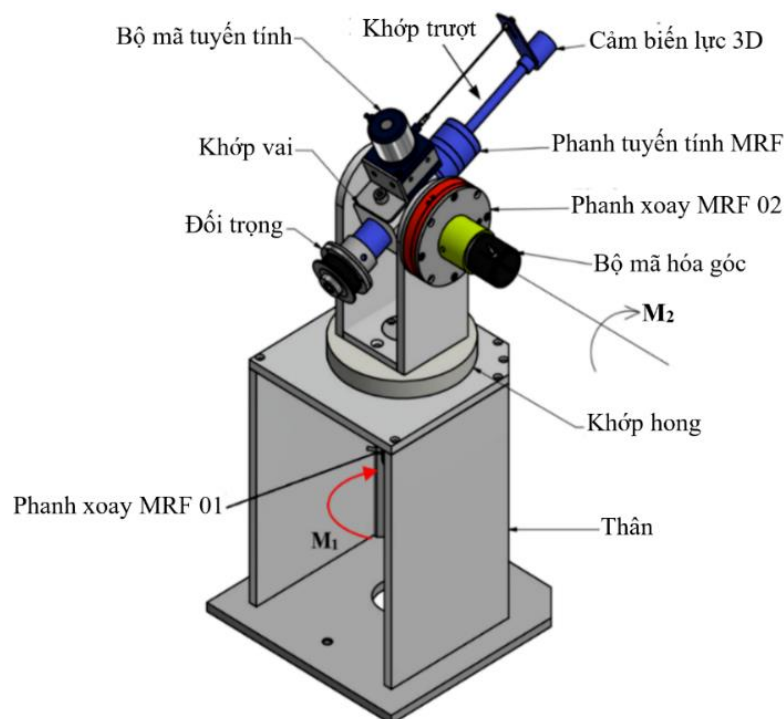
## SỬ DỤNG MRF

Hiện nay ngành công nghiệp đã phát triển rất mạnh về mọi mặt nhưng vẫn có một số trường hợp phải làm việc trong môi trường khắc nghiệt, độc hại là điều không thể tránh khỏi như trong những lĩnh vực hạt nhân, hóa chất độc hại, phòng cháy chữa cháy, rà phá bom mìn, phẫu thuật y khoa [60]. Do đó để đảm bảo an toàn cho những người phải làm việc trong các môi trường trên thì một trong những giải pháp được áp dụng phổ biến nhất hiện nay là sử dụng Robot điều khiển từ xa đó là hệ thống robot chủ-tớ (Master-Slave) [31, 32]. Với công nghệ hiện đại như là kỹ thuật camera đã được sử dụng để quan sát môi trường làm việc, tuy vậy việc thiếu thông tin tương tác trực tiếp của hệ thống như lực, mô men, chuyển vị... đã ảnh hưởng không nhỏ đến khả năng vận hành, cũng như độ chính xác khi người vận hành điều khiển hệ thống.

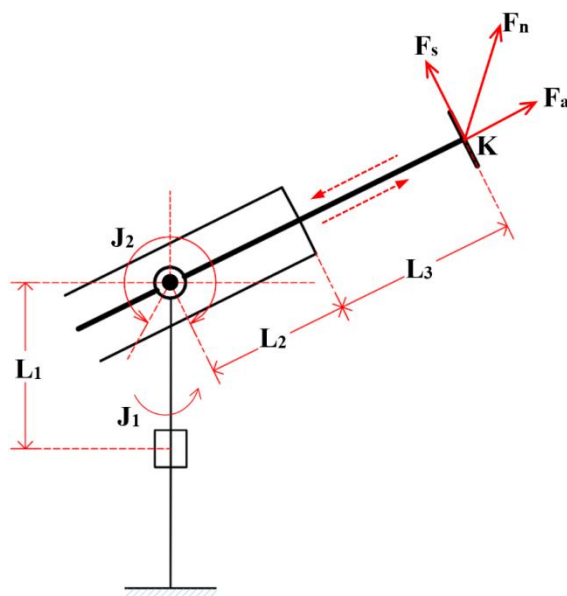
### 5.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.

Từ nhu cầu trên nhóm nghiên cứu đã phát triển một hệ thống phản hồi lực 3D được đề xuất như **Hình 5.1**. Hệ thống này mô tả lại cơ chế cánh tay người với các khớp thắt lưng (khớp 01), khớp vai (khớp 02) và khớp trượt cánh tay (khớp 03). Trên trục của khớp 01 bố trí một phanh quay dùng MRF (MRB\_01) dùng để phản xạ lực tiếp tuyến ngang mong muốn. Vỏ của MRB\_01 được cố định vào thân của cánh tay, trong khi trục của nó được lắp vào khớp xoay của khớp 02. Ở đầu còn lại của trục MRB\_01 được nối với cảm biến góc để xác định vị trí góc của tay máy. Đối với khớp 02 thì trên trục lắp MRB\_02 để phản ánh lực tiếp tuyến với độ cao mong muốn. Vỏ MRB\_02 được cố định với bộ phận liên kết thân MRB\_02, trong khi trục MRB\_02 được kết nối với trục của liên kết khớp 02. Đầu kia của trục MRB\_02 được kết nối với cảm biến góc để đo độ cao tay máy. Vỏ ngoài của LMRB được cố định với liên kết khớp 02, trong khi trục của nó có thể di chuyển lên xuống như một cánh tay trượt. Ở đầu trục LMRB bố trí cảm biến lực 3D, để đo lực tác dụng lên người vận hành,

cuối khớp 02 bố trí một đối trọng để cân bằng cho khớp 02 trong quá trình vận hành tay máy. Để xác định vị trí theo phương trượt của LMRB thì bố trí một bộ cảm biến tuyến tính. Đồng thời cấu tạo và sơ đồ động học của tay máy phản hồi lực được thể hiện như **Hình 5.1**, **Hình 5.2**

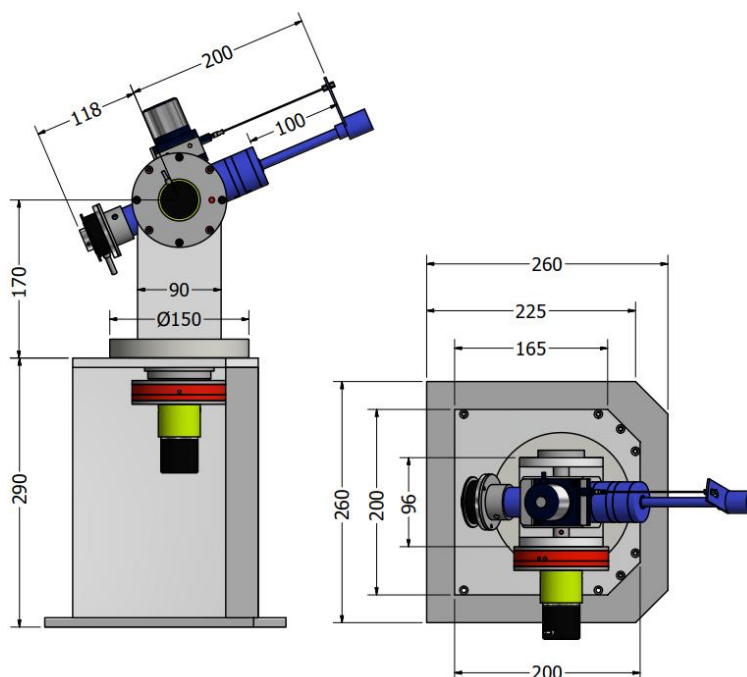


**Hình 5.1:** Cấu tạo tay máy phản hồi lực 3D.



**Hình 5.2:** Sơ đồ động học tay máy.

Từ các kích thước và không gian làm việc cần thiết, phù hợp trong sản xuất của các hệ thống phản hồi thì tác giả đưa ra các kích thước cơ bản của hệ thống phản hồi lực như **Hình 5.3**. Chú ý rằng lực phản xạ tối đa theo mỗi hướng (lực tiếp tuyến ngang, lực tiếp tuyến độ cao, lực tiếp cận) được thiết lập là 40 N có xét tới khả năng phù hợp với người vận hành. Từ các lực cần thiết này chúng tôi có thể xác định mô men xoắn yêu cầu tối đa của MRB là 8 Nm ( $T = 200 \times 40 \text{ Nmm}$ ), trong khi lực yêu cầu tối đa của phanh tuyến tính là 40 N.



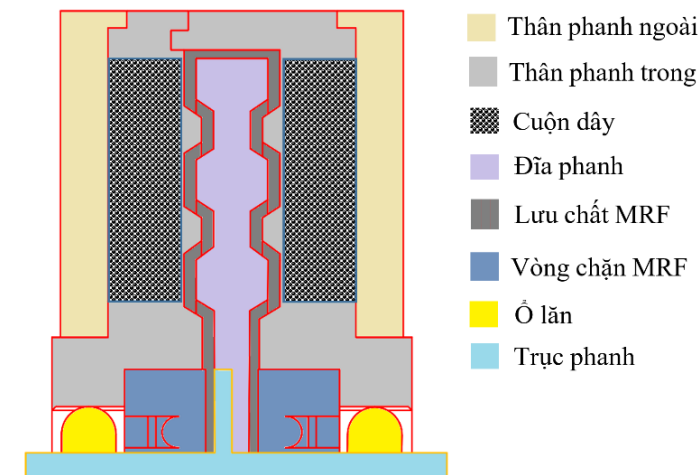
**Hình 5.3:** Kích thước tổng quát tay máy 3D.

## 5.2 Thiết kế cơ cấu tác động cho tay máy phản hồi lực 3D.

### 5.2.1 Thiết kế phanh biên dạng răng (MRB).

#### 5.2.1.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.

Một trong các yếu tố quan trọng của hệ thống tay máy phản hồi lực là yếu tố khối lượng, cho nên việc giảm khối lượng trong tay máy là cần thiết. Vì vậy nhóm nghiên cứu đề xuất một kết cấu phanh mới có đĩa phanh là hình răng như **Hình 5.4**. Mục đích tăng bề mặt tiếp xúc giữa MRB với đĩa phanh và vỏ phanh từ đó sẽ cho mô men lớn và khối lượng giảm đáng kể.

