

# Đánh giá hoạt động của ổ từ kiểu lai có khe hở phụ và đề xuất phương án cải tiến Performance evaluation and improvement of hybrid magnetic bearings with auxiliary clearance

Vũ Đình Đạt<sup>1,2</sup>, Nguyễn Quang Dich<sup>1\*</sup>, Nguyễn Huy Phương<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hanoi University of Science and Technology

<sup>2</sup>Hung Yen University of Technology and Education

\*Corresponding author E-mail: [dich.nguyenquang@hust.edu.vn](mailto:dich.nguyenquang@hust.edu.vn)

## Abstract

Recently, Hybrid Magnetic Bearings (HBMs) are being widely used in many devices because they have advantages of both active and passive magnetic bearings. However, the way to combine effectively between permanent magnets and electromagnets always attracts many scientists. This paper focuses on the performance of a four-pole hybrid magnetic bearing with auxiliary clearance and suggests a new innovative way of using the magnetic gap. To evaluate the performance of these types of magnetic bearings, finite element analysis method (FEM) using ANSYS was applied. In addition, the simulation results are also compared with the calculated results by the equivalent magnetic circuit method (EMCM) to verify and give ideas to optimize the HMB. The evaluated results show outstanding advantages of the HBM using the magnetic gap compared to the use of auxiliary clearance.

**Keywords:** ANSYS, AMB, EMCM, FEM, HMB,

## Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\Phi$	Wb	Từ thông
$H$	A/m	Cường độ từ trường
$B$	Tesla	Mật độ từ thông
$F$	N	Lực điện từ
$I$	A	Cường độ dòng điện
$x$	mm	Khoảng cách khe hở không khí
$R$	$\Omega$	Từ trở

## Chữ viết tắt

FEM	finite element method
EMCM	equivalent magnetic circuit method
PMB	passive magnetic bearing
AMB	active magnetic bearing
HMB	hybrid magnetic bearing

## Tóm tắt

Trong thời gian gần đây các ổ từ kiểu lai (HBM) đang được ứng dụng rộng rãi trong nhiều thiết bị do chúng có khả năng kết hợp được ưu điểm của cả ổ từ chủ động lẫn ổ từ bị động. Tuy nhiên vấn đề kết hợp một cách hiệu quả giữa nam châm vĩnh cửu và nam châm điện luôn là bài toán được nhiều nhà khoa học quan tâm. Bài báo này tập trung đánh giá hoạt động của một loại ổ từ kiểu lai bốn cực có khe hở phụ và đưa ra một hướng cải tiến mới là dùng khe cách từ. Để đánh giá được kết quả hoạt động của các loại HBM này thì phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng ANSYS được áp dụng. Ngoài

ra, các kết quả mô phỏng cũng được so sánh với phương pháp mạch từ tương đương (EMCM) nhằm kiểm chứng và đưa ra những ý tưởng tối ưu hóa thiết kế nhằm nâng cao chất lượng HMB. Kết quả đánh giá cho thấy những ưu điểm nổi bật của phương án dùng khe cách từ so với phương án dùng khe hở phụ khi thiết kế ổ từ chủ động kiểu lai.

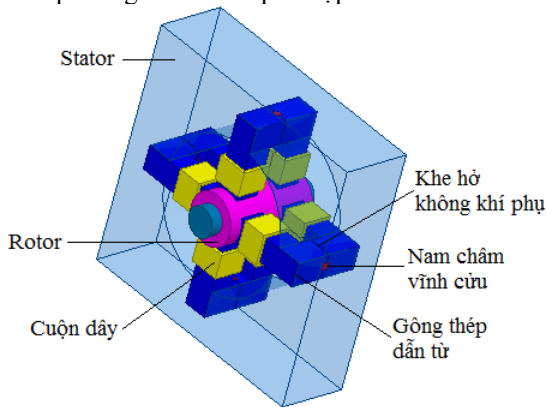
## 1. Phần mở đầu

Ổ đỡ từ là một loại ổ đỡ mà có khả năng nâng không tiếp xúc các trục chuyển động nhờ vào lực từ trường. Do giữa trục quay và phần tĩnh không tiếp xúc với nhau, nên ổ đỡ từ có nhiều ưu điểm nổi bật mà vòng bi cơ không có được như không có ma sát, hao mòn, không cần chất bôi trơn và khả năng kiểm soát được trạng thái làm việc [1,2]. Kết quả là ổ đỡ từ có thể làm việc ở các môi trường khắc nghiệt như rất nóng, rất lạnh hoặc chân không cũng như có thể làm việc với tốc độ rất cao. Ổ đỡ từ có 3 loại cơ bản là ổ đỡ từ bị động (PMB), ổ đỡ từ chủ động (AMB) và ổ đỡ từ kiểu lai (HMB). Với ổ đỡ từ bị động thì lực nâng được sinh ra nhờ các nam châm vĩnh cửu. Do đó kiểu ổ đỡ này đơn giản và không tiêu thụ năng lượng nhưng không cho phép kiểm soát được lực nâng. Với ổ đỡ từ chủ động thì lực nâng được sinh ra bởi các nam châm điện, và nhờ vào việc kết hợp với các cảm biến và bộ điều khiển thì lực nâng hoàn toàn có thể được kiểm soát. Tuy nhiên nhược điểm lớn nhất của ổ đỡ từ chủ động là tổn hao năng lượng lớn. Ổ đỡ từ kiểu lai là sự kết hợp cấu trúc giữa ổ từ chủ động và bị động để vừa đảm bảo khả năng kiểm soát lực nâng cũng như đảm bảo hiệu suất cao [3,4]. Một kiểu cấu trúc của ổ đỡ từ kiểu lai được thể hiện trong [5,6], trong đó dòng từ thông tản và

