

# Thiết kế điều khiển tách kênh trong hệ thống truyền động điện có tích hợp ổ đỡ từ

## Decoupling control design for electric drive system with integrated magnetic bearings

Nguyễn Như Hiền, Trần Xuân Minh  
Đặng Danh Hoàng, Dương Quốc Tuấn  
Đại học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên  
E-mail: [duongquoctuan-tdh@tnut.edu.vn](mailto:duongquoctuan-tdh@tnut.edu.vn)

Vũ Duy Hưng  
Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

E-mail: [vuduhu@gmail.com](mailto:vuduhu@gmail.com)

### Tóm tắt

Trường hợp hệ thống truyền động điện phải đáp ứng đòi hỏi tốc độ làm việc rất lớn; làm việc trong môi trường chân không hay có nhiệt độ rất cao hoặc rất thấp; làm việc trong môi trường không được phép dùng dầu mỡ bôi trơn ổ trục,..., có thể sử dụng loại động cơ điện có cấu trúc đặc biệt với việc tích hợp ổ đỡ từ ở hai đầu trục quay. Do vậy, trục động cơ ngoài chuyển động quay, sẽ có thêm 5 chuyển dịch tịnh tiến theo các phương x, y, z. Khi đó, sẽ xuất hiện hiện tượng xen kênh giữa hai hệ hai trục vuông góc của các ổ đỡ từ. Bài báo này đề xuất giải pháp điều khiển tách kênh động nhằm khắc phục hiện tượng này.

**Từ khóa:** Ổ đỡ từ chủ động, Động cơ đồng bộ từ thông dọc trục kích từ nam châm vĩnh cửu.

**Abstract:** In many cases, electric drive systems have to meet special requirements such as very high speed, extreme temperature, vacuum working conditions, working environment without lubricant... In order to meet these requirements, axial flux permanent magnet motors can be used in combination with integrated magnetic bearings at the ends of the motor shaft. Therefore, apart from rotating motion of the rotor, there will be five translating displacement along x, y, z directions. At that time, there will be interference between two perpendicular coordinate systems attached to the magnetic bearings. This paper proposes the application of dynamic decoupling control to eliminate the interference.

**Keywords:** active magnetic bearing, axial flux permanent magnet.

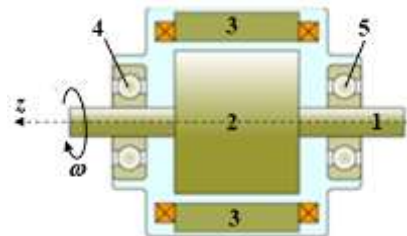
### Chữ viết tắt

ABM	active magnetic bearing
AFPM	axial flux permanent magnet
SISO	single input – single output
MIMO	multi input – multi output

### 1. Phần mở đầu

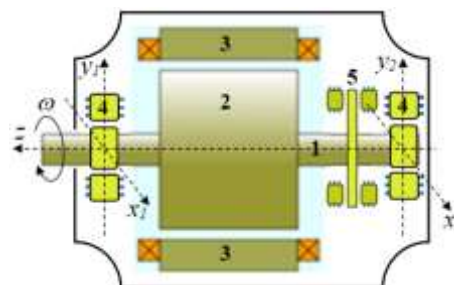
Trong các hệ thống truyền động điện thông dụng, sử dụng vòng bi cơ khí ở hai đầu trục với các loại động cơ điện xoay chiều ba pha (đồng bộ, không đồng bộ), chỉ có một bậc tự do ( $\omega$ ) được minh họa như trên **H.1**.

Với vận tốc góc tối đa khi có một đôi cực ( $n_p = 1$ ) là  $\omega = 314$  (1/s) ở tần số 50Hz. Động cơ điện một bậc tự do cũng được chế tạo để làm việc trong số môi trường đặc biệt như phòng cháy nổ hoặc ngâm trong nước,...



**H.1** Mặt cắt mô hình động cơ điện thông dụng một bậc tự do (1: Trục; 2: Rotor; 3: Stator và dây quấn; 4: Vòng bi trái; 5: Vòng bi phải).

Khi xuất hiện các yêu cầu đặc biệt của hệ thống truyền động điện như: đòi hỏi tốc độ quay rất lớn ( $>10.10^3$  v/ph); phải làm việc trong môi trường chân không hay có nhiệt độ rất cao hoặc rất thấp hoặc khi phải làm việc trong môi trường không được phép dùng dầu mỡ bôi trơn ổ trục,... Lúc đó, nếu sử dụng động cơ thông dụng, ta phải tích hợp thêm các ổ từ như trên **H.2**. Hai đầu trục động cơ được đỡ bằng hai ổ từ hướng tâm, đó là loại vòng bi từ không tiếp xúc với trục khi quay, cho nên phải có thêm một ổ từ dọc trục để chặn chuyển dịch dọc trục của rotor động cơ. Như vậy, bậc tự do của của hệ là sáu ( $\omega$ , z,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$  và  $y_2$ ), đồng thời cũng làm cho kích thước động cơ trở nên cồng kềnh hơn [1, 2, 3, 4].

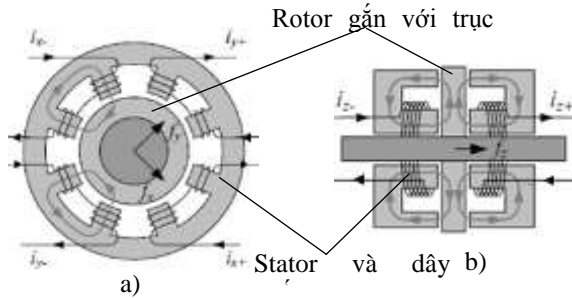


**H.2** Mặt cắt mô hình động cơ điện thông dụng - ổ từ có sáu bậc tự do (1: Trục; 2: Rotor; 3: Stator và dây quấn; 4: Ổ từ hướng tâm; 5: Ổ từ dọc trục).

Ổ đỡ từ chủ động (AMB) là loại có thể điều chỉnh được lực điện từ bằng dòng điện như trên **H.3**, nó có cấu tạo giống động cơ điện (stator xẻ rãnh và đặt dây

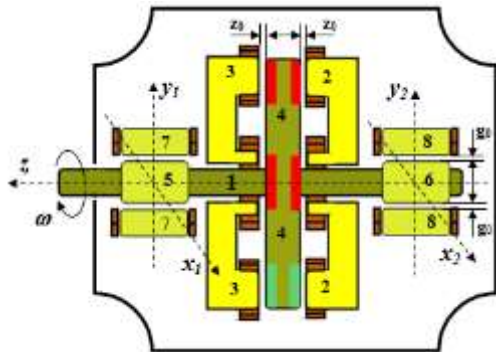
quấn, rotor làm bằng vật liệu từ tính đặc biệt) nhưng nguyên lý làm việc của nó lại giống nam châm điện [1, 2, 3].