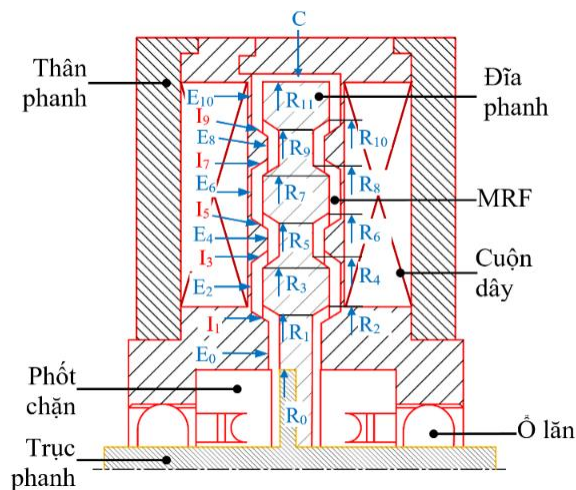


**Hình 5.4:** Cấu tạo MRB rãnh nghiêng.

Nguyên lý hoạt động của phanh: đĩa phanh làm bằng thép từ tính C54 được cố định vào mặt bích của trục làm bằng thép không từ tính được tựa trên hai ổ lăn. Đĩa phanh được đặt bên trong thân phanh, thân phanh được làm bằng thép từ tính. Khoảng trống giữa đĩa và thân vỏ được lấp đầy MRF. Hai cuộn dây không từ tính được đặt ở hai bên của vỏ phanh nhằm tạo ra từ trường chạy ngang qua khe MRF khi cấp dòng điện cho các cuộn dây. Cần lưu ý rằng, từ trường hai bên của phanh phải là hai dòng ngược chiều được áp dụng cho các cuộn dây, phốt chặn có chức năng không cho MRF rò rỉ ra bên ngoài.

### 5.2.1.2 Tính toán mô men MRB.

Theo cách tính mô men trên rãnh nghiêng đã trình bày ở Chương 2 thì với MRB đã đề xuất như **Hình 5.5** thì việc tính mô men sinh ra của phanh cũng tương tự.



**Hình 5.5:** Sơ đồ tính mô men MRB.

Từ nguyên lý cấu tạo của MRB thì cách tính mô men đầu ra của phanh được chia ra hai dạng chính đó là tính mô men trên thành đứng (các vị trí  $E_i$  ứng với  $i = 0, 2, 4, 6, 8, 10$ ) tương ứng với các bán kính, thành nghiêng (các vị trí  $I_j$  ứng với  $j = 1, 3, 5, 7, 9$ ) biểu diễn như **Hình 5.5**. Mô men đầu ra của MRB được tính gần đúng:

$$T_b = 2(T_{E0} + T_{E2} + T_{E4} + T_{E6} + T_{E8} + T_{E10}) + 2(T_{I1} + T_{I3} + T_{I5} + T_{I7} + T_{I9}) + T_c + 2T_s \quad (5-1)$$

Trong đó:

- $T_{Ei}$  là mô men ma sát do MRF gây ra trong khe thẳng  $Ei$ ;
- $T_{Ii}$  là mô men ma sát do MRF gây ra trong khe nghiêng  $Ii$ ;
- $T_c$  là mô men ma sát do MRF gây ra trong khe tròn C;
- $T_s$  là ma sát do phốt trên các trục gây ra.

Khi đó các thành phần mô men  $T_{Ei}$ ,  $T_{Ii}$  và  $T_c$  của phanh được xác định theo (2-22):

$$T_{Ei} = \frac{\pi\mu_{Ei}R_{i+1}^4}{2d} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{2\pi\tau_{yEi}}{3} (R_{i+1}^3 - R_i^3), \quad (i = 0, 2, 4, 6, 8, 10) \quad (5-2)$$

$$T_{Ii} = 2\pi \left( R_i^2 l + R_i l^2 \sin\phi + \frac{1}{3} l^3 \sin^2\phi \right) \tau_{yIi} + \frac{1}{2} \pi \mu_{Ii} \frac{\pi}{d} (4R_i^3 + 6R_i^2 l \sin\phi + 4R_i l^2 \sin^2\phi + l^3 \sin^3\phi); \quad (1, 3, 5, 7, 9) \quad (5-3)$$

$$T_c = 2\pi R_{11}^2 (b + 2h) (\tau_{yc} + \mu_c \frac{\Omega R_{11}}{d}) \quad (5-4)$$

Với  $R_i$  là bán kính của điểm thứ  $i$  trong cấu hình đĩa,  $l$  là chiều dài của khe nghiêng,  $\phi$  là góc nghiêng,  $h$  là chiều cao của răng.

- $\mu_{Ei}$  và  $\tau_{Ei}$ : độ nhớt và ứng suất chảy dẻo của MRF tại  $Ei$ ;
- $\mu_{Ii}$  và  $\tau_{Ii}$ : độ nhớt và ứng suất chảy dẻo của MRF tại  $Ii$ ;
- $\mu_c, \tau_c$ : độ nhớt sau chảy dẻo, ứng suất chảy dẻo của MRF tại C.

Trong nghiên cứu này, ứng suất và độ nhớt của MRF cũng là hàm của mật độ từ thông được áp dụng trên khe MRF được xấp xỉ bằng [5]:

$$Y = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty) (2e^{-B\alpha_{SY}} - e^{-2B\alpha_{SY}}) \quad (5-5)$$

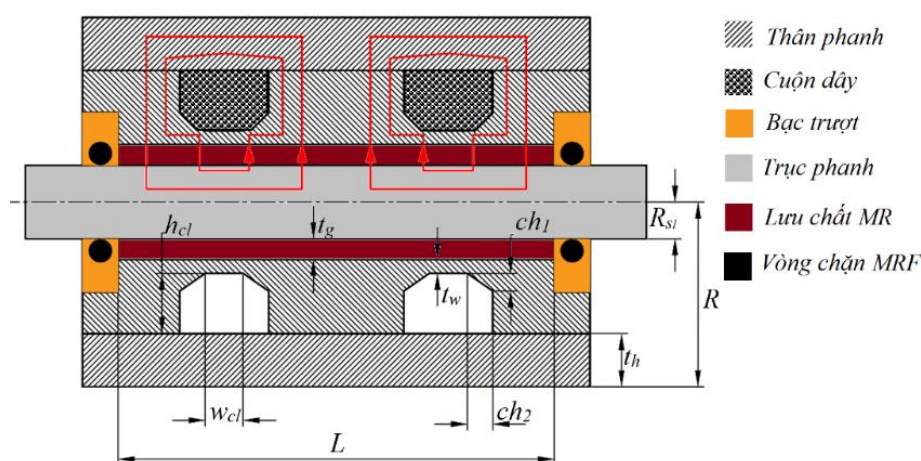
Mô men ma sát trên trục do phốt được tính gần đúng như sau (2-22) :

$$T_s = 0.65(2R_s)^2 \omega^{1/3} \quad (5-6)$$

Với  $R_s$  là bán kính trục MRB và  $\omega$  là vận tốc góc của trục MRB.

### 5.2.2 Thiết kế phanh tuyến tính.

Đối với hệ thống tay máy như trên yêu cầu thiết kế phanh tuyến thì trong chương 4 đã trình bày và chế tạo thực nghiệm một mẫu kết quả khá tốt tuy lực trạng thái ban đầu còn tương đối lớn. Do đó nên trong phần này tác giả chọn lại kết cấu của phanh theo **Hình 5.6** và chỉ đi tính toán tối ưu với lực hãm mới  $F = 40$  N.



**Hình 5.6:** Kết cấu LMRB [79]

Lực hãm của LMRB được tính theo công thức (2-23):

$$F_{sd} = \frac{2\pi \cdot \mu \cdot R_{sl} \cdot L \cdot u}{t_g} + 2(\pi R_{sl} L \tau_y + F_{or})$$

### 5.3. Tối ưu hóa phanh cho tay máy 3D.

#### 5.3.1 Tối ưu hoá MRB.

Đối với MRB thì hai yếu tố mô men và khối lượng là hai mục tiêu thường trái ngược nhau nhưng lại rất quan trọng trong thiết kế tính toán phanh MRF, đặc biệt là đối với các hệ thống phản hồi lực, khối lượng phanh càng nhỏ càng tốt thì kích thước nhỏ gọn và chi phí thấp. Tuy nhiên, kích thước nhỏ có thể làm giảm mô men xoắn phanh. Vì vậy, mục tiêu thiết kế tối ưu của MRB là giảm tối đa khối lượng phanh trong khi mô men phanh của nó bị ràng buộc lớn hơn hoặc bằng giá trị yêu cầu. Vấn đề thiết kế tối ưu của phanh được nêu ra như sau:

Khối lượng nhỏ nhất của phanh:

$$m_b = V_d \rho_d + V_h \rho_h + V_s \rho_s + V_{MR} \rho_{MR} + V_c \rho_c \quad (5-7)$$

Với điều kiện ban đầu:

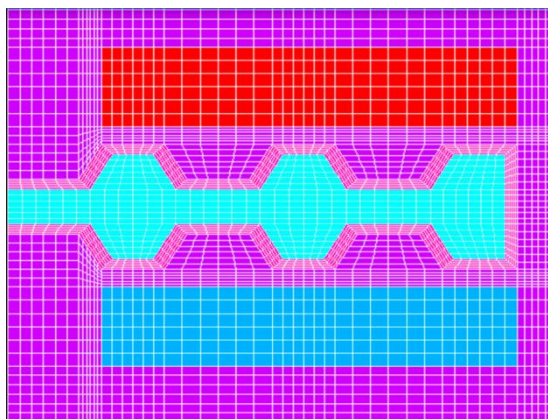
- Ràng buộc mô men phanh:  $T_b \geq T_{br}$

- Giới hạn biến thiết kế:  $x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$ , ( $i = 1, 2 \dots n$ )

Trong đó:

- $V_d, V_h, V_s, V_{MR}$  và  $V_c$  tương ứng là thể tích của đĩa, thân vỏ, trục, MRF và cuộn dây của phanh;
- $\rho_d, \rho_h, \rho_s, \rho_{MR}$  và  $\rho_c$  lần lượt là khối lượng riêng của đĩa, vỏ, trục, MRF và cuộn dây;
- $x_i^L$  và  $x_i^U$  là giới hạn dưới và trên của biến thiết kế hình học tương ứng  $x_i$  của phanh MRF;
- $n$  là số lượng biến thiết kế;
- $T_{br}$  là mô men xoắn cần thiết của phanh.

Mật độ từ thông trên khe hở MRF được hiển thị trong **Hình 5.7**



**Hình 5.7:** Mô hình PTHH phân tích mạch từ MRB.

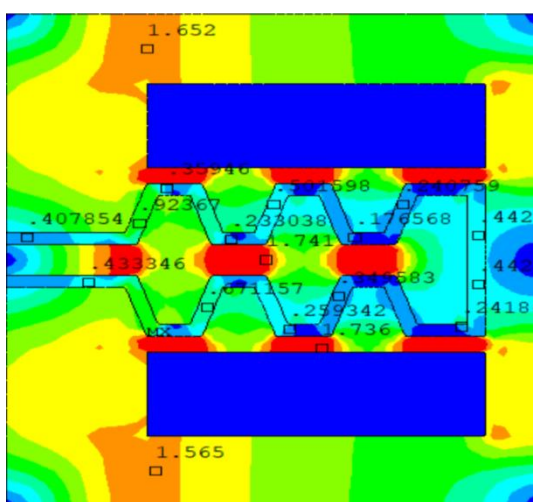
Phương pháp tối ưu cho phanh MR được sử dụng dựa trên phương pháp tối ưu bậc nhất sử dụng First Order tích hợp trong công cụ tối ưu hóa của ANSYS như đã trình bày ở trên. Trong bài toán thiết kế tối ưu, các tham số kích thước quan trọng của MRB như là chiều cao, chiều rộng của cuộn dây ( $h_c, w_c$ ), bán kính ngoài đĩa  $R_o$ , bán kính răng trong  $R_I$ , kích thước hình học của răng (chiều cao đỉnh, bề dày đỉnh, bề dày đáy), bề dày đĩa  $t_d$ , bề dày vỏ ngoài và bề dày vỏ bên được chọn làm biến thiết kế.