dòng từ thông điều khiển chia sẻ với nhau cùng một đường dẫn, điều này có thể dẫn đến bão hòa và làm cho tổn hao lớn. Một hướng nghiên cứu về cấu trúc khác của HMB là tạo ra lực xuyên tâm trục rotor [7,8]. Với cấu trúc này, từ tán được tách ra khỏi từ thông điều khiển, tạo ra hai dòng dịch chuyển của từ thông xuyên tâm và hướng dọc trục. Tuy nhiên quá trình kiểm soát và điều khiển phức tạp vì mạch từ gồm nhiều vòng từ thông móc vòng theo các hướng dọc và ngang trục. Như vậy với hai cấu trúc trên của HMB, ta dễ dàng nhận thấy một vấn đề phổ biến là là các mạch từ của các kênh dọc và ngang trục đan xen với nhau, ảnh hưởng lẫn nhau, điều này làm khó khăn cho quá trình mô hình hóa và xây dựng hệ thống điều khiển ổn định và chính xác.

Để khắc phục các nhược điểm trên thì hướng nghiên cứu đang được nhiều nhà khoa học quan tâm đó là thiết kế một cấu trúc HMB mới trong đó mạch từ theo hướng  $x$  và  $y$  độc lập với nhau. Với cấu trúc này ở từ thường có 4 cực để kiểm soát các phương chuyển động  $x$  và  $y$ . Ngoài ra, trên mỗi cực sẽ được bố trí thêm các phiến nam châm vĩnh cửu để hỗ trợ lực nâng nhằm giảm dòng điện chạy trong các cuộn dây của cực từ. Có hai dạng cấu trúc phổ biến hiện nay đó là dạng không có khe hở phụ và dạng có khe hở phụ quanh khu vực bố trí nam châm. Trong đó loại có khe hở phụ (hình 1) được cho là có nhiều ưu điểm hơn như tiết kiệm năng lượng, lực hút tuyến tính và đáp ứng chính xác [10]. Tuy nhiên việc xuất hiện khe hở phụ bằng không khí lại có khả năng gây ra từ thông tán xung quanh khe hở này.

Bài báo này sẽ xây dựng phương pháp đánh giá hoạt động của loại HBM có khe hở phụ thông qua cả phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn và phương pháp mạch từ tương đương để từ đó đưa ra phương án cải tiến phù hợp hơn cho thiết kế HBM.

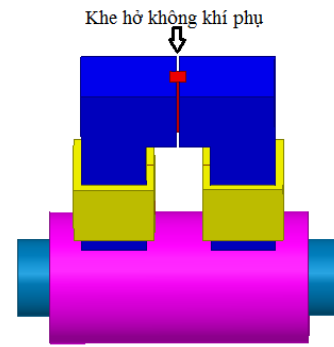


H. 1 Mô hình HBM có khe hở không khí phụ

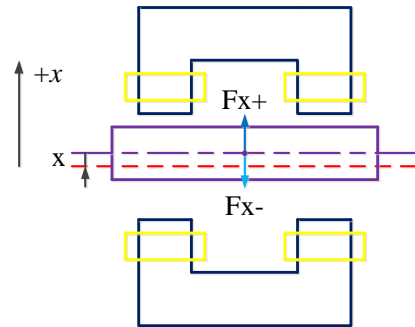
## 2. Phân tích tính toán HBM với khe hở không khí phụ

### 2.1. Tính toán mạch từ tương đương

Sơ đồ cấu trúc 1 cực của HBM 4 cực có khe hở không khí phụ được mô tả chi tiết như trong hình 2. Do tính độc lập từ thông giữa các kênh  $x$  và  $y$  hay nói cách khác là không có sự xen kênh nên để thể hiện nguyên lý hoạt động ta sẽ phân tích cụ thể một kênh, các kênh còn lại là tương tự. Ở đây ta sẽ phân tích kênh  $x$  bao gồm 2 cực từ đối xứng, rotor dịch chuyển đi lên một khoảng  $x$  theo chiều dương của trục  $x$  như trong Hình 3.



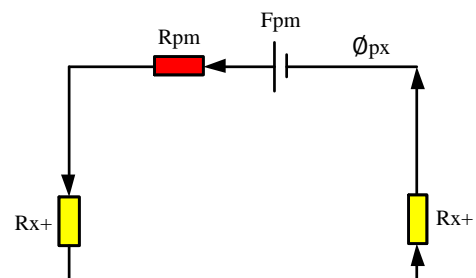
H. 2 Một cực từ của HMB khe hở không khí phụ



H. 3 Rotor dịch chuyển lên một khoảng  $x$  theo chiều  $(+x)$

Giả định ở trạng thái rotor cân bằng chính giữa, khoảng cách khe hở không khí giữa rotor với từng cực từ là bằng nhau và bằng  $x_0$ . Rotor được giữ bởi tác dụng lực kéo của cực từ phía trên và lực kéo của lực từ phía dưới sao cho tổng lực tác dụng lên rotor là bằng không. Khi rotor bị tác động để dịch chuyển lên lên một khoảng  $x$  theo chiều  $+x$ , khi đó khoảng cách khe hở không khí theo chiều  $+x$  sẽ nhỏ làm tăng mật độ từ thông và lực từ. Ngược lại mật độ từ thông và lực từ theo hướng ngược lại  $-x$  sẽ giảm. Khi đó lực từ tổng hợp lên rotor sẽ càng làm cho rotor dịch chuyển thêm theo hướng  $+x$ . Lúc này các cảm biến khoảng cách sẽ nhận được sự dịch chuyển và truyền tín hiệu đến hệ thống điều khiển và hệ thống điều khiển sẽ xuất một dòng điều khiển lên cuộn dây điều khiển tương ứng. Cụ thể ở đây là sẽ tăng dòng điều khiển ở cuộn dây phía dưới và giảm dòng điều khiển ở cuộn dây phía trên một lượng có giá trị  $i$ . Khi đó mật độ từ thông và lực từ ở khe hở phía trên sẽ giảm và ở khe hở phía dưới sẽ tăng. Kết quả là rotor sẽ được kéo xuống dưới trở về vị trí cân bằng chính giữa ban đầu.