Thay vì sinh mô men cho trục quay, ổ từ (vòng bi từ) lại sinh ra các lực nâng ở ngang trục. Lực nâng từ trường theo các phương  $x, y$  làm cho rotor động cơ quay mà không có tiếp xúc với phần tĩnh như ổ bi thông thường. Cũng chính vì không có tiếp xúc nên trục động cơ có khả năng chuyển dịch dọc trục, cho nên cần thêm một ổ từ dọc trục.



**H.3** Cấu tạo ổ từ chủ động (AMB) (a: Ổ đỡ từ hướng tâm; b: Ổ đỡ từ dọc trục).

Để thu gọn kích thước cho động cơ và nâng cao khả năng điều chỉnh tốc độ cũng như tận dụng các ưu điểm của động cơ từ thông dọc trục nam châm vĩnh cửu (NCVC) như: Hiệu suất và hệ số công suất cao; Công suất lớn; Không có vành góp – chổi than; Có khả năng mô đun hóa (lắp ghép dọc trục từ 1 đến nhiều modul) để tăng mô men,... Bài báo này đề xuất sử dụng một loại động cơ có cấu trúc đặc biệt được giới thiệu trên **H.4** [3, 4, 5, 6].

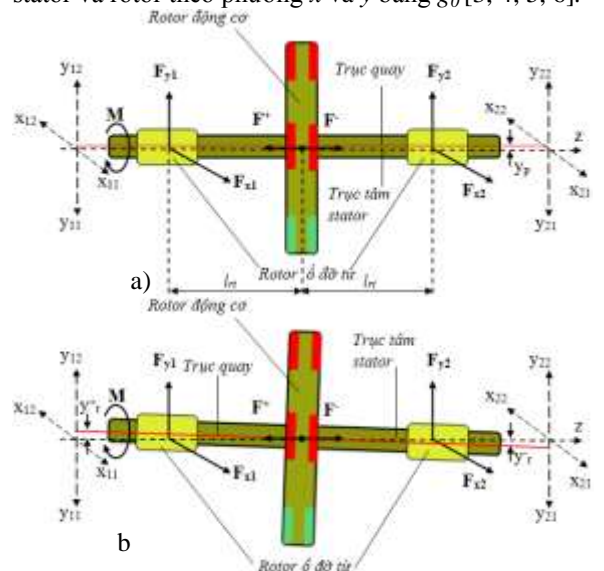


**H.4** Mặt cắt động cơ điện dòng bộ từ thông dọc trục kích từ NCVC có tích hợp ổ đỡ từ hai đầu trục (1: Trục; 2, 3: Stator và dây quấn của động cơ phía phải và phía trái; 4: Rotor nam châm vĩnh cửu của động cơ; 5,6: Rotor ổ đỡ từ bên trái và bên phải; 7,8: Stator và dây quấn của ổ đỡ từ bên trái và bên phải;  $z_0, g_0$ : Khe hở danh định giữa rotor và stator của động cơ và ổ từ).

Động cơ có hai stator ở hai bên và rotor nam châm vĩnh cửu kép hình đĩa ở giữa. Với cấu trúc đặc biệt này làm cho động cơ vừa có khả năng sinh mô men quay trên trục, vừa có khả năng sinh ra lực đẩy kéo dọc trục nhằm giữ cho rotor luôn ở vị trí danh định (mô hình toán của động cơ và ổ từ có thể xem trong [9]). Do không phải sử dụng thêm ổ từ dọc trục như đối với động cơ thông dụng có tích hợp ổ từ, cho nên kích thước động cơ cũng như hệ truyền động cũng được giảm đi đáng kể.

Đề rõ hơn về số bậc tự do cũng như các lực và mô men xuất hiện trong động cơ này, ta xem xét tiếp **H.5**. Trước hết, động cơ có cấu trúc đặc biệt như trên vì nó phải thực hiện hai chức năng: Chức năng thứ nhất là động cơ điện đồng bộ từ thông dọc trục rotor nam châm vĩnh cửu sinh ra mô men quay  $M$ ; chức năng thứ hai như một nam châm điện phân cực kép sinh ra các lực đẩy kéo  $F^+$  và  $F^-$  để giữ cho rotor ở vị trí danh định ( $z_0$ ) so với stator, chặn các chuyển dịch dọc trục  $z$  của rotor.

Ổ đỡ từ trong quá trình làm việc do bị nhiễu (chủ yếu là nhiễu tải) sẽ có hiện tượng trục quay (đường màu đỏ trên **H.5a,b**) chuyển dịch song song với trục stator ( $z$ ) trong mặt phẳng  $xz$  và mặt phẳng  $yz$  tạo ra các khoảng cách  $x_p$  và  $y_p$  so với trục  $z$ . Mặt khác, trục quay cũng có thể bị nghiêng so với trục tâm stator trong mặt phẳng  $xz$  và  $yz$ , tổng quát trục quay sẽ tạo nên một hình nón xung quanh trục tâm stator trong các mặt phẳng tương ứng gọi là chuyển động hồi chuyển (gyroscopic effects). Chính các lực  $F_x$  và  $F_y$  sẽ giữ cho rotor ở vị trí danh định với khe hở giữa stator và rotor theo phương  $x$  và  $y$  bằng  $g_0$  [3, 4, 5, 6].



**H.5** Lực và mô men tác động đến rotor của động cơ và ổ đỡ từ ( $F^+, F^-$ : Lực dọc trục tác dụng lên rotor động cơ;  $M$ : Mô men quay trục động cơ;  $F_{x1}, F_{x2}, F_{y1}, F_{y2}$ : Lực hướng tâm tác dụng lên rotor các ổ đỡ từ. Các khả năng tạo nên chuyển dịch của trục rotor: Tịnh tiến (a) hoặc bị nghiêng (b) theo trục  $y$  do nhiễu, tương tự đối với trục  $x$ ).

Bài báo này được cấu trúc thành 4 phần: Phần 2 dành để phân tích hiện tượng xen kênh của hệ có hai hệ hai trục vuông góc ( $x_1, y_1$  và  $x_2, y_2$ ); Phần 3 nêu giải pháp tách kênh động cho bài toán MIMO có tác động xen kênh; Phần 4 là thiết kế điều khiển và kiểm chứng bằng mô phỏng cho hệ hai ổ đỡ từ tích cực.