Tương tự như các phanh khác khi tối ưu hóa thì khoảng cách khe MRF ( $t_w$ ) không được xem là biến thiết kế, được xác định theo kinh nghiệm bằng 0,6 mm, độ dày thành mỏng của vỏ được lấy bằng 1mm và kích thước dây đồng có đường kính 0,511 mm, dòng điện áp dụng tối đa là khoảng  $I = 3$  A. Tuy nhiên, trong quá trình tối

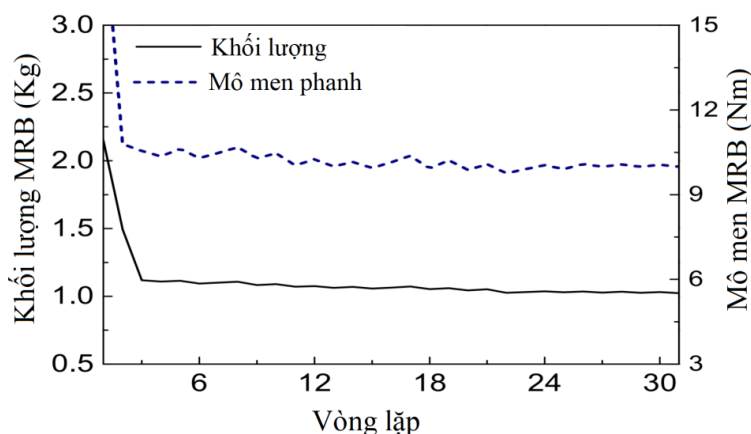


ưu hóa dòng điện 2,5 A được đưa vào cuộn dây vì có xem xét tới các điều kiện làm việc an toàn. Cũng cần lưu ý rằng tỷ lệ lấp đầy của cuộn dây được lấy 70%, trong khi tổn thất từ tính được giả định là 10% dựa trên kinh nghiệm thực nghiệm, mô men giới hạn là 10 Nm nhưng yêu cầu chỉ 8 Nm, tốc độ hội tụ được lấy 0,1%

Từ kết quả tối ưu ta thấy với **Hình 5.9** hội tụ xảy ra sau vòng lặp thứ 30, tại thời điểm này khối lượng của phanh bằng 1,03 kg, khối lượng phanh giảm đáng kể so với phanh có bề mặt phẳng đã nghiên cứu như trên. Đồng thời phân bố mật độ từ của MRB rất đồng đều được thể hiện trong **Hình 5.8**. Ở mức tối ưu, giá trị của các biến thiết kế và hiệu suất của phanh được thể hiện trong **Bảng 5.1**. Cần lưu ý trong **Bảng 5.1** rằng độ dày của đĩa đạt đến giới hạn thấp hơn ở mức tối ưu.



**Hình 5.8:** Phân bố mật độ từ thông của MRB.



**Hình 5.9:** Khối lượng và mô men của MRB.

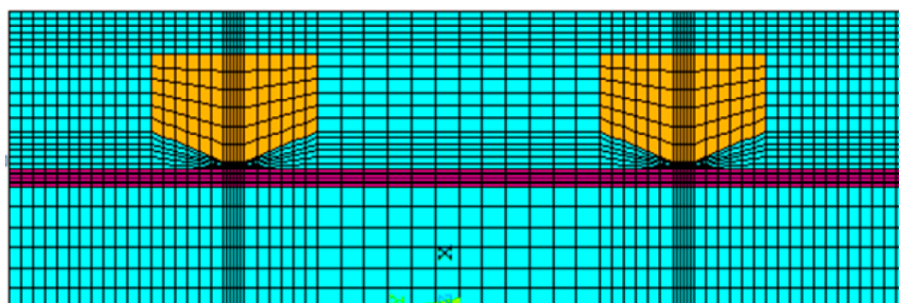


**Bảng 5.1.** Kết quả tối ưu của MRB.

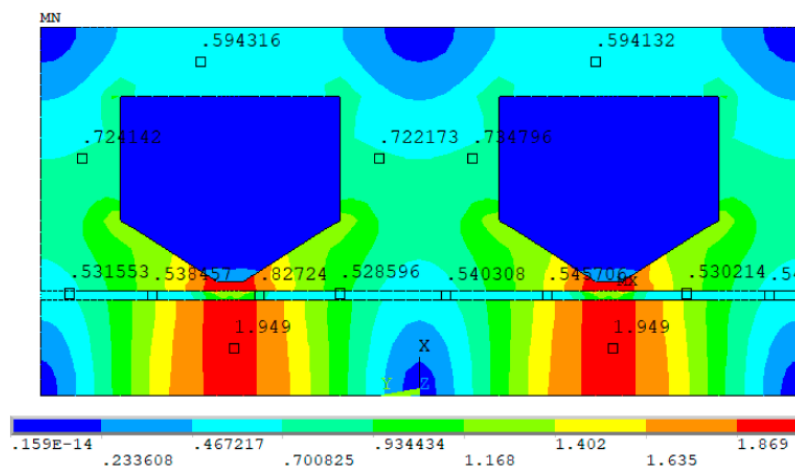
Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_c = 5,52; h_c = 15,8; R = 34,5; L = 35,8$	$T_{bmax} = 10 \text{ Nm}; m = 1,03 \text{ kg}$
$t_h = 4,6; t_w = 1,0; R_i = 10; t_d = 2,0; R_d = 31,2$	$T_{tinh} = 0,1 \text{ Nm}$
$R_s = 6,0; h = 2,6; t_{w1} = 3,2; t_{w2} = 4,6$	$P_w = 37 \text{ W}; R_c = 2,9 \Omega$

**5.3.2 Tối ưu hoá LMRB.**

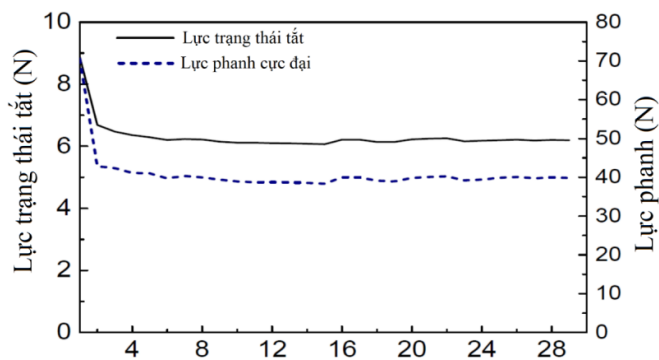
Trong đó một số thông số tính toán cần thay đổi cho phù hợp đó là  $t_g = 0,8 \text{ mm}$ , thành mỏng của vỏ phanh  $t_w = 0,5 \text{ mm}$  còn tất cả thông số hình học chủ yếu của phanh ( $L, h_{cb}, w_{cb}, ch_1, ch_2, R_{sl}, R, t_{hl} \dots$ ) đều được chọn làm biến thiết trong quá trình tối ưu. Tương tự như các bước thiết kế tối ưu đã được trình bày ở các phần trên tác giả cũng dựa vào phương pháp phân tích phần tử hữu hạn. Mô hình phần tử hữu hạn và phân bố từ thông của LMRB được thể hiện ở **Hình 5.10**, **Hình 5.11** và kết quả tối ưu với yêu cầu lực hãm lớn nhất là 40 N đạt được thể hiện **Hình 5.12**.



**Hình 5.10:** Mô hình PTHH phân tích mạch từ LMRB.



**Hình 5.11:** Phân bố mật độ từ thông của LMRB.



**Hình 5.12:** Lực hãm của LMRB.

Từ **Hình 5.12** ta có thể thấy rằng sau 29 vòng lặp thì lực ngoài trạng thái ở mức 6,2 N. Lực phanh lớn nhất là 40 N như yêu cầu. Ở thời điểm tối ưu thì các giá trị của biến thiết kế và hiệu suất của phanh được tổng hợp trong **Bảng 5.2**.

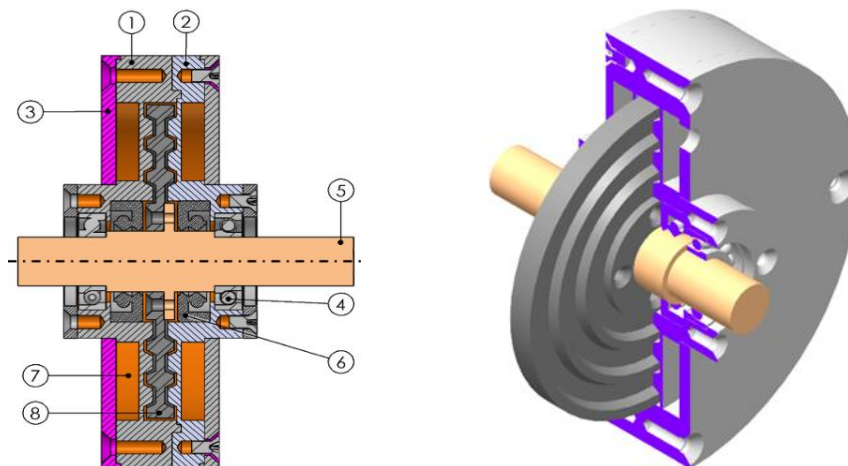
**Bảng 5.2.** Kết quả tối ưu LMRB.

Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_{cl} = 1,5; h_{cl} = 11,3; ch_1 = 3,7; ch_2 = 5,0$	$F_{max} = 40 \text{ N}; m = 0,46 \text{ kg}$
$R = 21,8; L = 39,2; t_w = 0,5; R_{sl} = 5,0; t_g = 0,6$	$F_t = 6,0 \text{ N}; P_w = 11,5 \text{ W}; R_c = 2,5 \Omega$

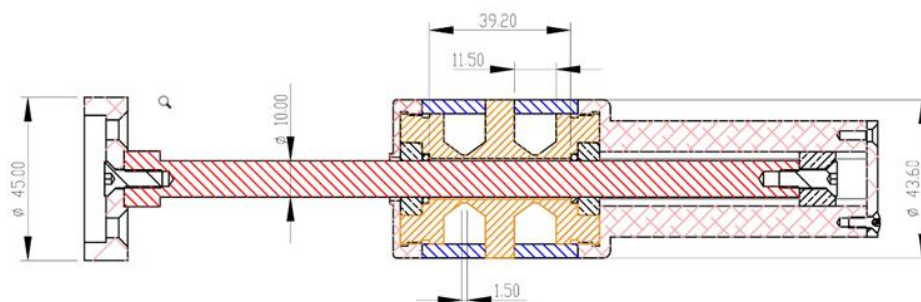
### 5.4 Thiết kế, chế tạo hệ thống phản hồi lực 3D.

