

# Thiết kế hệ điều khiển phi tuyến theo nguyên lý phẳng cho cơ cấu nâng bằng từ trường trong ổ từ.

## Flatness-based control for a magnetic levitation system

Nguyễn Danh Huy, Trần Trọng Minh

Bộ môn Tự động hóa công nghiệp, Trường ĐHBK Hà Nội

e-Mail: huy.nguyendanh@hust.edu.vn; minh.trantrong@hust.edu.vn

### Tóm tắt

Magnetic Levitation là kỹ thuật sử dụng lực từ do nam châm tạo ra để treo (suspension) hoặc nâng (levitation) vật. Trước đây, để đơn giản người ta thường sử dụng nam châm vĩnh cửu, tuy nhiên, hệ sử dụng nam châm vĩnh cửu là hệ không thể ổn định. Do vậy trong các ứng dụng thực tế thường sử dụng nam châm điện để tạo lực và gọi chung là hệ thống nâng bằng từ trường (Magnetic Levitation System – MLS). MLS được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như vòng bi từ chủ động (Active Magnetic Bearing – AMB), tàu cao tốc đệm từ, các thiết bị cách ly chống rung ...

Bài báo này trình bày việc ứng dụng phương pháp điều khiển phi tuyến dựa trên nguyên lý phẳng cho hệ nâng từ (Magnetic Levitation System - MLS). Các cơ sở lý thuyết cũng như các bước thiết kế được thực hiện. Các mô phỏng kiểm nghiệm trên MATLAB cho thấy các ưu điểm của phương pháp điều khiển này với MLS. Các mô phỏng kiểm nghiệm được thực hiện với cấu trúc phi tuyến của hệ, bao gồm cả các phần tử phải có trong một hệ thực.

**Từ khóa:** Hệ thống nâng bằng từ, ổ bi từ chủ động, tuyến tính hóa, cấu trúc phi tuyến, tựa phẳng

### Abstract:

Magnetic Levitation is a technique that uses magnetic force generated by the magnet to hang (suspension) or raise (levitation) material. In the past, people are often simple to use permanent magnets, however, the use of permanent magnet system is not stable. So in practical applications often used electromagnets to generate power and collectively improve magnetic system (Magnetic Levitation System - MLS). MLS is widely applied in many fields such as bearings from the initiative (Active Magnetic Bearing - AMB), high-speed train from the buffer, the vibration isolation device ...

This paper presents the application of flatness-based nonlinear control method for Magnetic Levitation System - MLS. The theoretical basis as well as the design steps are performed. The simulation tested on MATLAB shows the advantages of this control method with MLS. The simulation was performed with non-linear structure of the system, including the elements must be in a real system.

**Keywords:** Magnetic levitation system, active magnetic bearing, linearization, non-linear structure, flatness-base.

### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\mu_0$		độ từ thẩm tương đối
$R_1, R_2$	$\Omega$	điện trở cuộn dây
$L_1, L_2$	H	điện cảm các cuộn dây
$g$	$m/s^2$	gia tốc trọng trường

### Chữ viết tắt

MLS	Magnetic levitation system
AMB	Active magnetic bearing
PD	Proportional Derivative
PID	Proportional Integrate Derivative
FF	Feedforward
FB	Feedback

## 1. PHẦN MỞ ĐẦU

Một hệ nâng từ điển hình như Hình 1 gồm hai nam châm điện để tạo lực điện từ tác động lên vật được nâng. Để điều chỉnh và giữ ổn định vị trí của vật, các lực từ được điều khiển bởi dòng điện qua cuộn dây hai nam châm điện. Phần điều khiển có các bộ phận như là cảm biến đo vị trí vật, mạch điện cấp nguồn cho nam châm và các bộ điều chỉnh ...

Nam châm điện có lực từ tác động lên vật tỷ lệ với bình phương dòng điện đồng thời tỷ lệ nghịch với bình phương khe hở không khí tức là vị trí của vật. Do đó, cơ cấu nâng từ là một hệ phi tuyến. Tuy nhiên hệ này vẫn chủ yếu được điều khiển bằng bộ điều khiển tuyến tính. Để tổng hợp được bộ điều khiển, hệ được tuyến tính hóa bằng cách đưa một dòng điện cố định  $I_0$  cùng chiều trong cả hai nam châm để dịch chuyển điểm làm việc đến vùng tuyến tính [1],[4]. Với bộ điều khiển tuyến tính, hệ đã đạt được chất lượng nhất định, tuy nhiên dải làm việc bị giới hạn trong vùng rất nhỏ quanh điểm làm việc tuyến tính đã chọn. Hơn nữa, khi có nhiễu tác động đủ lớn, hệ có thể bị đẩy ra vùng phi tuyến và mất ổn định.