Để xây dựng mạch từ tương đương cho HMB khe hở không khí phụ ta chia từ thông qua mạch từ bởi hai nguồn. Nguồn thứ nhất là do nam châm vĩnh cửu (Hình 4), nguồn thứ hai do sức từ động của cuộn dây tạo ra (Hình 5).



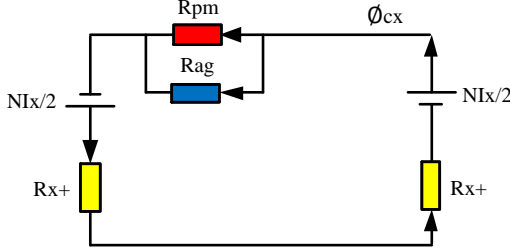
H. 4 Mạch từ tương đương do nam châm

Với  $R_{pm}$  là từ trở của nam châm,  $R_{x+}$  là từ trở của khe hở cực từ với rotor. Bỏ qua từ trở của gông thép, tổng từ trở có thể được xác định theo:

$$R_{px} = R_{pm} + 2R_{x+} = R_{pm} + \frac{2 x_0 - x}{\mu_0 A} \quad (1)$$

với A là diện tích tiết diện cực từ phần khe hở không khí. Từ thông:

$$\phi_{px} = \frac{F_{pm}}{R_{px}} = \frac{F_{pm}}{R_{pm} + 2(x_0 - x) / \mu_0 A} \quad (2)$$



H. 5 Mạch từ tương đương do cuộn dây

Tổng từ trở:

$$R_{cx} = \frac{R_{pm} R_{ag}}{R_{pm} + R_{ag}} + 2R_{x+} = \frac{R_{pm} R_{ag}}{R_{pm} + R_{ag}} + \frac{2 x_0 - x}{\mu_0 A} \quad (3)$$

$R_{ag}$  là từ trở của khe hở không khí phụ

Từ thông:

$$\phi_{cx} = \frac{NI_x}{R_{cx}} = \frac{N(i_{0x} + i_x)}{R_{pm} R_{ag} / (R_{pm} + R_{ag}) + 2(x_0 - x) / \mu_0 A} \quad (4)$$

Lực từ của cực từ phía trên tác dụng lên rotor bằng tổng lực từ do từ thông nam châm và cuộn dây sinh ra được tính như sau:

$$F_{x+} = \frac{2\phi_{px}^2}{\mu_0 A} + \frac{2\phi_{cx}^2}{\mu_0 A} \quad (5)$$

Thay (3) và (4) vào (5) tính được:

$$F_{x+} = \frac{2\mu_0 A F_{pm}^2}{[\mu_0 A R_{pm} + 2 x_0 - x]^2} + \frac{2\mu_0 A [N i_{0x} + i_x]^2}{[\mu_0 A R_{pm} R_{ag} / (R_{pm} + R_{ag}) + 2 x_0 - x]^2} \quad (6)$$

Thực hiện tính toán tương tự được lực từ của cực từ phía dưới tác dụng lên rotor.

$$F_{x-} = \frac{2\mu_0 A F_{pm}^2}{[\mu_0 A R_{pm} + 2 x_0 + x]^2} + \frac{2\mu_0 A [N i_{0x} - i_x]^2}{[\mu_0 A R_{pm} R_{ag} / (R_{pm} + R_{ag}) + 2 x_0 + x]^2} \quad (7)$$

Tổng hợp lực tác dụng lên rotor theo phương x,

$$F_x = F_{x+} - F_{x-} \quad (8)$$

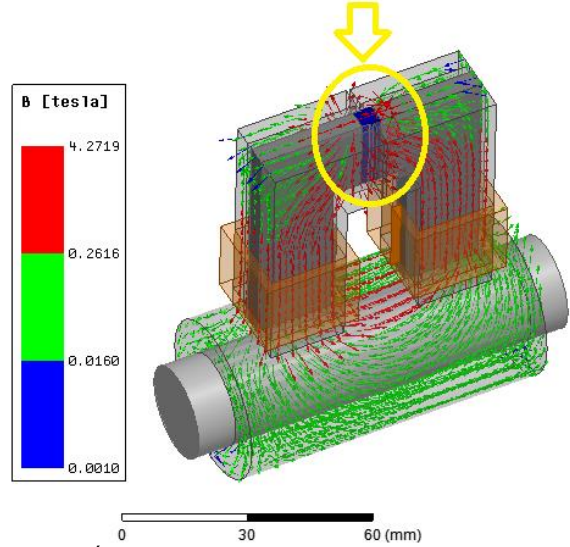
### 2.2. Phân tích tử hữu hạn và kiểm chứng

Phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng rộng rãi trong phân tích và nghiên cứu về ô từ bởi tính chính xác và trực quan. Do vậy kết quả tính toán có thể được sử dụng để kiểm chứng cho phương pháp tính toán mạch từ tương đương. Các thông số chính của HMB có khe hở không khí phụ được thể hiện trong bảng:

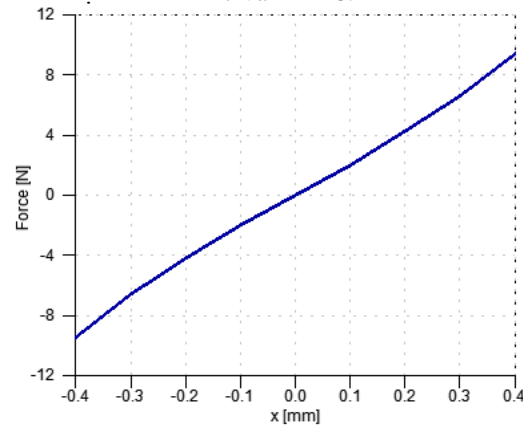
Bảng 1. Thông số kỹ thuật của HBM

Kích thước Stator	DxRxC(mm)	210x210x60
Kích thước gông thép dẫn từ	DxRxC(mm)	60x60x20
Kích thước nam châm	DxRxC(mm)	5x5x20
Đường kính Rotor	Dr(mm)	41
Đường kính trong Stator	Ds(mm)	43
Khối lượng Rotor	m(kg)	0.9
Số vòng dây/cuộn	N/2(vòng)	200
Khe hở phụ	G(mm)	1
Tiết diện mặt cắt khe hở không khí	A	400
Nam châm vĩnh cửu		NdFe30
Vật liệu thép		Steel-1008
Vật liệu cuộn dây		Đồng
Vật liệu khe cách từ, khung Stator, lõi Rotor		Nhôm
Môi trường xung quanh		Chân không

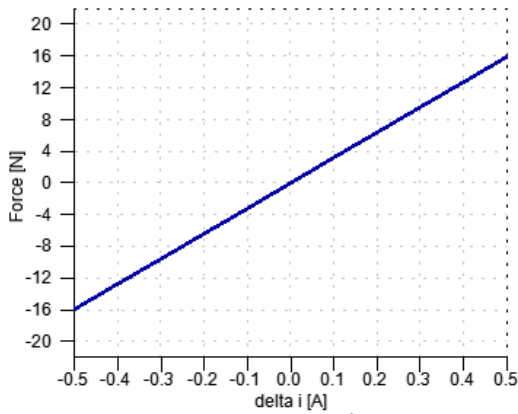
Mô hình phần tử hữu hạn 3D được xây dựng bằng cách sử dụng ANSYS 17 được thể hiện như trong hình 6.



H. 6 Kết quả mô phỏng FEM của HBM có khe hở không khí phụ. Thông quan việc mô phỏng này, kết quả phân tích lực theo độ dịch chuyển của rotor và theo dòng điều khiển của một cực từ thu được như Hình 7 và Hình 8.



H. 7 Lực hướng tâm biến đổi theo độ dịch chuyển rotor



H. 8 Lực hướng tâm biến đổi theo dòng điện điều khiển

Độ cứng dịch chuyển  $K_x$  và độ cứng dòng điện  $K_{ix}$  của HBM khe hở không khí phụ được tính dựa theo kết quả tham chiếu tại Hình 7 và Hình 8 tương ứng là:

$$K_x = \frac{F_x(0.1mm) - F_x(-0.1mm)}{0.1 + 0.1} = 19947(N/m) \quad (9)$$

$$K_{ix} = \frac{F_x(0.5A) - F_x(-0.5A)}{0.5 + 0.5} = 31.9(N/A) \quad (10)$$

Lúc này phương trình tuyến tính hóa của HBM khe hở không khí phụ có thể viết như sau:

$$F_x = 31.9i_x + 19947x \quad (11)$$

Dòng khởi động nhỏ nhất để nâng rotor từ vị trí ở đỡ phụ cách tâm 0.4mm là:

$$i_k = \frac{-F_x(-0.4mm) + mg}{31.9} = \frac{-19947(-0.4)^{-3} + 9}{31.9} = 0.532A \quad (12)$$

Dòng điện nâng tối thiểu để giữ rotor ở vị trí cân bằng từ -0.1mm tới 1mm:

$$i_k = \frac{-F_x(-0.1mm) + mg}{31.9} = \frac{-19947(-0.1)^{-3} + 9}{31.9} = 0.345A \quad (13)$$

Thông qua các kết quả trên dễ dàng nhận thấy HBM với khe hở phụ có giá trị lực hút đẩy tuyến tính đáp ứng tốt trong miền làm việc với khoảng dịch nhỏ (-từ 0.1mm tới 0.1mm) và miền dòng điều khiển thay đổi (từ -0.5A tới 0.5A). Ngoài ra độ tuyến tính cao còn giúp quá trình điều khiển trở nên dễ dàng hơn và hệ sẽ đạt độ ổn định hơn. Tuy nhiên mô hình ổ từ với khe hở không khí phụ vẫn còn một hạn chế đó là từ thông tản tại vị trí khe hở không khí phụ như trong hình 6. Để khắc phục nhược điểm này tác giả đề xuất một mô hình HBM không dùng khe hở không khí, thay vào đó là một khe cách từ làm bằng vật liệu phi từ tính.

### 3. Phân tích và tính toán với HBM dùng khe cách từ

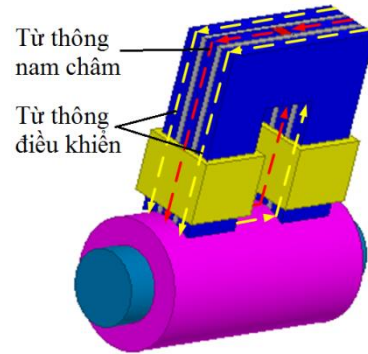
#### 3.1. Cấu tạo của HBM dùng khe cách từ

Cấu tạo của HMB với khe cách từ được thể hiện đầy đủ trong hình 9. Loại HBM này bao gồm bốn cực, bốn nam châm vĩnh cửu, mười hai cuộn dây điều khiển ghép cặp tạo thành bốn cặp cuộn dây điều khiển độc lập với nhau. Mỗi cực từ gắn bởi một phiên nam châm vĩnh cửu (màu đỏ) ở giữa của gông thép dẫn từ bên trong và được ngăn cách với phần gông thép dẫn từ bên ngoài bằng hai tấm cách từ (màu trắng) làm bằng vật liệu phi

từ tính có tác dụng ngăn cách để hạn chế các dòng từ thông tản của nam châm vĩnh cửu. Nam châm vĩnh cửu được làm từ vật liệu đất hiếm NdFe35, từ hóa của nam châm vĩnh cửu theo hướng dọc trục. Bốn cực từ được gắn đối xứng nhau vào khung stator bằng vật liệu hợp kim nhôm có độ bền cơ học cao. Rotor là vòng thép dẫn từ (màu tím) có lõi là vật liệu nhôm để tránh các dòng từ thông tạo ra ở các cực không gây nhiễu nhau trong rotor.