## 2. SỰ XEN KÊNH CỦA HAI HỆ 2 TRỤC VUÔNG GÓC

Khi chỉ xét một ổ đỡ từ, ta có một hệ hai trục vuông góc là  $x$  và  $y$ . Các lực hướng tâm được sinh ra là thẳng hàng trong hệ hai trục vuông góc này, các trục này thường trùng với các chuyển vị  $x$  và  $y$ . Đối với hệ thống ta đang xét bao gồm hai bộ AMB hướng kính

được bố trí tại hai đầu trục động cơ về phía trái và phải. Bộ AMB1 tạo ra các lực hướng kính theo trục  $x_1$  và  $y_1$ . Bộ AMB2 tạo ra các lực hướng kính theo trục  $x_2$  và  $y_2$ . Như vậy, ta có hai hệ hai trục vuông góc. Các chuyển động của trục rotor có thể được biểu diễn bằng chuyển dịch tịnh tiến và chuyển dịch nghiêng. Trên **H.5a** mô tả cụ thể về chuyển dịch tịnh tiến, trục quay (đường màu đỏ) của rotor di chuyển song song với trục tâm cố định ( $z$ ) của stator. Khi đó cả hai rotor của hai bộ AMB dịch chuyển tịnh tiến một lượng  $y_p$  theo hướng trục  $y$  (tương tự  $x_p$  như với trục  $x$ ). Trên **H.5b** mô tả chuyển động nghiêng trục, giả sử trục quay rotor bị xoay đi theo phương  $y$ . Rotor phải và rotor trái dịch chuyển đi một lượng tương ứng là  $y_r$  và  $-y_r$ . Trong chuyển dịch nghiêng này, trục quay rotor bị xoay đi một góc nhất định so với trục tâm cố định của stator (tương tự  $x_r$  và  $-x_r$  với trục  $x$ ) [1, 2]. Chuyển dịch hướng kính của rotor được diễn tả bởi các chuyển dịch tịnh tiến và nghiêng sao cho:

$$\begin{cases} x_1 = x_p + x_r \\ y_1 = y_p + y_r \\ x_2 = x_p - x_r \\ y_2 = y_p - y_r \end{cases} \quad (1)$$

Các lực tịnh tiến và các lực nghiêng cũng có thể được mô tả dựa trên các lực hướng kính của AMB như sau:

$$\begin{cases} F_{xp} = F_{x1} + F_{x2} \\ F_{yp} = F_{y1} + F_{y2} \\ F_{xr} = F_{x1} - F_{x2} \\ F_{yr} = F_{y1} - F_{y2} \end{cases} \quad (2)$$

Các phương trình động lực học đối với chuyển động tịnh tiến phải được xem xét trên thực tế là lực hướng kính được sinh ra bởi cả hai bộ AMB [1, 2, 8]:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_p &= F_{xp} + 2k_x x_p \\ m\ddot{y}_p &= F_{yp} + 2k_y y_p - mg_a \end{aligned} \quad (3)$$

Lưu ý rằng lực trọng trường của trục rotor có khối lượng  $m$  được đặt theo chiều âm (-) trên trục  $y$ . Các biến đầu vào và đầu ra là các lực hướng kính và độ chuyển dịch.

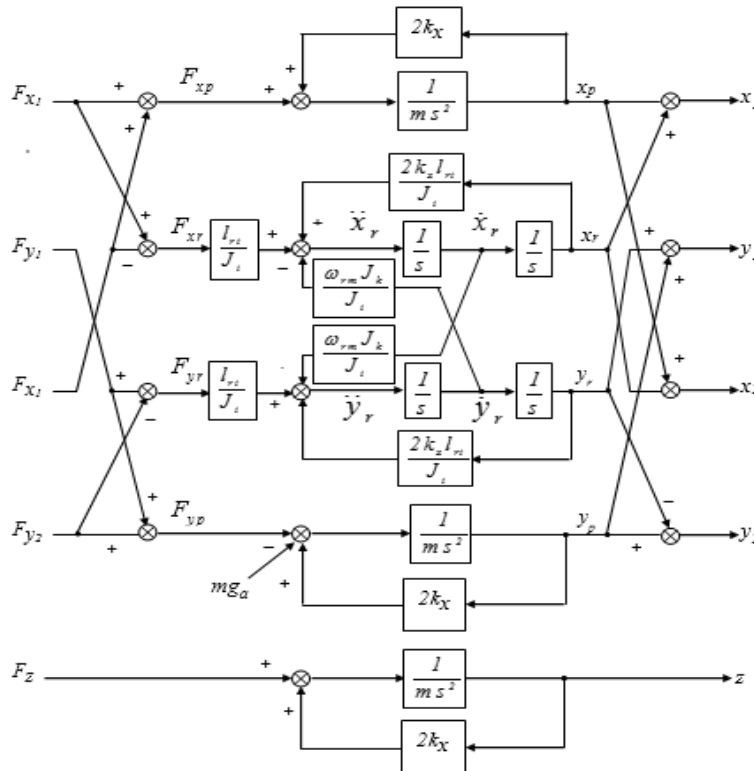
Đối với chuyển động nghiêng, các phương trình động lực học được xây dựng phức tạp hơn rất nhiều.

Các phương trình động lực học được xây dựng cho hệ thống hai bậc tự do đã cho thấy rằng nếu trục rotor nghiêng đi một góc bằng  $y_r/l_r$  thì nó sẽ có một gia tốc góc bằng  $\ddot{x}_r/l_r$ . Momen ngoại sinh là tổng của các thành phần momen sinh ra từ dòng điện điều khiển và độ chuyển dịch, ví dụ như  $F_{yr}l_r$  và  $(2k_x y_r)l_r$ .

Do vậy, các phương trình vi phân cho chuyển động nghiêng được biểu diễn như sau [1], [2]:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_r &= \frac{w_{rm} J_k}{J_i} \ddot{x} + \frac{2k_x l_r^2}{J_i} y_r + \frac{l_r^2}{J_i} F_{yr} \\ \ddot{y}_r &= -\frac{w_{rm} J_k}{J_i} \ddot{x} + \frac{2k_x l_r^2}{J_i} x_r + \frac{l_r^2}{J_i} F_{xr} \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó,  $J_i$  và  $J_k$  là các momen quán tính tương ứng quanh các trục  $x$  và  $z$ . Trên **H.7**, mô hình hóa cho các phương trình (1), (2), (3) và (4). Riêng trục  $z$  không bị ảnh hưởng tác động xen kênh của hai hệ hai trục  $x, y$ .