#### 5.4.1 Thiết kế MRB, LMRB.

Sau khi có các thông số hình học tối ưu của MRB, LMRB thì tiến hành thiết kế hoàn thiện mô hình CAD được thể hiện bởi **Hình 5.13**, **Hình 5.14**. Với MRB gồm: thân vỏ (1, 2); mặt bích (3); ổ lăn (4); trục phanh (5); phớt chắn MRF (6); cuộn dây (7); đĩa phanh (8);



**Hình 5.13:** Mô hình CAD của MRB.



**Hình 5.14:** Mô hình CAD của LMRB.

#### 5.4.2 Hoàn thiện mô hình tay máy.

Chú ý rằng số vòng thực cuộn dây trong MRB là 230 (vòng) còn theo tính toán là 233 (vòng), trong khi đó của LMRB là 380 (vòng) cho mỗi cuộn dây còn theo tính toán là 386 (vòng). Các chi tiết của MRB, LMRB được thể hiện bởi **Hình 5.15**

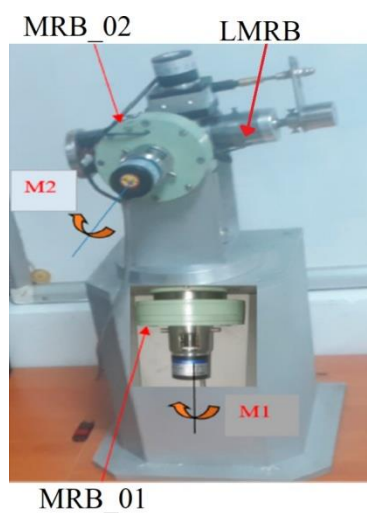


a) Cụm chi tiết MRB.

b) Cụm chi tiết LMRB.

**Hình 5.15:** Chi tiết chế tạo của MRB và LMRB.

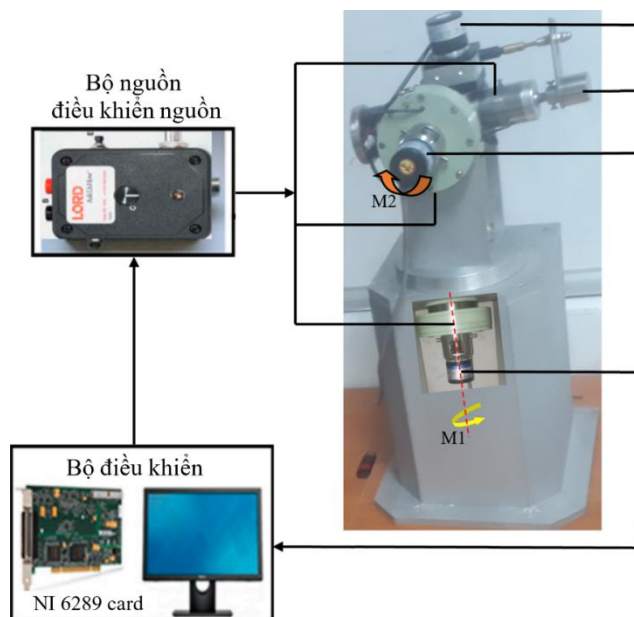
Sau đó chế tạo các bộ phận trên rồi tiến hành lắp ráp hoàn thiện mô hình như nguyên mẫu **Hình 5.16**



**Hình 5.16:** Chi tiết chế tạo của MRB và LMRB.

### 5.5 Kết quả mô men của MRB và lực LMRB.

Sau khi chế tạo hoàn chỉnh mô hình phản hồi lực 3D (**Hình 5.16**) thì tiến hành hoàn thiện hệ thống thực nghiệm như **Hình 5.17**.

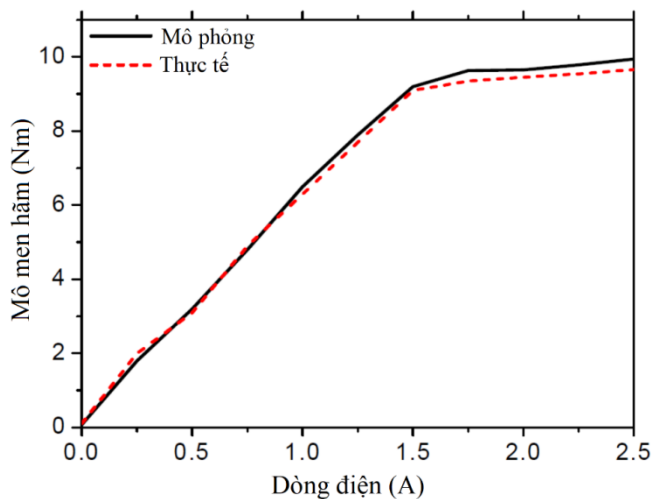


**Hình 5.17:** Mô hình thực nghiệm tay máy phản hồi lực 3D.

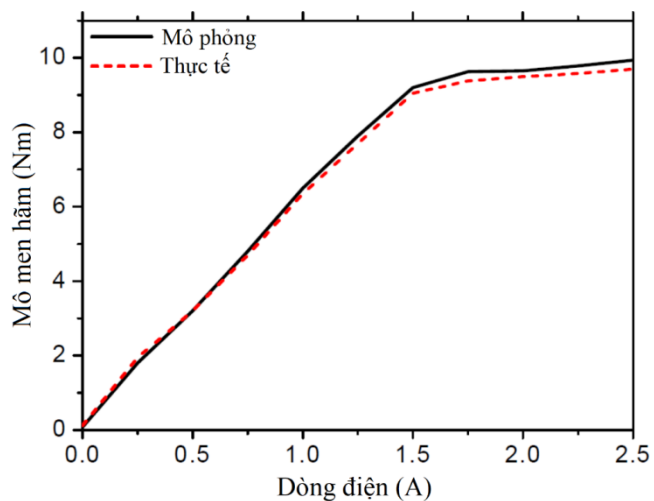
Các giá trị mô men của các MRB như sau: mô men hãm đo được của MRB\_01 được biểu diễn theo **Hình 5.18**. Trong thực nghiệm lực tiếp tuyến ngang ở cuối cánh tay được đo bằng cảm biến lực 3D và tay cầm được cố định theo hướng ngang với chiều dài cánh tay là 100 mm. Do đó mô men xoắn của MRB được tính bằng tích của lực đo và chiều dài tay cầm (100 mm).

Trong quá trình thực nghiệm, cánh tay được xoay quanh khớp 01 và giá trị trung bình của lực tại các giá trị khác nhau của dòng điện được đưa vào đã được ghi lại. Tương tự cho MRB\_02 thì mô men phanh của MRB\_02 ở khớp 02 được đánh giá bằng thực nghiệm và kết quả được thể hiện bởi **Hình 5.19**, lưu ý trong thực nghiệm cánh tay phải được xoay quanh trục khớp 02. **Hình 5.20** cho thấy lực hãm của LMRB tại các giá trị của dòng điện được đưa vào. Trong trường hợp này, cánh tay được cố định theo hướng ngang và trục của phanh MR được di chuyển qua lại.

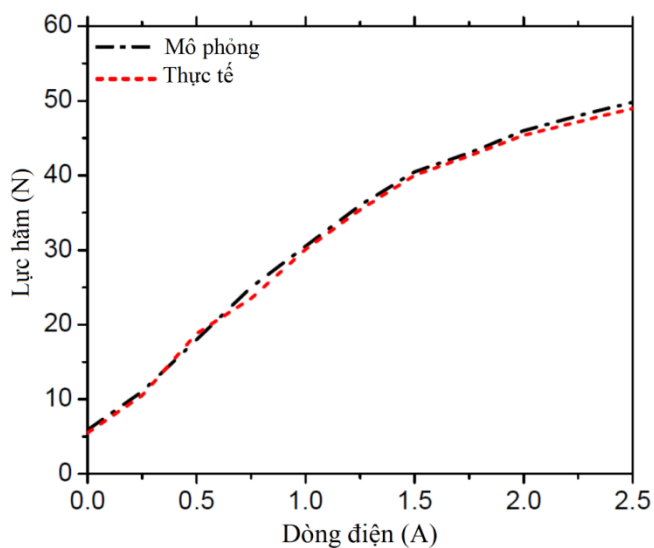
Qua các kết quả thực nghiệm đo mô men từng trục thì ta thấy khả năng đáp ứng của tất cả phanh khá tốt, tuy nhiên vẫn có một số thời điểm việc đáp ứng chưa tốt lắm có thể do mất ổn định của hệ thống hay thao tác vận hành chưa ổn định.



**Hình 5.18:** Mô men của MRB\_01.



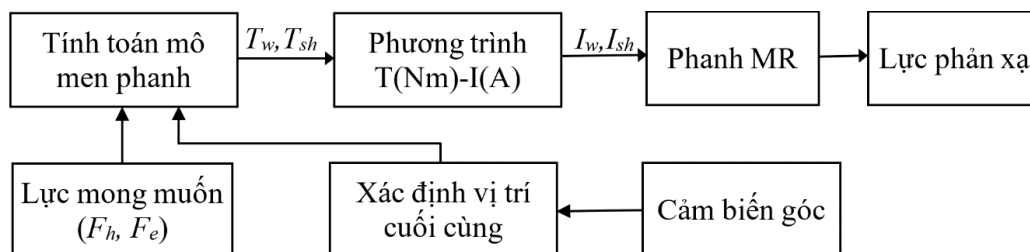
**Hình 5.19:** Mô men của MRB\_02.



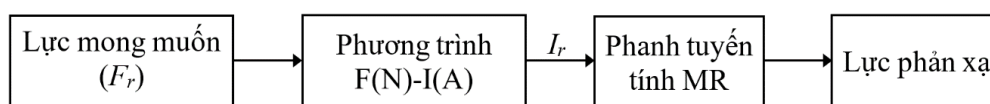
**Hình 5.20:** Lực hãm của LMRB.

### 5.6 Thiết kế bộ điều khiển cho tay máy 3D phản hồi lực.

Với hệ tay máy phản hồi lực như trên trước hết tác giả thiết kế bộ điều khiển vòng hở để phản ánh từng lực mong muốn cho người vận hành. Đối với hai lực tiếp tuyến (khớp 01, khớp 02) thì bộ điều khiển được mô tả theo **Hình 5.21**, đối lực hướng kính thì bộ điều khiển được mô tả theo và **Hình 5.22**. Ở đây các thông số đầu vào là lực mong muốn và góc xác định vị trí của hệ thống.