#### 3.2. Nguyên lý làm việc của HBM dùng khe cách từ

Do tính đối xứng và đồng bộ của các cực từ nên ở đây tác giả sẽ thể hiện đường từ thông mạch từ của một cực từ như Hình 10.

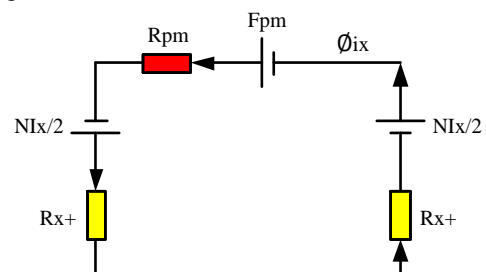


H. 9 Từ thông của HMB với khe cách từ

Nguyên lý làm việc của HBM với khe cách từ về cơ bản giống với HBM dùng khe hở không khí phụ. Điều khác biệt là đường từ thông sinh ra bởi nam châm và cuộn dây đi trong mạch được thông suốt hơn với các đường chung và đường riêng biệt. Đường màu đỏ biểu diễn từ thông của nam châm vĩnh cửu. Các đường màu vàng biểu diễn từ thông điều khiển do các cuộn dây sinh ra. Trên thực tế từ thông do cuộn dây điều khiển sinh ra một phần cũng đi cùng đường ở giữa với từ thông của nam châm vĩnh cửu.

#### 3.3. Tính toán theo mạch từ tương đương

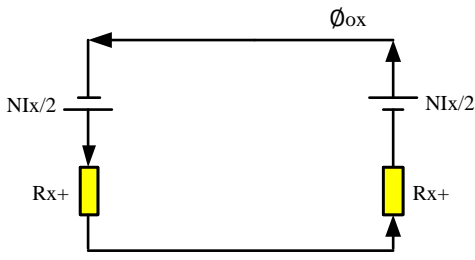
Từ thông trong cực từ được chia làm hai phần, phần thứ nhất đi qua phần giữa cực từ có gắn nam châm vĩnh cửu  $\Phi_i$  và phần thứ hai đi qua phần ngoài của cực từ không có nam châm vĩnh cửu  $\Phi_o$ . Mạch từ tương đương của từng phần được thể hiện chi tiết trong các hình 11 và hình 12.



H. 10 Mạch từ phần giữa có nam châm vĩnh cửu

Với  $F_{pm}$  là sức từ động của nam châm vĩnh cửu  $NIx/2$  là sức từ động của cuộn dây điều khiển mỗi bên  $R_{pm}$  là từ trở của nam châm,  $R_{x+}$  là từ trở của khe hở không khí giữa cực từ và Rotor. Tổng từ trở:

$$R_{ix} = R_{pm} + 2R_{x+} = R_{pm} + \frac{2 x_0 - x}{\mu_0 A_i} \quad (14)$$



H. 11 Mạch từ phần ngoài không có nam châm vĩnh cửu

$A_i$  là diện tích tiết diện trong chứa nam châm.  $A_i = k_i A$  với  $A$  là tổng diện tích tiết diện cực từ phần khe hở không khí.

$$R_{ix} = R_{pm} + \frac{2 x_0 - x}{\mu_0 k_i A} \quad (15)$$

Từ thông:

$$\phi_{ix} = \frac{F_{pm} + NIx}{R_{ix}} = \frac{F_{pm} + N(i_{0x} + i_x)}{R_{ix}} \quad (16)$$

$N$  là tổng số vòng dây của 2 cuộn dây hai bên cực từ.  $i_{0x}$  là dòng điện điều khiển tại vị trí rotor nằm cân bằng chính giữa,  $i_x$  là lượng thay đổi của dòng điện điều khiển khi rotor dịch chuyển lên một khoảng  $x$ .

Tổng từ trở:

$$R_{ox} = 2R_{x+} = \frac{2 x_0 - x}{\mu_0 A_o} \quad (17)$$

$A_o$  là diện tích tiết diện ngoài không chứa nam châm.  $A_o = k_o A$  với  $A$  là tổng diện tích tiết diện cực từ phần khe hở không khí.

$$R_{ox} = \frac{2 x_0 - x}{\mu_0 k_o A} \quad (18)$$

Từ thông:

$$\phi_{ox} = \frac{NIx}{R_{ox}} = \frac{N(i_{0x} + i_x)}{R_{ox}} \quad (19)$$

Lực từ của cực từ phía trên tác dụng lên rotor bằng tổng lực từ do từ thông phân giữa cực từ chứa nam châm và phần ngoài sinh ra. Khi đó lực từ được mô tả như sau:

$$F_{x+} = \frac{2\phi_{ix}^2}{\mu_0 A_i} + \frac{2\phi_{ox}^2}{\mu_0 A_o} \quad (20)$$