Phương pháp này còn có một số nhược điểm như đã chỉ trong [1]: dòng điện tổng qua hai cuộn dây luôn gần bằng dòng cực đại nên công suất tiêu thụ lớn, dòng điện lệch  $I_0$  tạo ra một từ trường không đổi gây tổn thất lớn hơn cho chuyển động quay (khi vật là trục

quay trong hệ AMB), từ trường này cũng làm dòng Fucô tăng theo tốc độ quay của trục dẫn đến suy giảm lực từ, tạo ma sát điện từ khá lớn.

Trong thực tế, cơ cấu nâng từ không chỉ hoạt động với nguyên tắc giữ đối tượng ổn định tại điểm cân bằng. Một số hệ cân có khả năng điều khiển thay đổi vị trí của vật đến một số điểm hoặc trong một vùng khá rộng so với vùng tuyến tính. Ví dụ như trong động cơ tự nâng khe hở dọc trục là kiểu động cơ có rotor có thể dịch chuyển dọc trục trong khe hở giữa hai stator. Kiểu động cơ này ứng dụng trong các thiết bị trong đó ngoài chuyển động quay, chuyển động dọc trục của rotor có thể để tác động lên các cơ cấu khác mà không cần thêm cơ cấu chấp hành.

Một phương pháp điều khiển khá mới gần đây được quan tâm áp dụng cho các hệ phi tuyến là phương pháp thiết kế trên cơ sở nguyên lý hệ phẳng. Khái niệm hệ phẳng được đề xuất 1992 bởi Flies M., Levine J., Martin P., Rouchon P [2]. Trong [2] cũng đề cập đến việc áp dụng nguyên lý phẳng cho nhiều hệ phi tuyến trong thực tế. So với các phương pháp điều khiển phi tuyến khác, phương pháp thiết kế theo nguyên lý phẳng có các tính chất cũng như ưu điểm riêng được chỉ ra trong [2],[7]. Việc nghiên cứu áp dụng nguyên lý phẳng cho các hệ truyền động điện xoay chiều hoặc truyền động tuyến tính cũng đã đạt được nhiều kết quả tích cực [3], [6]. Đối với hệ MLS cũng như AMB, phương pháp này cho thấy có nhiều triển vọng [3].

Trong thực tế, cơ cấu nâng từ không chỉ hoạt động với nguyên tắc giữ đối tượng ổn định tại điểm cân bằng. Một số hệ cân có khả năng điều khiển thay đổi vị trí của vật đến một số điểm hoặc trong một vùng khá rộng so với vùng tuyến tính. Ví dụ như trong động cơ tự nâng khe hở dọc trục là kiểu động cơ có rotor có thể dịch chuyển dọc trục trong khe hở giữa hai stator. Kiểu động cơ này ứng dụng trong các thiết bị trong đó ngoài chuyển động quay, chuyển động dọc trục của rotor có thể để tác động lên các cơ cấu khác mà không cần thêm cơ cấu chấp hành.

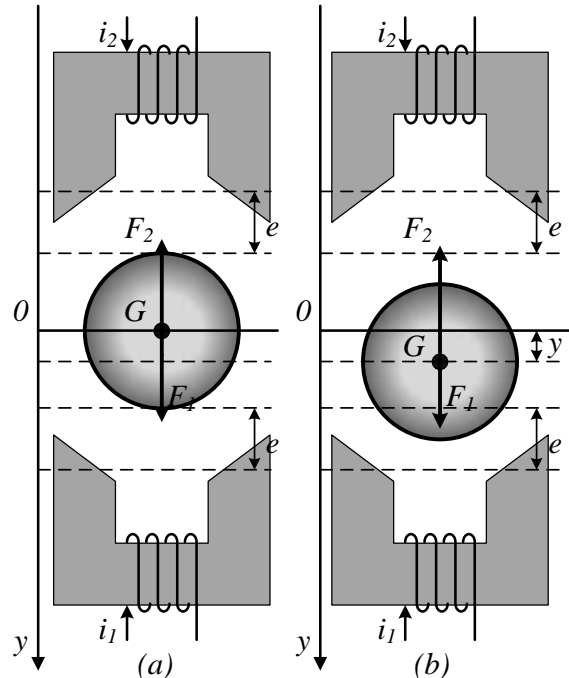
Một phương pháp điều khiển khá mới gần đây được quan tâm áp dụng cho các hệ phi tuyến là phương pháp thiết kế trên cơ sở nguyên lý hệ phẳng. Khái niệm hệ phẳng được đề xuất 1992 bởi Flies M., Levine J., Martin P., Rouchon P [2]. Trong [2] cũng đề cập đến việc áp dụng nguyên lý phẳng cho nhiều hệ phi tuyến trong thực tế. So với các phương pháp điều khiển phi tuyến khác, phương pháp thiết kế theo nguyên lý phẳng có các tính chất cũng như ưu điểm riêng được chỉ ra trong [2],[7]. Việc nghiên cứu áp dụng nguyên lý phẳng cho các hệ truyền động điện xoay chiều hoặc truyền động tuyến tính cũng đã đạt được nhiều kết quả tích cực [3], [6]. Đối với hệ MLS cũng như AMB, phương pháp này cho thấy có nhiều triển vọng [3].