**Hình 5.21:** Lưu đồ bộ điều khiển lực tiếp tuyến MRB.



**Hình 5.22:** Lưu đồ bộ điều khiển lực LMRB.

Từ các thông tin của các bộ mã hóa là các giá trị của góc ( $\theta$ ) và bán kính cánh tay  $r$  được xác định, mô men xoắn của MRB\_01 được tính theo công thức (5-8), mô men của MRB\_02 theo công thức (5-9):

$$T_w = F_h \cdot r \cdot \cos\theta \tag{5-8}$$

$$T_{sh} = F_e \cdot r \tag{5-9}$$

Trong đó:

- $F_h$  là lực tiếp tuyến ngang (khớp 01) mong muốn
- $F_e$  là lực tiếp tuyến độ cao (khớp 02) mong muốn.

Để đạt được mô men hãm bằng với tính toán, dòng điện áp dụng cho các cuộn dây được xác định từ các kết quả thử nghiệm trong **Hình 5.18**, **Hình 5.19**. Có thể thấy rằng mô men phanh của MRB gần như bão hòa khi áp dụng dòng điện lớn hơn 1,5 A. Do đó, ta chỉ sử dụng dòng điện  $I < 1,5$  A và dòng điện áp dụng như là một hàm của mô men được tạo ra thể hiện trong **Hình 5.23**, **Hình 5.24**. Áp dụng đường

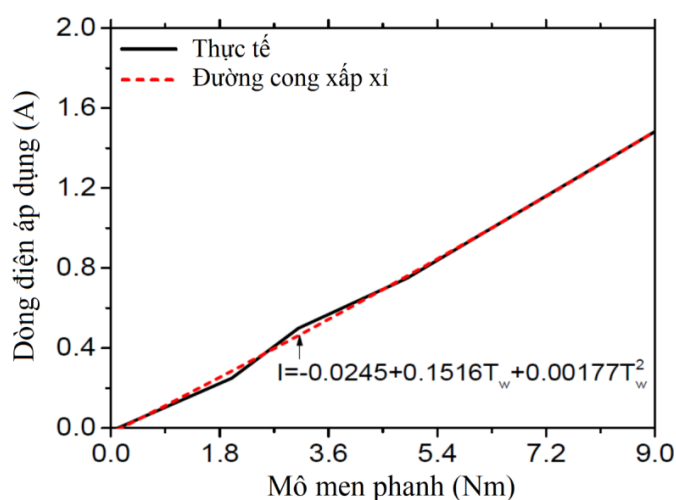
cong xấp xỉ bậc 2 thì dòng điện áp dụng cho cuộn dây của MRB\_01 và MRB\_02 được tính theo công thức tương ứng (5-10) và (5-11):

$$I_w = -0,0245 + 0,1516T_w + 0,00177T_w^2 \quad (5-10)$$

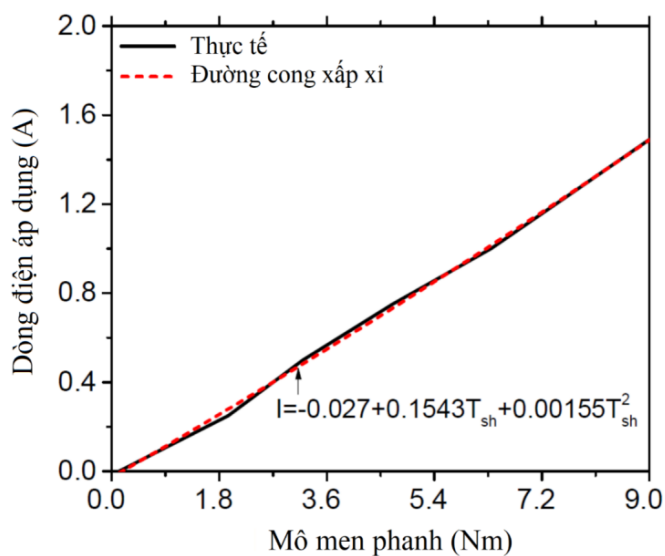
$$I_{sh} = -0,027 + 0,1543T_{sh} + 0,00155T_{sh}^2 \quad (5-11)$$

Đối với lực hướng tâm dòng điện áp dụng cho cuộn dây của LMRB được xác định từ các kết quả thực nghiệm trong **Hình 5.20**. Tương tự như MRB ta áp dụng dòng điện  $I < 1,5$  A cho LMRB. Sử dụng đường cong xấp xỉ bậc 2 thì dòng điện áp dụng cho cuộn dây của LMRB được xác định theo phương trình (5-12)

$$I_r = -0,1707 + 0,03424F_r + 0,000169F_r^2 \quad (5-12)$$

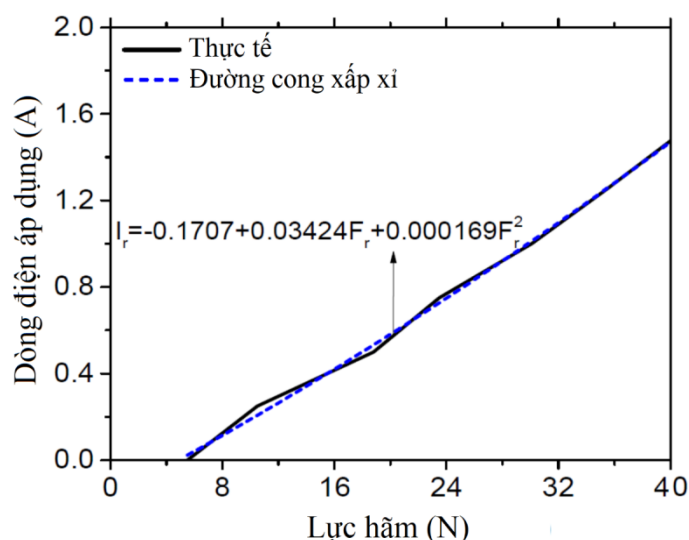


**Hình 5.23:** Quan hệ mô men MRB\_01 với dòng điện.



**Hình 5.24:** Quan hệ mô men MRB\_02 với dòng điện.





**Hình 5.25:** Quan hệ lực với dòng điện của LMRB.

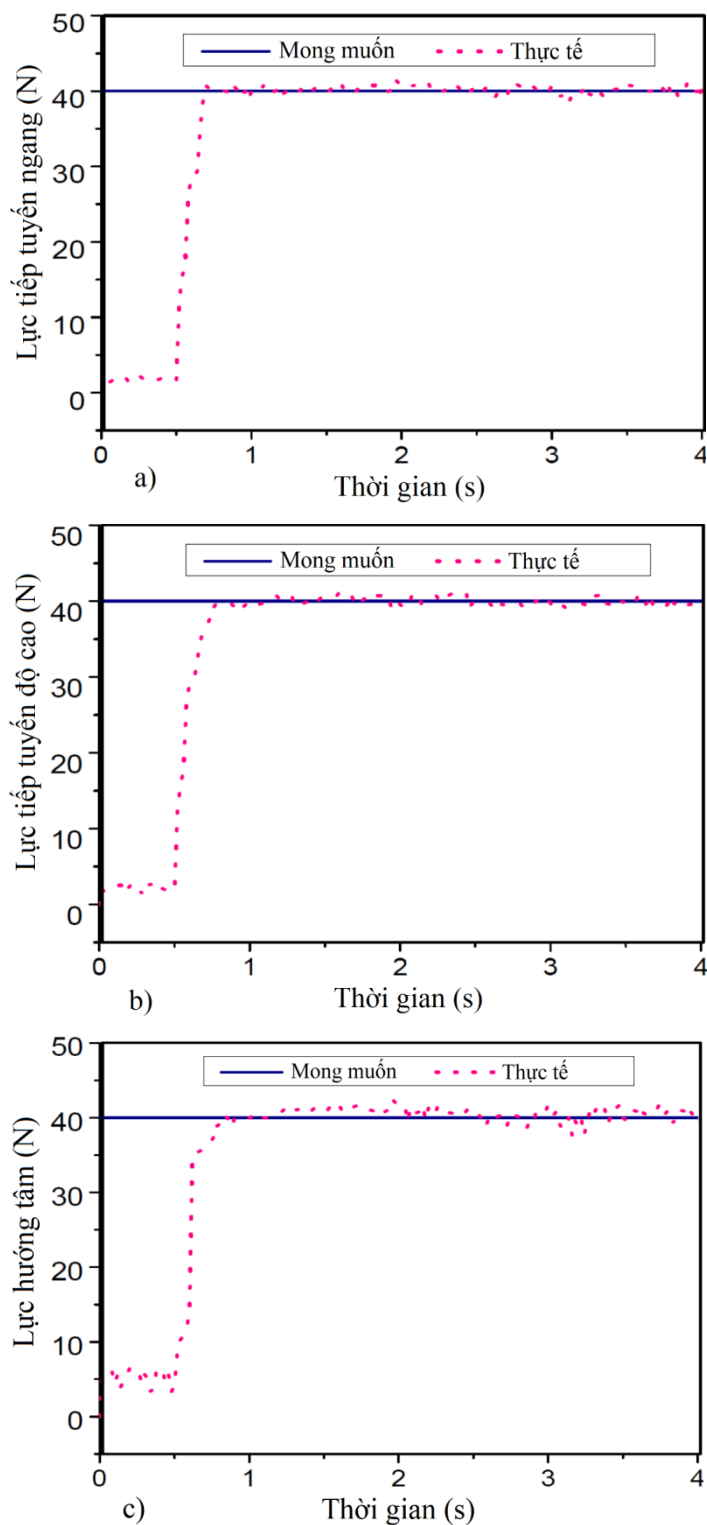
### 5.6 Kết quả thực nghiệm.

Mô hình thử nghiệm cho hệ thống phản hồi lực 3D chế tạo và thực nghiệm được thể hiện ở **Hình 5-19**. Hệ thống thực nghiệm bao gồm sự kết hợp của mô hình tay máy phản hồi lực, máy tính và thu thập dữ liệu sẽ được xử lý với các thiết bị: PCI NI-6289 do hãng National Instruments sản xuất; một cảm biến lực 3D (OptoForce 3D OMD-20-FG-100 N) được gắn trên cần điều khiển để đo lực phản xạ. Vị trí góc của tay máy được đo bằng các bộ mã hóa góc, đối với vị trí hướng tâm được đo bằng bộ mã hóa tuyến tính. Cần lưu ý rằng trong thiết lập thử nghiệm này, tín hiệu điều khiển điện áp nằm trong khoảng từ 0 - 5 V từ máy tính được gửi đến bộ khuếch đại, đó là bộ điều khiển thiết bị Wonder Box do Lord Corporation sản xuất. Dòng điện đầu ra thay đổi từ 0 - 2 A, sau đó được áp dụng cho các cuộn dây của phanh MRF. Tốc độ mẫu được đặt là 0,01 s.