Thay (15), (16) và (18), (19) vào (20) tính được:

$$F_{x+} = \frac{2\mu_0 k_i A [F_{pm} + N(i_{0x} + i_x)]^2}{[\mu_0 k_i A R_{pm} + 2(x_0 - x)]^2} + \frac{\mu_0 k_o A N(i_{0x} + i_x)^2}{2(x_0 - x)^2} \quad (21)$$

Thực hiện tính toán tương tự được lực từ của cực từ phía dưới tác dụng lên rotor.

$$F_{x-} = \frac{2\mu_0 k_i A [F_{pm} + N(i_{0x} - i_x)]^2}{[\mu_0 k_i A R_{pm} + 2(x_0 + x)]^2} + \frac{\mu_0 k_o A N(i_{0x} - i_x)^2}{2(x_0 + x)^2} \quad (22)$$

Tổng hợp lực tác dụng lên rotor theo phương  $x$ ,

$$F_x = F_{x+} - F_{x-} \quad (23)$$

Thay (21) và (22) vào (23) rồi tuyến tính hóa được phương trình tuyến tính hóa lực tác dụng lên rotor.

$$F_x \approx \frac{\partial F_x}{\partial i_x} \Big|_{i_x=0} i_x - \frac{\partial F_x}{\partial x} \Big|_{i_x=0} x \quad (24)$$

Hệ số đầu của phương trình (24) là hệ số độ cứng dòng điện  $K_{ix}$ , hệ số thứ hai là hệ số độ cứng dịch chuyển ngang trục  $K_x$  của HMB được tuyến tính hóa ra kết quả sau:

$$K_{ix} = \frac{8\mu_0 k_i A N F_{pm} + Ni_{0x}}{\mu_0 k_i A R_{pm} + 2x_0} + \frac{2\mu_0 k_o A N^2 i_{0x}}{x_0^2} \quad (25)$$

$$K_x = -\frac{16\mu_0 k_i A F_{pm} + Ni_{0x}^2}{\mu_0 k_i A R_{pm} + 2x_0^3} - \frac{2\mu_0 k_o A Ni_{0x}^2}{x_0^3} \quad (26)$$

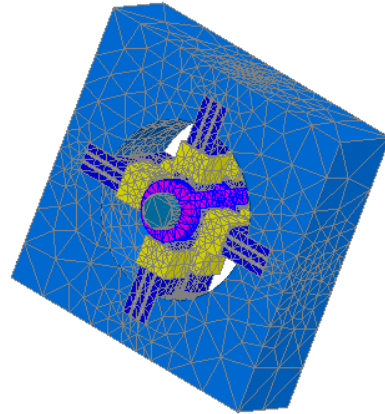
Vậy phương trình tuyến tính hóa lực từ theo trục  $x$  xác định như sau:

$$F_x \approx K_{ix} i_x - K_x x \quad (27)$$

Hệ số độ cứng dòng điện  $K_{ix}$  và hệ số độ cứng dịch chuyển ngang trục  $K_x$  thể hiện trực quan khả năng chịu tải ngang trục và độ ổn định của HMB.

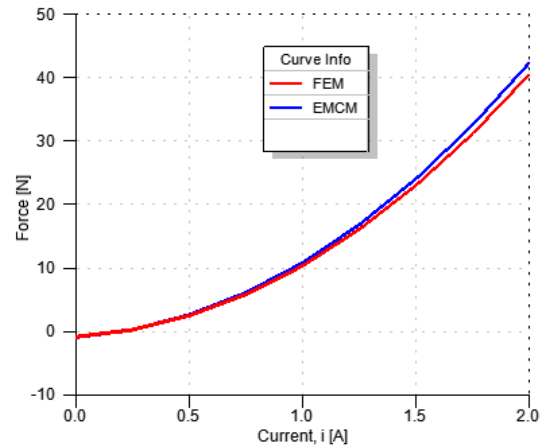
### 3.4. Tính toán theo phân tích phần tử hữu hạn

Các thông số chính của HMB dùng khe cách từ về cơ bản là giống với HMB khe hở không khí phụ, điều khác biệt là khe hở không khí phụ được thay bằng một khe cách từ dọc cực từ với độ dày 2.5mm



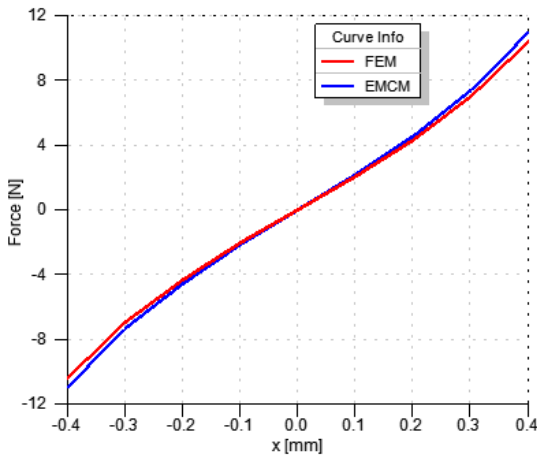
H. 12 Kết quả mô phỏng HMB khe cách từ bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Mô hình mô phỏng phần tử hữu hạn 3D được xây dựng bằng cách sử dụng ANSYS 17 cho HMB dùng khe cách từ được mô tả chi tiết trong hình 13. Chọn tính năng chia lưới thích nghi tự động, lưới này sẽ được bộ giải tự động chia lại nếu như không đáp ứng được các yêu cầu của bộ giải.