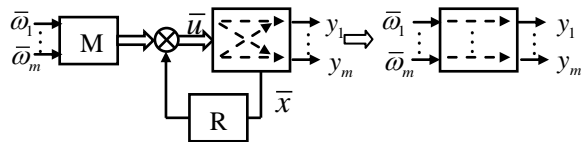
**H. 6** Tác động xen kênh của hai hệ hai trục vuông góc

### 3. PHƯƠNG PHÁP TÁCH KÊNH ĐỘNG CHO HỆ AMB CÓ BỐN BẬC TỰ DO

#### 3.1. Mục đích của tách kênh động

Có rất nhiều bộ điều khiển được ứng dụng thành công lại chỉ dùng cho hệ SISO, ví dụ PID chẳng hạn. Vì mong muốn sử dụng các bộ điều khiển đó cho hệ MIMO người ta đã nghĩ đến việc can thiệp sơ bộ vào hệ MIMO, biến một hệ thống MIMO thành nhiều hệ thống SISO với mỗi đầu ra  $y_i(t)$  chỉ phụ thuộc vào một đầu vào  $w_i(t)$ .

Để tách kênh ta phải xác định các bộ điều khiển tiền xử lý  $R$  và điều khiển phản hồi trạng thái  $M$  như mô tả trên H.7, sao cho đầu ra  $y_i(t)$  chỉ phụ thuộc vào một tín hiệu đầu vào  $w_i(t)$  với  $i = 1, 2, \dots, m$ . Sự phụ thuộc đó được mô tả trong miền thời gian bởi phương trình vi phân bậc  $r_i$  hệ số hằng:



H.7 Mục đích của điều khiển tách kênh

$$a_{i0}y_i + a_{i1} \frac{dy_i}{dt} + \dots + a_{i,r_i-1} \frac{d^{r_i-1}y_i}{dt^{r_i-1}} + a_{ir} \frac{d^{r_i}y_i}{dt^{r_i}} = b_i w_i$$

$$\hat{U} \frac{d^{r_i}y_i}{dt^{r_i}} + \hat{a}_{ik} \frac{d^k y_i}{dt^k} = b_i w_i$$

Trong đó:  $b_i, a_{ik}, i = 1, 2, \dots, m, k = 0, 1, \dots, r_i - 1$  là các tham số tự do được lựa chọn tùy ý theo chất lượng đặt trước của từng kênh. Nói cách khác, nhiệm vụ thiết kế đặt ra ở đây là phải xác định hai bộ bộ điều khiển tiền xử lý  $R$  và điều khiển phản hồi trạng thái  $M$  để với nó hệ kín có ma trận hàm truyền dạng đường chéo [8]:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_1(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_2(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_3(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_4(s) \end{bmatrix} \quad (5a)$$

Với các phần tử  $G_i(s)$  là những hàm truyền đạt:

$$G_i(s) = \frac{b_i}{a_{i0} + a_{i1}s + \dots + a_{i,r_i-1}s^{r_i-1} + s^{r_i}} \quad (5b)$$

Trong đó:  $b_i, a_{ik}, i = 1, 2, \dots, m, k = 0, 1, \dots, r_i - 1$  cho trước tương ứng với chất lượng mong muốn của từng kênh.

**3.2. Tách kênh động cho hệ AMB có bốn bậc tự do**  
Mô hình không gian trạng thái của AMB 4 bậc tự do như sau được xuất phát từ hệ phương trình vi phân (3) và (4), biểu diễn cho các chuyển động tịnh tiến và chuyển động nghiêng của 2 bộ AMB 4 DOF có thể thể hiện dưới dạng phương trình vi phân ma trận tổng quát như sau:

$$M\ddot{q} + G\dot{q} + Dq + B_f F \quad (5c)$$

Trong đó,  $M, G, D, B_f$  là các ma trận hệ số của phương trình vi phân ma trận.

$$M = \begin{bmatrix} J_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, J_k w_{rm}$$

$$q = \begin{bmatrix} y_r \\ x_p \\ y_r \\ x_p \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{yr} \\ F_{xp} \\ F_{yr} \\ F_{xp} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} K_s l_r^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2K_s l_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2K_s \end{bmatrix}$$

Với  $F_{yr}; F_{xp}; F_{xr}; F_{yp}$  được tính theo công thức (2).

Từ công thức tính lực của AMB [1]:

$F_x(x, i) = K_i i_x + K_s x = m\ddot{x}$ , kết hợp với (2) và (3) được mối quan hệ vector lực điện từ biểu diễn cho 2 bộ AMB:

$$\underline{F} = -K_s \underline{q}_b + K_i \underline{i} \quad (6)$$

Trong đó,

$$K_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_{sA} & -K_{sB} \\ K_{sA} & -K_{sB} & 0 & 0 \\ K_{sA} & K_{sB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{sA} & K_{sB} \end{bmatrix}, \underline{q}_b = \begin{bmatrix} x_{bA} \\ x_{bB} \\ y_{bA} \\ y_{bB} \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_{iA} & -K_{iB} \\ K_{iA} & K_{iB} & 0 & 0 \\ K_{iA} & -K_{iB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{iA} & K_{iB} \end{bmatrix}, \underline{i} = \begin{bmatrix} i_{xA} \\ i_{xB} \\ i_{yA} \\ i_{yB} \end{bmatrix}$$

$\underline{q}_b$ : là vector chuyển vị của rotor trong 2 bộ AMB.

$\underline{i}$ : là vector dòng điện điều khiển cho bốn cơ cấu điện từ của 2 bộ AMB.

Kết hợp các thành phần mô tả cho mô hình rotor (5) và phép biểu diễn lực nâng tuyến tính hóa (6) ta có được phương trình vi phân ma trận của chuyển động cho rotor cứng được nâng bởi các bộ AMB:

$$M\ddot{q} + G\dot{q} + Dq + B_f(-K_s \underline{q}_b + K_i \underline{i}) \quad (7)$$

$$y = Cq$$

Trước khi có thể thiết kế một luật điều khiển cho (7), một vấn đề gặp phải ở đây liên quan đến lựa chọn hệ quy chiếu. Đối với mô tả chuyển động của hệ quy chiếu tâm khối (Center of Gravity - COG) được biểu diễn qua vector  $q$ . Phép biểu diễn này sẽ khiến cho cấu trúc toán học trong các phương trình vi phân vừa xây dựng trở nên đơn giản hơn. Tuy nhiên, lực nâng điện từ lại liên quan đến vị trí rotor tại các ổ đỡ. Do đó, hệ quy chiếu ổ đỡ  $q_b$  được dùng để biểu diễn cho các ổ đỡ với ma trận  $K_s$  [2].