Sau khi thiết lập hệ thống như **Hình 5.19** thì khả năng đáp ứng của hệ thống tay máy phản hồi lực trong đó lực phản hồi mong muốn không đổi 40 N được đặt cho từng thành phần của lực phản hồi (tiếp tuyến ngang, tiếp tuyến độ cao và lực hướng tâm) tại thời điểm 0,5 s được thể hiện bằng **Hình 5.26**.

Trong thực nghiệm này cánh tay phản hồi lực được đặt ở vị trí tùy ý và người vận hành nắm giữ bộ phận gắn cảm biến lực 3D và di chuyển nó theo một quỹ đạo tùy ý trong không gian làm việc trong quá trình thử nghiệm.





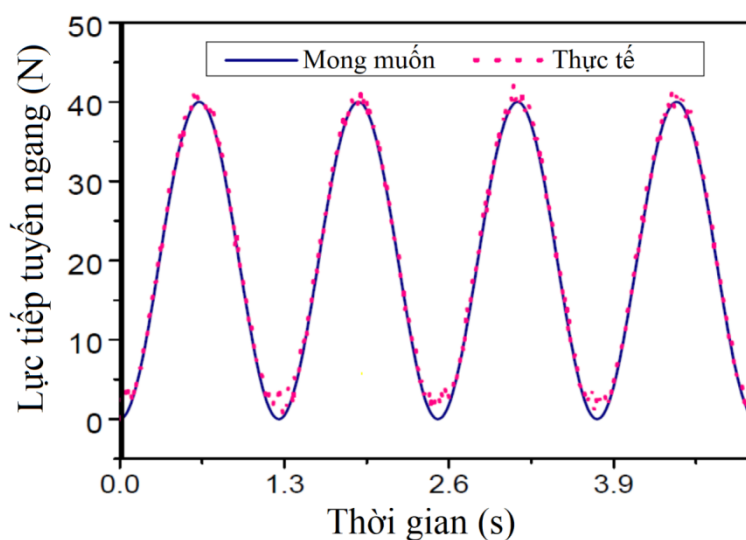
**Hình 5.26:** Kết quả thực nghiệm của hệ phản hồi lực.

Qua kết quả thực nghiệm ta có: **Hình 5.26a** cho thấy lực ngang thực tế phản hồi phù hợp tốt với lực mong muốn, với sai số tối đa 4% thu được ở trạng thái ổn định và

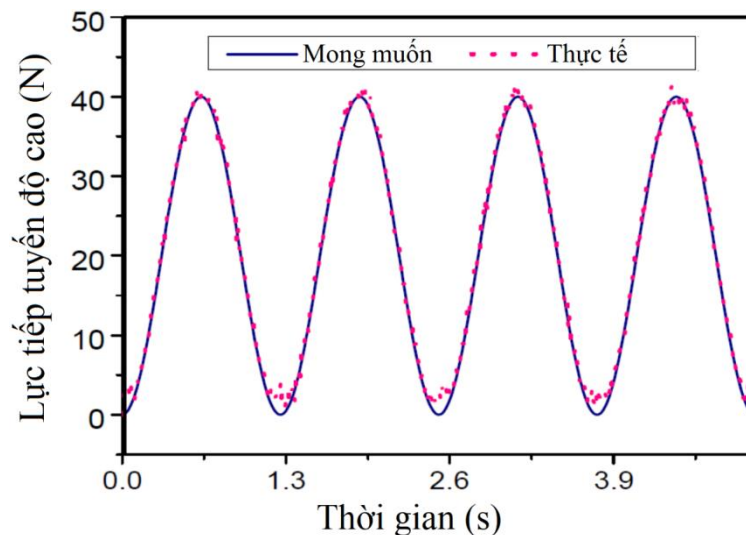
thời gian đáp ứng khoảng 0,24 s. Từ **Hình 5.26b** ta cũng thấy rằng lực nâng thực tế phản hồi phù hợp tốt với lực mong muốn, thời gian đáp ứng là khoảng 0,26 s. Từ **Hình 5.26c**, thấy rằng lực hướng tâm phản hồi thực tế khá tốt với lực mong muốn, với sai số tối đa khoảng 6,5% và có nhiều dao động hơn so với trước đây.

Để thấy đáp ứng linh hoạt của hệ thống phản hồi lực đã đưa ra như trên thì mô thực nghiệm: cánh tay phản hồi lực được đặt ở vị trí tùy ý, một lực phản hồi mong muốn hình sin được đặt cho từng thành phần của lực phản hồi (tiếp tuyến ngang, tiếp tuyến độ cao và lực hướng tâm). Trong quá trình thử nghiệm, người vận hành đã giữ bộ phận tay cầm cố gắng cảm biến lực 3D và di chuyển nó theo một quỹ đạo tùy ý trong không gian làm việc.

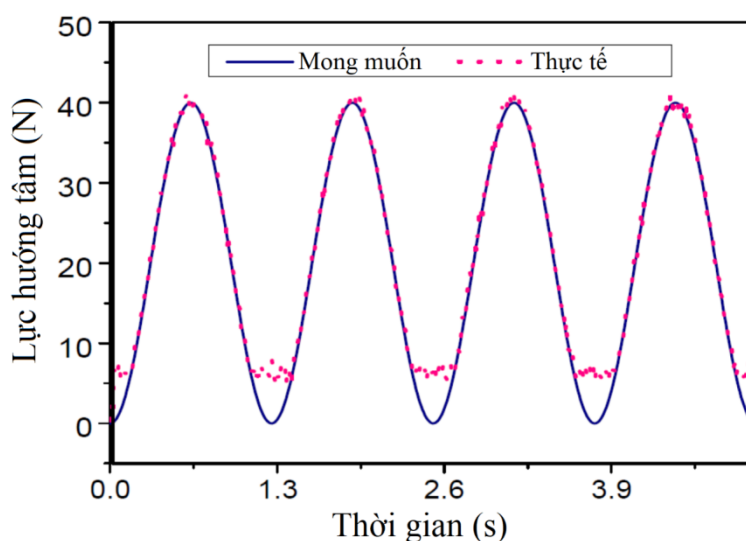
Với kết quả trong **Hình 5.27** thì lực ngang phản hồi thực tế phù hợp tốt với lực mong muốn. Tuy nhiên, lực phản hồi thực tế không thể nhỏ hơn 1,5 N, rõ ràng là do mô men xoắn không kiểm soát được (mô men xoắn ban đầu của MRB). Từ **Hình 5.28**, cũng thấy rằng lực nâng phản hồi thực tế phù hợp tốt với lực mong muốn, trong thiết kế này thì lực tối thiểu có thể đạt được là 1,8 N. Với kết quả của **Hình 5.29** cho thấy lực hướng tâm phản hồi thực tế tương ứng khá tốt với lực mong muốn, trong trường hợp này lực tối thiểu có thể đạt được là khá cao khoảng 6 N, gần bằng với lực ban đầu của phanh MR tuyến tính.



**Hình 5.27:** Kết quả thực nghiệm MRB\_01.



**Hình 5.28:** Kết quả thực nghiệm MRB\_02.



**Hình 5.29:** Kết quả thực nghiệm LMRB.

Kết quả thực nghiệm trong trường hợp lực phản hồi yêu cầu không đổi cho thấy đáp ứng thời gian của phản hồi lực là khoảng 0,25 s và ở trạng thái ổn định sai số tối đa của tiếp tuyến ngang và lực tiếp tuyến độ cao là khoảng 4%, trong khi đó lực hướng tâm lên đến 6,5% với nhiều biến động. Kết quả thử nghiệm với lực phản hồi yêu cầu hình sin cho thấy rằng một lực phản hồi mong muốn có thể đạt được tốt nhờ hệ thống phản hồi lực được đề xuất. Tuy nhiên, do mô men xoắn ban đầu của MRB và lực của LMRB của hệ thống hơi lớn nên không thể phản xạ lực nhỏ đến người điều khiển đó là 1,5 N cho vị trí ngang (khớp 01), 1,8 N cho lực nâng (khớp 02) và 6 N cho lực hướng tâm.

Qua kết quả thực nghiệm cho thấy rằng bộ điều khiển hình cầu 3D dựa trên MRF được đề xuất có thể cung cấp lực phản hồi 3D mong muốn cho người vận hành. Ngoài ra, bằng cách sử dụng cơ chế cánh tay hình cầu, lực theo mỗi hướng có thể được điều khiển độc lập và bộ điều khiển SISO để thực hiện để kiểm soát lực phản hồi chính xác hơn. Cần lưu ý rằng bộ điều khiển đề xuất có thể dễ dàng tích hợp với bất kỳ robot bị động nào cho hệ thống điều khiển từ xa, trong đó kết hợp phản hồi lực song song với điều khiển vị trí của hệ thống được đề xuất như trên.

Một điều đáng chú ý là chúng ta có thể được sử dụng tay máy như một chủ thể cho tất cả các dạng hình học bị động (bao gồm các chuỗi động học giống hoặc khác nhau). Điều này dẫn đến một ứng dụng tiềm năng cho các ứng dụng hiện đại như phẫu thuật từ xa, hoạt động trong môi trường nguy hiểm... Nếu hệ chủ động và hệ bị động có chuỗi động học giống hệt nhau, có thể sử dụng bản sao của chuyển động khớp. Mặt khác, trong trường hợp chuỗi động học của hệ bị động khác với chủ động thì vị trí của bị động được điều khiển dựa trên vị trí của hiệu ứng cuối của chủ động.

✚ Kết quả Chương 5 công bố bởi:

Diep B. T., Nguyen N. D., Tran T. T., Nguyen Q. H. Design and experimental validation of a 3-DOF force feedback system featuring spherical manipulator and magnetorheological actuators, *Actuators*, 9(1), 19, 2020.