H. 13 Lực hút của cực từ phía trên lên rotor ứng với  $x = -0.4\text{mm}$

Khi cụm rotor ở trạng thái ban đầu nó được hỗ trợ bởi các ổ trục phụ và sự dịch chuyển hướng tâm  $x=0.4\text{ mm}$ . Ở trạng thái khởi động, dòng khởi động tối thiểu để đưa rotor lên vị trí chính giữa xuyên tâm được xác định thông qua khảo sát dòng điện đưa vào cực từ phía trên để nâng được rotor với khối lượng  $0.9\text{ kg}$  lên vị trí chính giữa xuyên tâm. Theo kết quả Hình 14 dòng điện khởi động tối thiểu  $i=1\text{ A}$  vì tại giá trị đó lực hút của cực từ phía trên tương ứng là  $10\text{N}$  lớn hơn trọng lượng của rotor. Từ đó ta có thể ước lượng sơ bộ giá trị dòng điện đặt khi rotor tại vị trí chính giữa là:  $i_0=i/2=0.5\text{A}$ .  
 Mỗi quan hệ của lực hướng tâm  $F_x$  với dòng điện điều khiển  $i_x$  và lực hướng tâm với độ dịch chuyển hướng tâm  $x$  xác định theo phương pháp tính toán mạch từ tương đương và phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn được thể hiện trong Hình 15 và Hình 16.

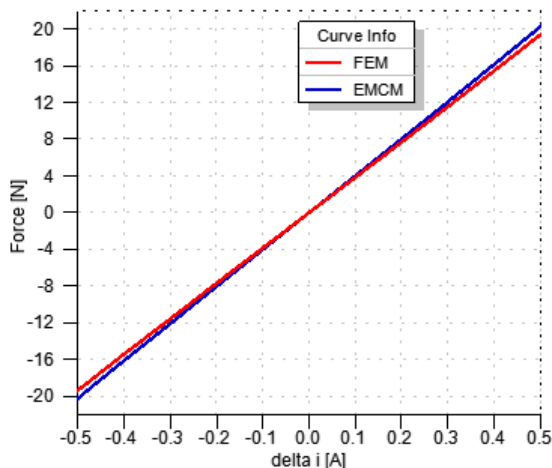


H. 14 Lực hướng tâm biên đổi theo độ dịch chuyển Rotor

Kết quả phân tích chỉ ra rằng kết quả tính toán theo phương pháp mạch từ tương đương nhất quán với kết quả mô phỏng FEM. Ngoài ra HMB với khe cách từ có mối quan hệ tuyến tính cao giữa lực hướng tâm với dòng điện điều khiển và lực hướng tâm với độ dịch chuyển trong khoảng  $(-0.1\text{mm}$  tới  $0.1\text{mm})$ . Độ cứng dịch chuyển  $K_x$  và độ cứng dòng điện  $K_{ix}$  được tính dựa theo kết quả tham chiếu tại Hình 15 và Hình 16 tương ứng là:

$$K_x = \frac{F_x(0.1\text{mm}) - F_x(-0.1\text{mm})}{0.1 + 0.1} = 20368(\text{N} / \text{m}) \quad (28)$$

$$K_{ix} = \frac{F_x(0.5\text{A}) - F_x(-0.5\text{A})}{0.5 + 0.5} = 38.8(\text{N} / \text{A}) \quad (29)$$



H. 15 Lực hướng tâm biên đổi theo dòng điện điều khiển

Lúc này phương trình tuyến tính hóa (14) có thể viết như sau:  
 $F_x = 38.8i_x + 20368x \quad (30)$

Dòng khởi động nhỏ nhất để nâng rotor từ vị trí ổ đỡ phụ cách tâm  $0.4\text{mm}$  là:

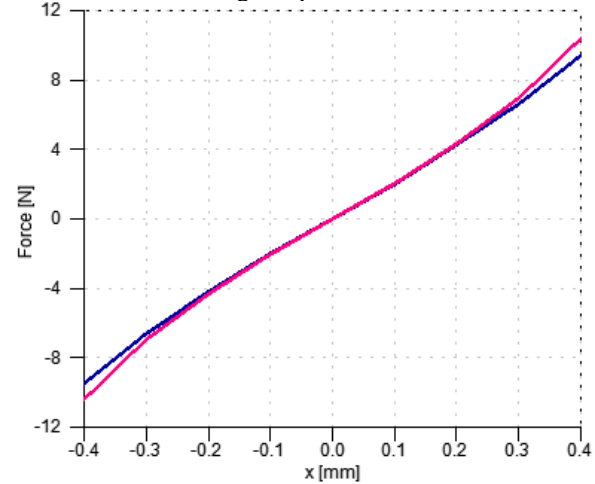
$$i_k = \frac{-F_x(-0.4\text{mm}) + mg}{38.8} = \frac{-20368(-0.4)^{-3} + 9}{38.8} = 0.442\text{A} \quad (31)$$

Dòng điện nâng tối thiểu để giữ rotor ở vị trí cân bằng từ  $-0.1\text{mm}$  tới  $1\text{mm}$ :

$$i_k = \frac{-F_x(-0.1\text{mm}) + mg}{38.8} = \frac{-20368(-0.1)^{-3} + 9}{38.8} = 0.284\text{A} \quad (32)$$

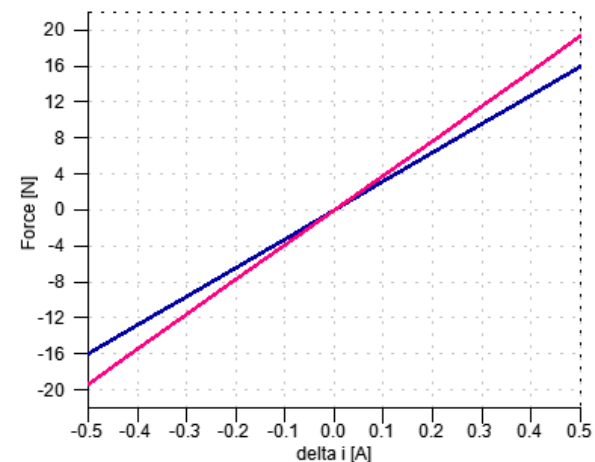
4. So sánh HMB khe hở không khí phụ và HMB khe hở cách từ

Trong phần này chúng ta sẽ so sánh khả năng làm việc của HMB khe hở không khí phụ với HMB khe hở cách từ đã được tính toán chi tiết trong các phần trên.