Để có thể khảo sát được các thuộc tính của hệ thống điều khiển vòng kín được tạo ra thì nhất thiết phải biểu diễn chuyển động của rotor chi trong một hệ quy chiếu. Bằng cách sử dụng ma trận chuyển vị tuyến tính  $T_s$ , ta có thể chuyển đổi hệ quy chiếu ở đỡ  $q_b$  sang hệ quy chiếu COG. Phép biến đổi này liên quan đến các đại lượng hình học  $l_{rt}$  được thể hiện như trong H.5a [2].

$$q_b = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{bA} & \ddot{y}_{bA} & \ddot{x}_{bB} & \ddot{y}_{bB} \\ \ddot{x}_{rA} & \ddot{y}_{rA} & \ddot{x}_{rB} & \ddot{y}_{rB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_{rt} & 1 \\ 0 & 0 & 1 & l_{rt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_r & \ddot{y}_r \\ \ddot{x}_p & \ddot{y}_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$q_b = T_s' q$$

Do vậy, bằng cách thay (8) vào (7), ta thu được phương trình vi phân ma trận biểu diễn thuần túy trong hệ quy chiếu  $q$  như sau:

$$M \ddot{q} + (D - B_f K_s T_s) \dot{q} + B_f K_i i \quad (9)$$

ta đặt:

$$X = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}; U = \dot{i}; Y = [x_{bA} \ y_{bB} \ y_{bA} \ x_{bB}] \quad (10)$$

Mô hình không gian trạng thái của toàn hệ thống AMB 4 DOF sẽ là:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ M^{-1}(D - B_f K_s T_s) & M^{-1} G \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ M^{-1} B_f K_i & 0 \end{bmatrix}; C = [I_{4 \times 4} \ 0_{4 \times 4}]; D = [0_{4 \times 4}]$$

Bảng thông số của một hệ thống AMB 4 DOF cụ thể được sử dụng trong phần này [8].

Bảng 1. Các thông số của AMB 4 DOF[19]:

Trọng lượng rotor (kg)	$m = 12,4$
Khoảng cách từ tâm khối đến rotor của AMB (m)	$l_{rt} = l_a = l_b = l_c = l_d = 0,21$
Momen quán tính trên trục $k$ ( $kg.m^2$ )	$J_k = 6,88.10^{-3}$
Momen $q$ tính trên trục $i$ và $j$ ( $kg.m^2$ )	$J_i = J_j = 2,22.10^{-1}$
Tốc độ của rotor (v/ph)	10.000
Hệ số lực điện từ - dòng điện (N/A)	$K_i = 158$
Hệ số lực ã từ - độ chuyển dịch (N/m)	$K_s = 1,58.10^6$
Gia tốc trọng trường ( $kg.m/s^2$ )	$g = 9,81$

Từ đây, ta tìm ra được các ma trận hệ thống A, B, C, D cho (11).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1.8478 \cdot 10^5 & 0 & -38804 & 0 & 0 & 0 & 309.91 & 0 \\ -15753 & -75016 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.8478 \cdot 10^5 & -1.8478 \cdot 10^5 & 0 & -309.91 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20.327 & -20.327 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8.252 & 8.252 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 20.327 & -20.327 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8.252 & 8.252 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = [0_{4 \times 4}]$$

Theo công thức:  $G(s) = C(sI - A)^{-1} B$

Hệ sẽ có ma trận hàm truyền đạt:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) & G_{14}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) & G_{24}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) & G_{34}(s) \\ G_{41}(s) & G_{42}(s) & G_{43}(s) & G_{44}(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Từng phần tử của  $G_{ik}(s)$  của ma trận  $G(s)$  chính là hàm truyền đạt giữa tín hiệu vào  $u_k(t)$  và tín hiệu ra  $y_i(t)$  được xác định theo công thức sau:

$$G_{ik}(s) = \frac{1}{\det(sI - A)} c_i^T (sI - A)_{adj} b_k \quad (13)$$

Các bước tiến hành tính  $M, R$  như sau:

Bước 1: Xác định bậc tối thiểu của (11) được định nghĩa trong [8] thông qua công thức:

$$r_i = \begin{cases} \min(j | c_i^T A^{j-1} B^{-1} \neq 0, j = 1, 2, K, n-1) \\ n-1; c_i^T A^{j-1} B = 0^T, j = 1, 2, K, n \end{cases} \quad (14)$$

$$c_1^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; c_1^T AB = [0 \ 0 \ 20.327 \ -20.327]^T \Rightarrow r_1 = 2$$

$$c_2^T = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; c_2^T AB = [8.252 \ 8.252 \ 0 \ 0]^T \Rightarrow r_2 = 2$$

$$c_3^T = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; c_3^T AB = [20.327 \ -20.327 \ 0 \ 0]^T \Rightarrow r_3 = 2$$

$$c_4^T = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; c_4^T AB = [0 \ 0 \ 8.252 \ 8.252]^T \Rightarrow r_4 = 2$$

Bước 2:

Chọn các hệ số  $b_1, b_2, b_3, b_4, a_{10}, a_{20}, a_{30}, a_{40}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}$  với điều kiện để cho hệ không có sai lệch tĩnh và từng kênh ổn định. Dựa vào số liệu đã cho trong bảng 1, căn cứ vào tính đối xứng các phương của hệ ở từ bốn bậc tự do, ta chọn:  $b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = a_{10} = a_{20} = a_{30} = a_{40} = 508$

$$a_{11} = a_{12} = a_{13} = a_{14} = 640$$

Bước 3: Lập các ma trận  $E, L, F$  và tính  $M, R$  theo [8]:

$$E = \begin{bmatrix} c_1^T A^{n-1} B & c_1^T AB \\ c_2^T A^{n-1} B & c_2^T AB \\ c_3^T A^{n-1} B & c_3^T AB \\ c_4^T A^{n-1} B & c_4^T AB \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 20.327 & -20.327 \\ 8.252 & 8.252 & 0 & 0 \\ 0.327 & -20.327 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8.252 & 8.252 \end{bmatrix}$$

$$E^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.06059 & 0.024598 & 0 \\ 0 & 0.06059 & -0.024598 & 0 \\ 0.024598 & 0 & 0 & 0.06059 \\ 0.024598 & 0 & 0 & 0.06059 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Nhận xét: ma trận  $E$  thu được là khả nghịch, do đó hệ thống (11) hoàn toàn có thể tách kênh động được bằng phản hồi trạng thái.