---

## Chương 6

# KẾT LUẬN

### 6.1 Kết luận.

Trong công trình nghiên cứu này gồm một số nội dung chính đó là:

- Phát triển các cơ cấu cấu tác động hai chiều sử dụng MRF (BMRA), phanh tuyến tính từ biên (LMRB), phanh xoay sử dụng MRF (MRB) áp dụng trong các hệ thống phản hồi lực phục vụ trong kỹ thuật điều khiển từ xa. Tất cả cơ cấu trên đều được tối ưu hoá về thông số hình học sao cho khối lượng là nhỏ nhất với ràng buộc về mô men, lực đầu ra theo yêu cầu của các hệ thống phản hồi lực
- Thiết kế tối ưu BMRA đã sử dụng hai phương pháp, cụ thể là tối ưu mục tiêu đơn (phương pháp First Order) và tối ưu hóa đa mục tiêu (giải thuật NSGA-II) kết hợp với công cụ tối ưu hóa của phần mềm ANSYS. Trong quá trình tối ưu hóa, khối lượng của BMRA được giảm thiểu với mô men xoắn truyền được hạn chế lớn hơn giá trị yêu cầu. Kết quả tối ưu cho thấy ở mô men xoắn đầu ra yêu cầu là 5 Nm thì khối lượng của BMRA được đề xuất nhỏ hơn khối lượng của BMRA\_ [56]. Ngoài ra, bằng cách sử dụng cấu hình nhiều cuộn dây, khối lượng BMRA có thể được giảm đáng kể, đặc biệt là ở mô men xoắn yêu cầu cao. Kết quả thử nghiệm BMRA cho thấy kết quả mô phỏng có sai số nhỏ hơn 4%. Thời gian đáp ứng của mô men xoắn đầu ra là khoảng 55 ms, với thời gian này thì đáp ứng tốt cho các hệ thống phản hồi lực. Đồng thời, mô men ma sát có thể được loại bỏ trong mô men đầu ra của BMRA bằng cách cấp dòng điện 0,2 A cho các cuộn dây của đĩa 2 và có thể cung cấp một lực đầu ra mong muốn ở cả hai hướng.
- Trên cơ sở BMRA đã phát triển nhóm nghiên cứu phát triển hệ thống joystick 3D phản hồi lực với cơ cấu 2D-gimbal kết hợp hai BMRA và một LMRB. Trong hệ thống này các nội dung đã triển khai đó là thiết kế tối ưu về thông số hình học BMRA và LMRB sao cho khối lượng giảm thiểu tối đa với yêu

cầu ràng buộc về mô men, lực đầu ra. Các kết quả thử nghiệm về đặc tính hiệu suất của BMRA và LMRB thỏa mãn với kết quả mô phỏng. Thiết kế các bộ điều khiển áp dụng cho cần điều khiển 3D bao gồm bộ điều khiển PID và SMC và triển khai cho hệ thống thực tế. Kết quả cho thấy SMC phù hợp hơn PID trong việc kiểm soát lực của hệ thống phản hồi lực. Lực tiếp tuyến và tuyến tính mong muốn đáp ứng tốt theo yêu cầu. Độ trễ của hệ thống khoảng 30 ms. Hạn chế của hệ này là LMRB có lực ngoài trạng thái ( $F = 5,4 \text{ N}$ ) lớn nên ảnh hưởng tới khả năng phản hồi lực của hệ thống.

- Phát triển tay máy 3D phản hồi lực gồm phanh từ biến (MRB) có biên dạng phức tạp kết hợp với LMRB. Kết quả thực nghiệm trong trường hợp lực phản hồi yêu cầu không đổi thì đáp ứng thời gian của lực phản hồi là khoảng 0,25s. Sai số các lực mong muốn của các MRB với thực tế tương đối nhỏ, cụ thể là BMR\_01 và BMR\_02 khoảng 4%, trong khi đó lực hướng tâm lên đến 6,5% với nhiều dao động. Tuy nhiên, do mô men xoắn ban đầu của MRB và lực của LMRB lớn nên không thể phản xạ lực nhỏ đến người điều khiển với 1,5 N cho BMR\_01, 1,8 N cho BMR\_02 và 6 N LMRB. Với bộ điều khiển được đề xuất có thể cung cấp lực phản hồi 3D mong muốn (hình sin) cho người vận hành. Ngoài ra, lực theo mỗi hướng có thể được điều khiển độc lập và bộ điều khiển SISO để thực hiện để kiểm soát lực phản hồi chính xác hơn. Cần lưu ý rằng bộ điều khiển đề xuất có thể dễ dàng tích hợp với bất kỳ robot bị động nào cho hệ thống điều khiển từ xa, trong đó kết hợp phản hồi lực song song với điều khiển vị trí của hệ thống được đề xuất như trên. Một điều đáng chú ý là chúng ta có thể được sử dụng tay máy như một chủ thể cho tất cả các dạng hình học bị động (bao gồm các chuỗi động học giống hoặc khác nhau). Điều này dẫn đến một ứng dụng tiềm năng cho các ứng dụng hiện đại như phẫu thuật từ xa, hoạt động trong môi trường nguy hiểm... Nếu hệ chủ động và hệ bị động có chuỗi động học giống hệt nhau, có thể sử dụng bản sao của chuyển động khớp.

## 6.2 Kiến nghị và hướng phát triển của đề tài.

### ✚ Hạn chế của đề tài.

- Lực ma sát ban đầu của LMRB còn cao;
- Hệ thống phản hồi mới phát triển tới 3D;
- Bộ điều khiển phản hồi lực tính mới chưa cao.

### ✚ Hướng phát triển đề tài.

- Phát triển cơ cấu LMRB mới giảm lực không tác động ban đầu;
- Phát triển hệ thống joystick 3D dùng 03 cơ cấu tác động quay được điều khiển bởi chỉ một động cơ;
- Xây dựng hệ thống điều khiển kín và áp dụng các thuật toán điều khiển hiện đại nhằm nâng cao chất lượng lực phản hồi;
- Nghiên cứu cơ cấu BMRA mới và áp dụng vào hệ thống phản hồi lực ứng dụng trong phẫu thuật y khoa.

---

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Rabinow J. The magnetic fluid clutch. *AIEE Trans.* 67, 1308–1315, 1948.
- [2] Kordonski W. I., Gorodkin S. R., Novikova Z. A. The influence of ferroparticle concentration and size on mr fluid properties. *Proceedings of the 6th International Conference on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions, and Their Applications*, World Scientific, Singapore. 1997, 22–25, pp. 535–542.
- [3] Rosenfeld N., Wereley N. M., Radhakrishnan R., Sudarshan T. Nanometer and micron sized particles in a bidisperse magnetorheological fluid. *Int. J. Mod. Phys. B* 16(17–18), 2392–2398, 2002.
- [4] Guan J. G., Wang W., Gong R. Z., Yuan R. Z., Gan L. H., Tam K. C. One-step synthesis of cobalt-phthalocyanine/iron nanocomposite particles with high magnetic susceptibility. *Langmuir* 18(11), 4198–4204, 2002.
- [5] Zubieta M., Eceolaza S., Elejabarrieta M. J., Bou-Ali M. M. Magnetorheological fluids: characterization and modeling of magnetization. *Smart Materials and Structures.* 18(9), 095019. doi:10.1088/0964-1726/18/9/095019, 2009.
- [6] Park J. H., Park O. Ok. Electrorheology and magnetorheology, *Korea-Aust Rheol.J.* 13(1), 13-17, 2001.
- [7] Munoz B. C., Adams G. W., Ngo V. T., Kitchin J. R. Stable Magnetorheological Fluids, *US Patent* 6203717, 2001.
- [8] Fang C., Zhao B. Y., Chen L. S., Wu Q., Liu N., Hu K. A. The Effect of the Green Additive Guar Gum on the Properties of Magnetorheological Fluid, *Smart Materials and Structures*, 14 (1), 2005.
- [9] W. A Gross. Valve for Magnetic Fluids. *US Patent* 3010471, 1961.
- [10] E. Germer, Magnetic Valve. *US Patent*, 2670749, 1954.
- [11] P. J. Rankin, A. T. Horvath, D. J. Klingenberg. Magnetorheology in Viscoplastic Media. *Rheological Acta*, 38, 471-477, 1999.



- 
- [12] J. H. Park et al. Rheological properties and stability of magnetorheological fluids using viscoelastic medium and nanoadditives. *Korean J. Chem. Eng.*, 18(5), 580-585, 2001.
- [13] S. T. Lim. Magnetorheology of carbonyl-iron suspensions with submicron-sized filler. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(40), 3033-3035, 2004.
- [14] H. Bose, A. Trendler. Smart Fluids - Properties and benefit for new electromechanical devices, *AMAS Workshop on Smart Mater. Struct.*, 329-336, 2003.
- [15] J. D. Carlson. What makes a good MR fluid, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 13(7), 431- 435, 2002.
- [16] J. Claracq, J. Sarrazin, J. P. Montfort. Viscoelastic properties of magnetorheological fluids, *Rheologica Acta* 43(1), 38-43, 2004.
- [17] Robert T. Foister. Magnetorheological Fluid, *US Patent 005667715A*, 1997.
- [18] Pradeep P. Phule. Magnetorheological Fluid, *US Patent 005985168A*, 1999.
- [19] J. H. Park, B. D. Chin and O. O. Park. Rheological Properties and Stabilization of Magnetorheological Fluids in a Water-in-Oil Emulsion, *J. Colloid Interf. Sci* 240, 349-54, 2001.
- [20] G. Bossis, S. Laciş, A. Meunier, O. Volkova. Magnetorheological Fluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 252(1), 224-228, 11/2002.
- [21] K. Butter et al. Direct observation of dipolar chains in ferrofluids in zero field using cryogenic electron microscopy, *Journal Phys. Condens. Matter.* 15(15), 1451-1470, 2003.
- [22] Raju Ahamed, Choi S. B., Ferdous M. M. A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(10), 2051-2095, 2018.
- [23] S. F. Masri, R. Kumar and R. C. Ehrgott. Modeling and Control of an Electrorheological Device for Structural Control Applications, *Smart Material and Structures*, 4,121-131,1995.

- 
- [24] Grunwald, A., & Olabi, A. G. Design of magneto-rheological (MR) valve. *Sensors and Actuators A Physical*, 148(1), 211–223 doi:10.1016/j.sna.2008.07.02825, 2008
- [25] F. Spencer, S. J. Dyke, M. K. Sain and J. D. Carlson. Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *J. Eng. Mech. ASCE* 123, 230-138, 1997.
- [26] N. M Wereley, J. U Cho, Y. T, Choi S. B. Magnetorheological dampers in shear mode, *Smart Material and Structures*, 17, 2008.
- [27] D. Y. Lee, Y. T. Choi and N. M. Wereley. Performance Analysis of ER/MR Impact Damper Systems Using Herschel-Bulkley Model, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*13, 525-531, 2002.
- [28] E. Garcia, J. C. Arevalo, G. Muñoz, P. Gonzalez-de-Santos. Combining series elastic actuation and magneto-rheological damping for the control of agile locomotion, *Robotics and Autonomous Systems*, 59(10), 827-839, 25/06/2011.
- [29] P. Kulkarni et al. Study of the Behavior of MR Fluids in Squeeze, Torsional and Valve Modes, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*14, 99-104, 2003.
- [30] Li, Z., Zhang, X., Guo, K., Ahmadian, M., & Liu, Y. (2016). A novel squeeze mode based magnetorheological valve: design, test and evaluation, *Smart Materials and Structures*, 25(12), 127003, doi:10.1088/0964-1726/25/12/127003
- [31] Từ Diệp Công Thành (Trường ĐH Bách khoa TP.HCM), Điều khiển Tele-Manipulator, *Tạp chí Phát triển KH&CN*, tập 13, số K5-2010.
- [32] Nguyễn Ngọc Điệp, Nguyễn Quốc Hưng, Nguyễn, Viễn Quốc, Huỳnh, Công Hào, Lê Duy Tuấn, Nguyễn Ngọc Tuyền, Lăng Văn Thắng. Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình tay máy sao chép chuyển động và phản hồi lực. *Hội nghị toàn quốc Máy và Cơ cấu*, Thành phố Hồ Chí Minh, 2015.
- [33] Carignan C R, Akin D L, Using robots for astronaut training, *IEEE Control Syst. Mag.* Vol. 23(2) (2003) 46-59.