- Lực từ HMB có khe hở không khí phụ
- Lực từ HMB có khe hở cách từ

H. 16 So sánh HMB khe hở cách từ và AHMB khe hở không khí phụ - Lực hướng tâm biên đổi theo độ dịch chuyển Rotor



- Lực từ HMB có khe hở không khí phụ
- Lực từ HMB có khe hở cách từ

H. 17 So sánh HMB khe hở cách từ và AHMB khe hở không khí phụ - Lực hướng tâm biên đổi theo dòng điện điều khiển

Điều kiện tiên quyết để so sánh là các thông số cơ bản của hai loại HBM tương đương, chỉ có sự khác biệt là ở HMB khe hở không khí phụ có xê một khe hở không khí độ dày 1mm tại vị trí nam châm vĩnh cửu và gông dẫn từ sẽ là một khối thép đồng nhất chứ không ngăn cách bởi khe cách từ như ở HBM dùng khe hở cách từ. Các kết quả thu được được tổng hợp như trong Hình 17 và Hình 18.

Tổng hợp kết quả (9,10,12,13) và (28,29,31,32) được bảng thông số hiệu suất hai loại HBM như sau:

**Bảng 2.** Kết quả so sánh các thông số của hai loại HBM

Thông số	HMB khe hở không khí phụ	HMB khe cách từ
Độ cứng $K_x$ (N/m)	-19947	-20368
Độ cứng $K_{ix}$ (N/A)	31.9	38.8
Dòng khởi động nhỏ nhất (A)	0.532	0.442
Dòng điện treo tối đa	0.345	0.284

Ta dễ dàng thấy độ cứng dịch chuyển của HMB khe hở cách từ nhỏ hơn HMB khe hở không khí phụ nhưng đổi lại độ cứng dòng điện lại lớn hơn nhiều (khoảng 22%) vì vậy dẫn đến hiệu suất dòng điện khởi động của HMB khe cách từ là lợi hơn 0.442A so với 0.532A của HBM khe hở không khí phụ. Ngoài ra dòng điện treo tối thiểu của HMB khe cách từ chỉ là 0.284A so với 0.345A của HBM dùng khe hở không khí. Nói cách khác là năng lượng tiết kiệm được của HMB khe cách từ so với HMB khe hở không khí phụ là khoảng 18% trong suốt quá trình hoạt động.

## 5. Kết luận

Bài báo này trình bày chi tiết về đánh giá hoạt động của loại HBM có khe hở không khí phụ và đưa ra phương án cải tiến thành khe cách từ sử dụng vật liệu cách điện để giảm từ thông tản. Thông qua kết quả tính toán theo phương pháp mạch từ tương đương và mô phỏng phần tử hữu hạn cho thấy loại HBM dùng khe cách từ có nhiều ưu điểm như độ cứng dòng điện lớn, lực hướng tâm cao, dòng điện khởi động nhỏ và năng lượng tiêu hao trong quá trình hoạt động giảm so với mô hình HMB khe hở không khí.

## Tài liệu tham khảo

- [1] V. Babuska, S.M. Beatty, B.J. DeBlonk, et al., *A review of technology developments in flywheel attitude control and energy transmission systems*, in: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, vol. 4, March 2004, pp. 2784–2800. ddsfsd
- [2] J.M.D. Coey, *Permanent magnet applications*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2002) 441–456. fsdsfsd
- [3] T. Ohji, S. Ichiyama, K. Amei, et al., *A new conveyor system based on a passive magnetic levitation unit having repulsive-type magnetic bearings*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2004) e1731–e1733. dsdsd
- [4] A. Hamler, V. Gorican, B. Stumberger, et al., *Passive magnetic bearing*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2004) 2379–2380.
- [5] R.B. Zmood, L.J. Qin, J.A. Kirk, et al., *A magnetic bearing system design methodology and its application to a 50Wh open core composite flywheel*, in: Proceedings of the Energy Conversion Engineering Conference 32nd Intersociety, vol. 27 (4), August 1997, pp. 2306–2311. sgdsgsdgsd

- [6] Alexei V. Filatov, Patrick T. McMullen, Lanvance A. Hawking, et al., *Magnetic bearing actuator design for a gas expander generator*, in: Proceedings of the Ninth International Symposium on Magnetic Bearings, Lexington Kentucky, USA, pp. 81–86, August 3–6, 2004.
- [7] Brian T. Murphy, Hamid Ouroua, Matthew T. Caprio, John D. Herbst, *Permanent magnet bias, homopolar magnetic bearings for a 130 kW-hr composite flywheel*, in: Proceedings of the Ninth International Symposium on Magnetic Bearings, Lexington Kentucky, USA, pp. 66–72, August 3–6 2004. sgsgsgsg
- [8] Xu. Yanliang, Dun. Yueqin, Wang. Xiuhe, et al., *Analysis of hybrid magnetic bearing with a permanent magnet in the rotor by FEM*, IEEE Transactions on Magnetics 42 (4) (2006) 1363–1366.
- [9] Sun Jinji n , Fang Jiancheng, *A novel structure of permanent-magnet-biased radial hybrid magnetic bearing*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 323 (2011) pp. 202–208.
- [10] Vũ Đình Đạt, Nguyễn Quang Địch và Nguyễn Huy Phương. *Analysis and Comparison of the 4-pole 2DOF-HMBs*. Measurement, Control, and Automation (2020), Vol. 1, No. 2, pp 1-6.