$$L = \begin{bmatrix} 508 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 508 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 508 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 508 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} a_{10}c_1^T + a_{11}c_1^T + c_1^T A^2 \\ a_{20}c_2^T + a_{21}c_2^T + c_2^T A^2 \\ a_{30}c_3^T + a_{31}c_3^T + c_3^T A^2 \\ a_{40}c_4^T + a_{41}c_4^T + c_4^T A^2 \end{bmatrix}$$

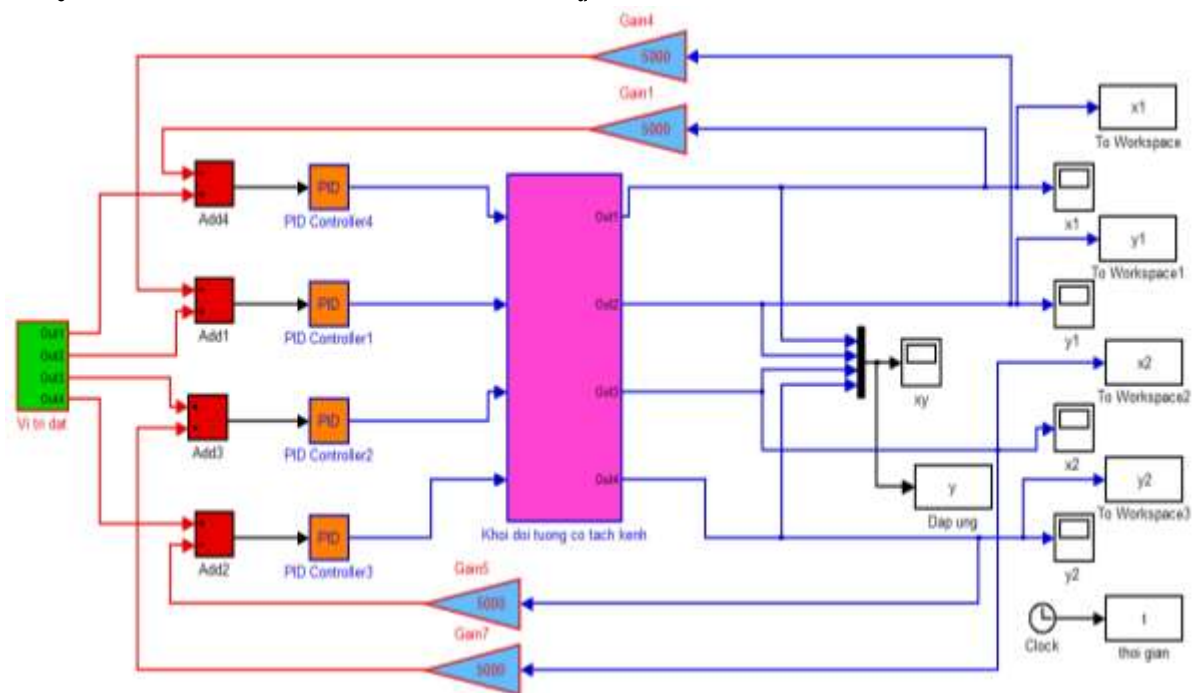
$$F = \begin{bmatrix} 1.84 \cdot 10^5 & 0 & -38804 & 0 & 0 & 0 & 309.910 \\ -15753 & -73868 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.84 \cdot 10^5 - 1.84 \cdot 10^5 & 0 & 309.910 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1148 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M = E^{-1}L = \begin{bmatrix} 0 & 30.7797 & 12.4958 & 0 \\ 0 & 30.7797 & -12.4958 & 0 \\ 12.4958 & 0 & 0 & 30.7797 \\ 12.4958 & 0 & 0 & 30.7797 \end{bmatrix} \quad (16)$$

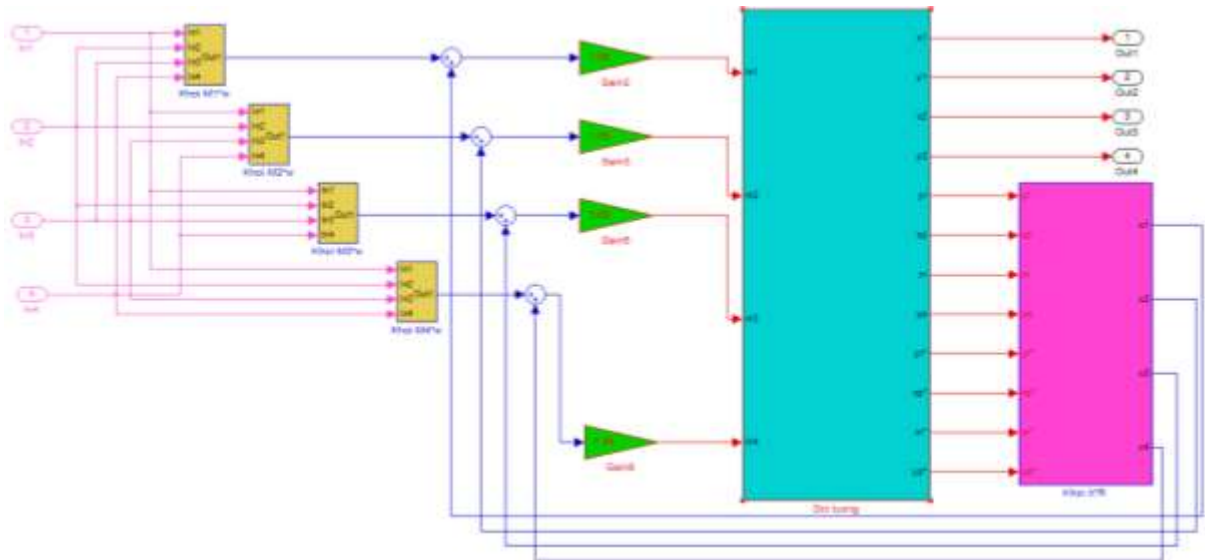
$$R = E^{-1}F = \begin{bmatrix} 954.47 & 69.556 & -4517 & 0 & -7.6232 & 0 & 0 \\ 954.47 & -9020.9 & 4517 & 0 & 7.6232 & 0 & 0 \\ -4517 & 0 & -954.5 & 69.557 & 0 & 0 & 7.6232 \\ -4517 & 0 & 954.5 & 69.557 & 0 & 0 & -7.6232 \end{bmatrix} \quad (17)$$