- 
- [34] Leong I F et al. Using haptic manipulator in a virtual design studio, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on control applications*. Vol. **1** (2004) 497-502
- [35] K. H. Kim, Y. J. Nam, R. Yamane, M. K. Park. Smart mouse: 5-DOF haptic hand master using magneto-rheological fluid actuators, *Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, 149, 2009, 012062.
- [36] Scott Winter and M. Bouzit. Use of magnetorheological fluid in a force feedback glove, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 2-8, 2007.
- [37] Bullion. C., Gurocak. H, Haptic Glove with MR Brakes for Distributed Finger Force Feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(6), 421–433, doi:10.1162/pres.18.6.421, 2009.
- [38] Gonenc. B., Gurocak. H. Virtual Tissue Cutting With Haptic Feedback Using a Hybrid Actuator With DC Servomotor and Magnetorheological Brake. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(3), 030902, 2016.
- [39] Doruk Senkal and Hakan Gurocak, Spherical Brake with MR Fluid as Multi Degree of Freedom Actuator for Haptics, *J. Int. Mater. Sys. Struct.* Vol. **20** (18) 2149-2160, 2009.
- [40] Chen. D., Song. A., Tian. L., Zeng. H., Xiong. P. Development of a Multi-directional Controlled Small-scale Spherical MR Actuator for Haptic Applications, *IEEE/Asme Transactions On Mechatronics*, vol. 24, No.4, 08/2019.
- [41] Li W. H., Liu B., Kosasih P. B., Zhang X. Z. A 2-DOF MR actuator joystick for virtual reality applications, *Sensors and Actuators*, Vol.137, Issue 2, 308-320, 06/2007.
- [42] Nguyen P. B., Oh J. S., Choi S. B. A novel 2-DOF haptic master device using bi-directional magneto-rheological brakes: modelling and experimental

- 
- investigation, *International Journal of Materials and Product Technology*, 44(3/4), 216, 2012.
- [43] Oh J S, Choi S H and Choi S B, Design of a 4-DOF MR haptic master for application to robot surgery: virtual environment work, *Smart Material and Structures*, Vol.23(9), 2014.
- [44] Nguyen Q. H., Choi S. B. Optimal design methodology of magnetorheological fluid based mechanisms, *Smart Actuation and Sensing Systems*, doi:10.5772/51078, 10/2012.
- [45] T. Shiraishi, S. Morishita, H. Gavin. Estimation of Equivalent Permeability in magneto rheological Fluid Considering Cluster Formation of Particles, *Journal Applied Mechanics*, 71(2), 20-207, 3/2004.
- [46] Quoc, N. V., Tuan, L. D., Hiep, L. D., Quoc, H. N., & Choi, S. B. (2019). Material Characterization of MR Fluid on Performance of MRF Based Brake, *Frontiers in Materials*, 6. doi:10.3389/fmats.2019.00125.
- [47] K. Toda, H. Furuse, Extension of Einstein's Viscosity Equation to That for Concentrated Dispersions of Solutes and Particles, *J Biosci. Bioeng.* 102(6), 524-528, 2006.
- [48] C. A. Shook, Slurry Pipeline Flow, *Proc. of Solid-Liquid Suspensions*, Butterworth-Heinemann, 1993, 287-309
- [49] Choi J. U., Choi Y. T., Wereley N. M. Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers, *Smart Material and Structures*, doi:10.1117/12.483975, 2003.
- [50] Le D. T., Nguyen N. D., Le D. T., Nguyen N. T., Pham V. V., Nguyen Q. H. Development of Magnetorheological Brake with Tooth-Shaped Disc for Small Size Motorcycle, *Applied Mechanics and Materials*, 889, 508–517, 2019.
- [51] Song B. K., Nguyen Q. H., Choi S. B., Woo J. K. The impact of bobbin material and design on magnetorheological brake performance, *Smart Materials and Structures*, 22(10), 105030, 2013.

- 
- [52] Division P. S. Rotary Seal Design Guide (Parker Hannifin Corporation), *Catalog EPS*, 5350, 2006.
- [53] Brian E S 2005 Research for dynamic seal Friction modeling in linear motion hydraulic piston applications, *Master of Science Thesis University of Texas at Arlington, USA*.
- [54] Claude Lemarechal, Cauchy and the Gradient Method. *Doc Math Extra*: 251–254, 2012
- [55] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [56] Nguyen P. B., Choi S. B. A Bi-Directional Magneto-Rheological Brake for Medical Haptic System: Optimal Design and Experimental Investigation, *Advanced Science Letters*, 13(1), 165-172, 2012.
- [57] Nguyen Q. H., Choi S. B. Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat, *Smart Material and Structures*, 19(11), 115024, 2010.
- [58] Nguyen Q. H., Han Y. M., Choi S. B., Wereley N. M. Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method, *Smart Materials and Structures*, 16, 2242–2252, 2007.
- [59] Blake J., Gurocak H. B. Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 14(5), 606-615, 11/2009.
- [60] Najmaei. N., Asadian. A., Kermani, M., Patel. R. Design and Performance Evaluation of a Prototype MRF-based Haptic Interface for Medical Applications, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1–1, 2015.
- [61] Mukhopadhyay A., Maulik U., Bandyopadhyay, S. Multiobjective Genetic Algorithm-Based Fuzzy Clustering of Categorical Attributes. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(5), 991–1005, 2009.

- 
- [62] Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. *Lecture Notes in Computer Science*, 849–858, 2000), doi:10.1007/3-540-45356-3\_8.
- [63] Stuart Bennett, A history of control engineering 1930-1955. *IET*, p. 48, ISBN 9-780863412998, 1986.
- [64] V.I. Utkin, Variable Structure systems with Sliding Modes. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 22, 2, 212-222, 1977.
- [65] S. Tokat, “Sliding mode controlled bioreactor using a time-varying sliding surface”, *Transactions of the Institute of Measure and Control*, Vol. 31, pp. 435-456, 2009.
- [66] S. Labiod, A neuro-fuzzy-sliding mode controller using nonlinear sliding surface applied to the coupled tanks system, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 6, pp.72-80, 2009.
- [67] H. K. Halil, “Nonlinear System,” New Jersey:Pearson Educ. Inc., 2000.
- [68] V. I. Utkin, J. Guldner, J. Shi. Sliding mode control in electromechanical systems, New York: Taylor & Francis, 1999.
- [69] H. Lee, V. I. Utkin. Chattering suppression methods in sliding mode control systems, *Annual Reviews in Control* Vol. 31, pp. 179-188, 2007.
- [70] V. I. Utkin, H. Lee. The chattering analysis, *Proc. of 12 th International Power Electronics and Motion Control Conference on Ind. EPE PEMC*, Portoroz, Slovenia 2006.
- [71] A. G. Bondarev, S.A. Bondarev, N.E. Kostyleva, and V.I. Utkin. Sliding modes in systems with asymptotic state observers, *Autom. Remote Control*, Vol. 46, pp. 679-684, 1985.
- [72] J. J. Slotine, W. Li. Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, 1991.
- [73] M. Ertugrul, O. Kaynak, A. Sabanovic, K. Ohnishi. A generalized approach for Lyapunov design of sliding mode controllers for motion control applications, *Proc. 4 th Int'l. Workshop on Advanced Motion Control*, Vol. 1, pp. 407-412, 1996.

- 
- [74] Liu. J., Wang. X. *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-642-20907-9, 2011.
- [75] L. Ljung *MATLAB: System Identification Toolbox: User's Guide Version 4*. The Mathworks, 1995.
- [76] Nguyen Q. H., Diep B.T., Vo V. C., Choi S. B. Design and simulation of a new bidirectional actuator for haptic systems featuring MR fluid, *Proc. of SPIE Vol. 10164*, 101641O, 2017.
- [77] Diep B.T., Le D. H., Vo V. C., Nguyen Q. H. Performance evaluation of a 2D-haptic joystick featuring bidirectional magneto rheological actuators, Springer Nature Singapore Pte Ltd, doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2\_73, 2018.
- [78] Diep B. T., Le D. H., Nguyen Q. H., Choi S. B., Kim J. K. Design and Experimental Evaluation of a Novel Bidirectional Magnetorheological Actuator, *Smart Materials and Structures*, 29 117001, 21/09/2020.
- [79] Diep B. T., Nguyen Q. H., Kim J. H., Choi S. B. Performance evaluation of a 3D haptic joystick featuring two bidirectional MR actuators and a linear MRB, *Smart Materials and Structures*, 30 017003, 01/12/2020.

---

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. Diep B. T., Le D. H., Nguyen Q. H., Choi S. B., Kim J. K. Design and Experimental Evaluation of a Novel Bidirectional Magnetorheological Actuator, *Smart Materials and Structures*, **29** 117001, 21/09/2020.
2. Diep B. T., Nguyen Q. H., Kim J. H., Choi S. B. Performance evaluation of a 3D haptic joystick featuring two bidirectional MR actuators and a linear MRB, *Smart Materials and Structures*, **30** 017003, 01/12/2020.
3. Diep B. Tri., Le D. Hiep, Vu V. Bo., Nguyen T. Nien., Duc -Dai Mai., Nguyen Q. Hung. A sliding mode controller for force control of magnetorheological haptic joysticks, *Modern Mechanics and Applications*, LNME, pp. 1–13, 2022, [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6\\_83](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6_83).
4. Diep B. T., Nuyen N. D., Tran T. T., Nguyen Q.H. Design and experimental validation of a 3-DOF force feedback system featuring spherical manipulator and magnetorheological actuators, *Actuators*, **9(1)**, 19, 2020.
5. Nguyen Q. H., Diep B.T., Vo V. C., Choi S. B. Design and simulation of a new bidirectional actuator for haptic systems featuring MR fluid, *Proc. of SPIE*, Vol. 10164, 101641O, 2017.
6. Diep B.T., Le D. H., Vo V. C., Nguyen Q. H. Performance evaluation of a 2D-haptic joystick featuring bidirectional magneto rheological actuators, *Springer Nature Singapore Pte Ltd*, [doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2\\_73](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2_73), 2018.



---

## **PHỤ LỤC**

- Chương trình CODE của BMRA thông thường
- Chương trình CODE của BMRA1, BMRA2, LMRB
- Chương trình tối ưu của BMRA1, BMRA2, LMRB