#### 4. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ SAU TÁCH KÊNH VÀ KIỂM CHỨNG BẰNG MÔ PHÒNG

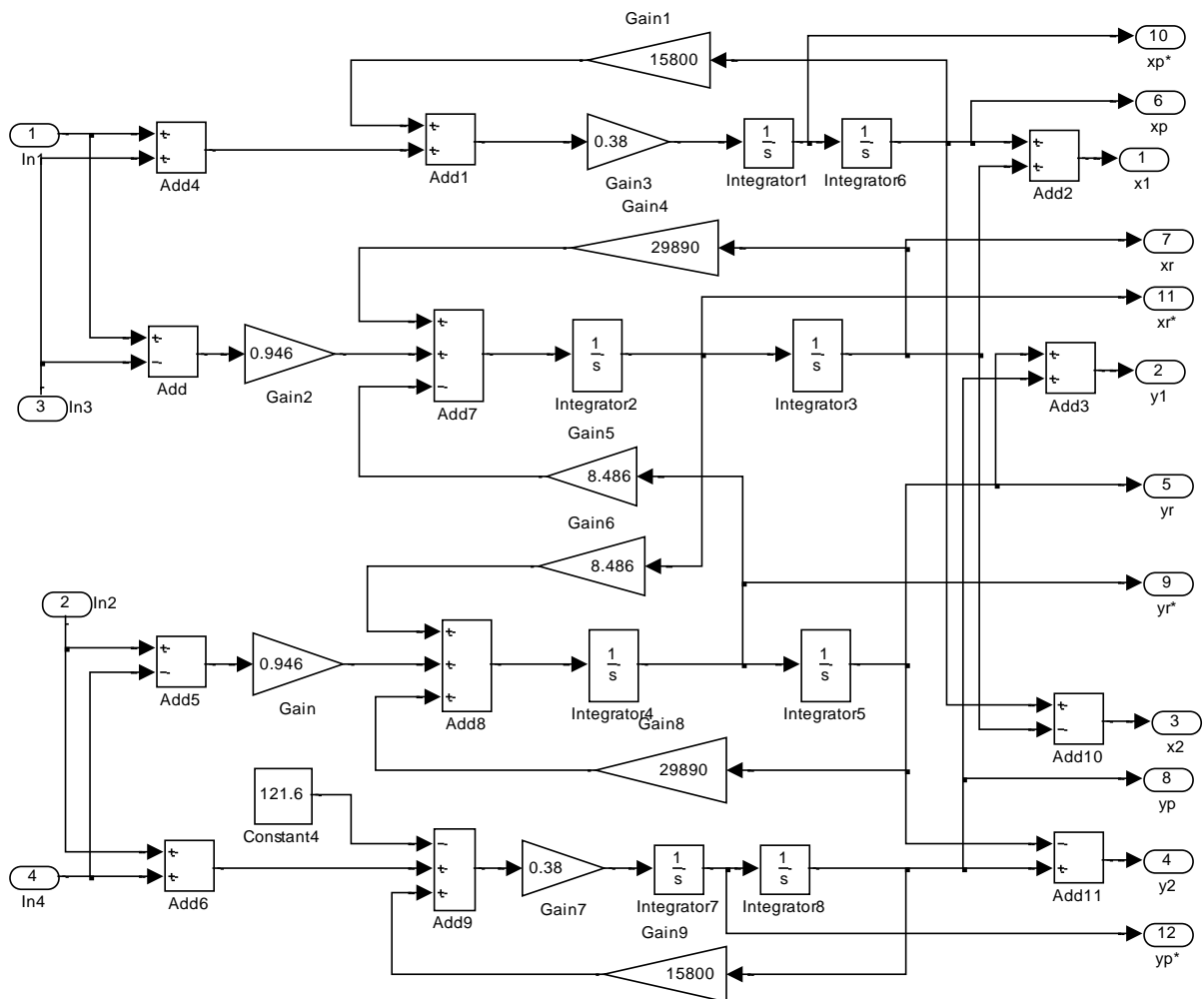
Thông thường, sau khi xác định các bộ điều khiển tiền xử lý  $R$  như (17), bộ điều khiển phản hồi trạng thái  $M$  như (16) và xác định được hàm truyền đạt của từng kênh độc lập như (5a) và (5b), thì vẫn thiết kế điều khiển cho các kênh là vô cùng thuận lợi và dễ dàng. Ở đây, đặt vấn đề là thiết kế điều khiển cho đối tượng hai ổ đỡ từ có cấu trúc như trên **H.6** (bỏ qua trục  $z$  vì không ảnh hưởng của xen kênh), số liệu đối tượng như trong bảng 1, các bộ điều khiển được sử dụng là PID có các thông số  $K_p, K_I, K_D$  được tổng hợp theo modul tối ưu [8]. Cấu trúc mô phỏng toàn hệ thống như trên **H.8**.



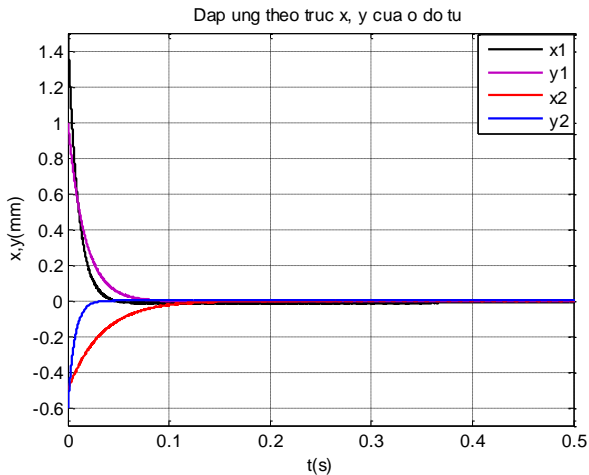
**H. 8** Sơ đồ mô phỏng bằng Matlab-Simulink (khối màu hồng là mô hình đối tượng và các bộ điều khiển tiền xử lý  $R$ , bộ điều khiển phản hồi trạng thái  $M$ ).



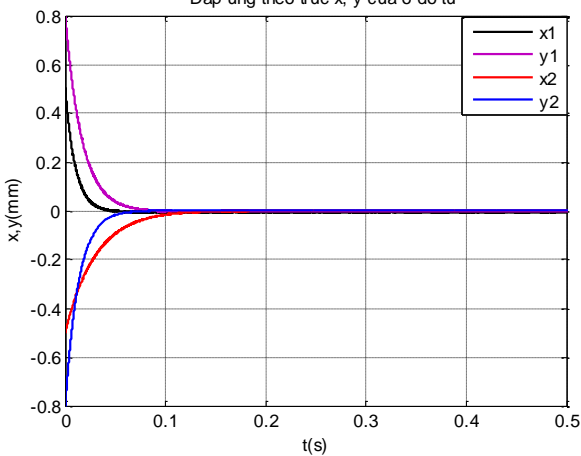
**H.9** Khai triển khối màu hồng của **H.8** là mô hình đối tượng (màu xanh) và các bộ điều khiển tiền xử lý  $R$  (màu vàng) và điều khiển phản hồi trạng thái  $M$  (màu hồng).



**H.10** Khai triển khối màu xanh của **H.9** là mô hình đối tượng với các số liệu như trong bảng 1.



**H. 11** Đáp ứng của hệ thống khi có số liệu đầu vào:  $x_1 = 1,5 \text{ mm}$ ;  $y_1 = 1 \text{ mm}$ ;  $x_2 = -0,5 \text{ mm}$ ;  $y_2 = -0,6 \text{ mm}$ .



**H. 12** Đáp ứng của hệ thống khi có số liệu đầu vào:  $x_1=0,5 \text{ mm}$ ;  $y_1=0,8 \text{ mm}$ ;  $x_2=-0,5 \text{ mm}$ ;  $y_2= -0,8 \text{ mm}$ .

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về hiện tượng tác động xen kênh trong hệ truyền động sử dụng động cơ đồng bộ từ thông dọc trục, kích từ nam châm vĩnh cửu có tích hợp ổ đỡ từ hai đầu trục với 6 bậc tự do, ta nhận thấy: Hiện tượng này đã xảy ra chủ yếu trong hai ổ đỡ từ, riêng đối với động cơ đồng bộ từ thông dọc trục kích từ nam châm vĩnh cửu có các chuyển động quay và tịnh tiến dọc trục ( $z$ ) không bị ảnh hưởng.

Bằng cách sử dụng các bộ điều khiển tiên xử lý  $R$  và điều khiển phản hồi trạng thái  $M$  được tính toán như trên, từ một hệ MIMO đã được tách thành các hệ SISO độc lập. Trên cơ sở đó, tiến hành thiết kế điều khiển cho các kênh một cách dễ dàng và thuận lợi. Các kết quả mô phỏng cho thấy sai lệch các trục chuyển động nhanh chóng về không.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Akira Chiba, adashi Fukao, Osamu Ichikawa, Masahide Oshima, atsugu Takemoto and David G. Dorrell, "Magnetic Bearings and Bearingless Drives", Newnes, 2005.

[2] Gerhard Schweitzer and Eric H. Maslen, Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery. Springer-Verlag, 2009

[3] Quang Dich Nguyen and Satoshi Ueno, "Modeling and Control of Salient-Pole Permanent Magnet Axial Gap Self-Bearing Motor", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. PP, No. 99, pp. 1-9, 2010 (early access).

[4]. Quang Dich Nguyen and Satoshi Ueno, "Analysis and Control of Non-Salient Permanent Magnet Axial-Gap Self-Bearing Motor", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. PP, No. 99, pp. 1-8, 2010 (early access).

[5]. Quang Dich Nguyen, Nobukazu Shimai, Satoshi Ueno, "Control of 6 Degrees of Freedom Salient Axial-Gap Self-Bearing Motor", 12th International Symposium on Magnetic Bearings, August, 2010.

[6] Quang Dich Nguyen, Satoshi Ueno, Ritsumeikan University, "Control of 6 Degrees of Freedom Salient Axial-Gap Self-Bearing Motor", ISMB-12.

[7]. Nguyen Phung Quang and Jörg-Andreas Dittrich, "Vector Control of Three-Phase AC Machines", springer

[8]. Nguyễn Doãn Phước: "Lý thuyết điều khiển tuyến tính". NXB KH&KT, 2007.

[9]. Nguyễn Như Hiện, Dương Quốc Tuấn: "Interference between two perpendicular frames and solutions to eliminate this phenomenon in the electrical drive system using electric motor that has 6 degrees of freedom". Tạp chí KHCN ĐH Thái Nguyên, trang 149, tập 139, số 09, 2015



**Nguyễn Như Hiện** nhận bằng đại học 1976 tại trường ĐH Cơ Điện Bắc Thái, bằng cao học ngành Tự động hóa năm 1997 và bằng tiến sỹ năm 2002 tại trường đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện làm việc tại bộ môn Tự động hóa, trường đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính là điều khiển nâng cao cho các hệ chuyển động nhiều trục và điều khiển quá trình đa biến, điều khiển hệ thống năng lượng tái tạo.



**Trần Xuân Minh** nhận bằng Đại học 1981 tại trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp Việt Bắc, bằng Thạc sỹ ngành Tự động hóa năm 1997 và bằng tiến sỹ kỹ thuật năm 2008 tại trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện đang công tác tại trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính là điều khiển nâng cao cho các hệ chuyển động nhiều trục, hệ truyền



động nhiều bậc tự do và điều khiển quá trình đa biến, điều khiển hệ thống năng lượng tái tạo.



**Đặng Danh Hoàng** Nhận bằng tốt nghiệp đại học năm 2000 tại Trường đại học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên, bằng cao học ngành Đo lường và Điều khiển tự động tại đại học Bách Khoa Hà Nội và bằng tiến sỹ tháng 01 năm 2013 chuyên ngành Tự động hoá tại Trường đại học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên. Hiện nay làm việc tại Bộ môn Kỹ thuật điện, trường đại học Kỹ thuật Công nghiệp – Đại học Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính là điều khiển truyền động điện; điều khiển mờ, điều khiển thích nghi, điều khiển véc tơ cho các loại máy điện, robot; điều khiển hệ thống năng lượng tái tạo.



**Dương Quốc Tuấn** Nhận bằng tốt nghiệp đại học năm 2001 tại Trường đại học Bách Khoa Hà Nội, bằng cao học ngành Tự động hóa và đang là NCS tại đại học Kỹ thuật Công nghiệp – Đại học Thái Nguyên. Hiện nay làm việc tại Bộ môn Tự động hóa, khoa Điện, trường đại học Kỹ thuật Công nghiệp – Đại học Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính là điều khiển truyền động điện; điều khiển nâng cao các hệ chuyển động.



**Vũ Duy Hưng** nhận bằng đại học 2003 tại trường ĐH Bách Khoa Hà Nội, bằng cao học chuyên ngành Thiết bị điện – điện tử 2009, đang làm NCS tại trường đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện làm việc tại khoa Điện, trường đại học Kinh tế -Kỹ thuật Công nghiệp. Hướng nghiên cứu chính là thiết bị và hệ thống điều khiển tự động.