## 2. MÔ HÌNH HÓA MLS

Ta xem xét hệ nâng từ theo phương đứng như hình 1 gồm hai nam châm điện và vật được nâng. Vật được nâng có thể là đầu trục rotor của các cơ cấu quay,

hoặc bánh đà trong hệ thống tích trữ năng lượng... Với cấu trúc như vậy, theo [4] và [5], ta có lực tác động của các nam châm điện lên vật được nâng như sau:

$$F_1 = \frac{\lambda_1 i_1^2}{e-y}; F_2 = \frac{\lambda_2 i_2^2}{e+y} \quad (1)$$



H. 1 (a): Vị trí cân tâm; (b): Vị trí lệch tâm.

H. 2 Mô hình hệ thống nâng từ

Trong đó,  $y$  là độ lệch giữa tâm của vật và vị trí cân bằng là vị trí giữa hai nam châm,  $e$  là khe hở không khí chuẩn,  $F_1$  và  $F_2$  là lực điện từ được tạo bởi hai nam châm trên và dưới,  $i_1$  và  $i_2$  là dòng điện qua hai cuộn dây nam châm.  $\lambda_1, \lambda_2$  là hệ số cấu tạo của mỗi nam châm, phụ thuộc vào các thông số như số vòng dây, độ từ thẩm, hình dáng và tiết diện mạch từ. Với cấu trúc như hình 1 và coi hai nam châm điện có cấu tạo giống nhau, ta có  $\lambda_1 = \lambda_2 = \mu_0 . A n^2 . \cos \alpha / 4$ .

Các thông số cấu tạo và ký hiệu như bảng 1.

Trong vùng  $|y| < e$  ta có:

$$m . \ddot{y} = F_1 - F_2 + m . g \quad (2)$$

Hai mạch điện nam châm có phương trình:

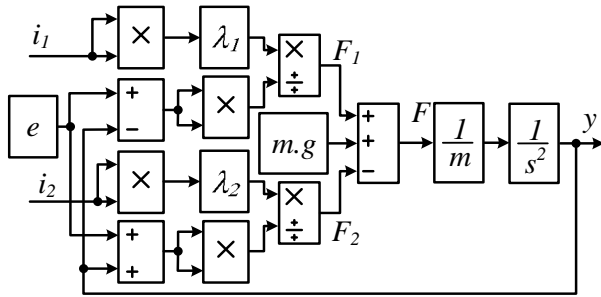
$$U_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dL_1}{dt} \quad (3)$$

$$U_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dL_2}{dt}$$

với  $U_1, U_2$  là điện áp đặt lên các cuộn dây,  $R_1, R_2$  là điện trở của các cuộn dây,  $i_1, i_2$  là dòng điện qua các cuộn dây. Các điện cảm được xác định như sau:

$$L_1 = \frac{\lambda}{e-y}; L_2 = \frac{\lambda}{e+y} \quad (4)$$

Biến điều khiển có thể chọn là điện áp hoặc dòng điện. Ở đây ta chọn biến điều khiển là dòng điện  $i_1$  và  $i_2$  và từ (1), (2) ta có cấu trúc của MLS như hình 2.



H. 3 Mô hình toán học của MLS

### Bảng 1: Thông số hệ thống.

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng vật	m	0,2	kg
Số vòng dây quấn	n	240	vòng
Diện tích cực từ	A	3	cm <sup>2</sup>
Góc mạch từ	$\alpha$	25	độ
Khe hở chuẩn	e	0,5	mm
Hệ số cấu tạo	$\lambda$	$5 \times 10^{-6}$	
Điện trở dây quấn	$R_1, R_2$	2	$\Omega$

## 3. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN THEO NGUYÊN LÝ PHẪNG

### 3.1. Giới thiệu nguyên lý phẳng

Theo [6], hệ phi tuyến  $dx/dt = f(x, u)$  với biến đầu vào  $u \in R^m$  và biến trạng thái  $x \in R^n$  là phẳng nếu thỏa mãn 3 điều kiện:

- Hệ luôn tồn tại biến đầu ra:

$$y = F\left(x, u, \frac{du}{dt}, \dots, \frac{d^l u}{dt^l}\right) \quad (5)$$

- Toàn bộ các biến đầu vào và biến trạng thái của hệ có thể xác định từ tập biến  $y$  và đạo hàm của nó. Tức là luôn tìm được hàm  $P$  và  $Q$  sao cho:

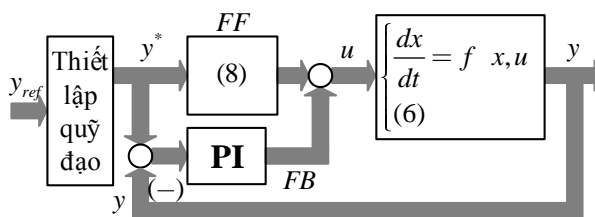
$$x = P\left(y, \frac{dy}{dt}, \dots, \frac{d^l y}{dt^l}\right) \quad (6)$$

$$u = Q\left(y, \frac{dy}{dt}, \dots, \frac{d^{l+1} y}{dt^{l+1}}\right) \quad (7)$$

- Các biến đầu ra  $y$  là độc lập vi phân, tức là không tồn tại hàm  $H$  nào:

$$H\left(y, \frac{dy}{dt}, \dots, \frac{d^k y}{dt^k}\right) = 0$$

Khi thỏa mãn cả ba điều kiện thì hệ là phẳng và biến  $y$  gọi là đầu ra phẳng của hệ. Cấu trúc đầy đủ của hệ phẳng như hình 3.



H. 4 Cấu trúc hệ điều khiển theo nguyên lý phẳng.

Với tính phẳng thì có thể tính được quỹ đạo của đầu vào từ quỹ đạo mong muốn của đầu ra phẳng mà không cần giải các phương trình vi phân.

Vì các biến trong tập đầu ra phẳng chính là các giá trị cần điều khiển chính nên ý nghĩa vật lý được thể hiện rõ: tín hiệu đầu ra mong muốn được đưa trực tiếp làm giá trị đặt đầu vào cấu trúc điều khiển mà giá trị ra cần điều khiển lại trở thành đầu vào điều khiển, gọi là cấu trúc điều khiển ngược hay mô hình ngược.

### 3.2. Chọn biến phẳng và chứng minh điều kiện phẳng

Với hệ MLS như trên, ta chọn biến đầu ra phẳng như sau:

$$y_1 = y; \quad y_2 = \frac{i_2}{e + y} \sqrt{\frac{\lambda_2}{m}} \quad (8)$$

Trong đó  $y_1$  là vị trí trọng tâm của vật so với vị trí cân bằng và  $y_2$  tỷ lệ với căn bậc hai của gia tốc gây bởi nam châm điện thứ hai. Trước hết ta phải chứng minh các tính chất phẳng được thỏa mãn:

- Vì  $y$  và dòng điện  $i_2$  là các biến độc lập, hai biến ra phẳng  $y_1$  và  $y_2$  là độc lập vi phân.

- Từ (1), (2) và (5) viết được:

$$y = y_1; \quad \dot{y} = \dot{y}_1$$

$$i_2 = y_2 e + y_1 \sqrt{\frac{m}{\lambda_2}} \quad (9)$$

$$i_1^2 = \frac{m}{\lambda_1} e - y_1^2 \ddot{y}_1 - g + y_2^2$$

Như vậy tất cả các biến trạng thái và điều khiển của hệ thống (2) có thể biểu diễn theo các biến phẳng và đạo hàm của nó  $y_1, \dot{y}_1, \ddot{y}_1, y_2$ . Theo [2], [3] và [6] hệ (2) là hệ phẳng với các đầu ra phẳng được định nghĩa theo (8). Ta thấy rằng biểu thức của  $i_1$  chỉ có nghĩa nếu về phải không âm. Ràng buộc này sẽ được đưa vào khi thiết lập quỹ đạo phẳng.

### 3.3. Thiết lập quỹ đạo đặt với điều kiện "liên kết dòng điện"

Quỹ đạo phẳng là một cặp quỹ đạo cho hai biến phẳng  $t \mapsto (y_1(t), y_2(t))$  bắt đầu từ điểm  $(y_1(0), y_2(0))$ , với  $(\dot{y}_1(0), \ddot{y}_1(0))$  có thể đã biết, và tiến tới điểm  $(y_1(T), y_2(T))$ ,  $(T > 0)$ , với  $(\dot{y}_1(T), \ddot{y}_1(T))$  cũng có thể đã biết.

Quỹ đạo được lập sẽ thỏa mãn yêu cầu không có các dòng điện tiền từ hóa (pre-magnetization), tức là khi một cuộn dây làm việc - dòng điện qua cuộn dây khác không - thì dòng điện của cuộn còn lại bằng không. Đặc tính này gọi là "điều kiện liên kết dòng điện". Nó được xem như là một sự ràng buộc giữa các đầu ra phẳng. Theo (8), dễ nhận thấy rằng khi  $i_2 = 0$  thì dẫn đến  $y_2 = 0$  và như vậy  $i_1$  tồn tại nếu và chỉ nếu  $\ddot{y}_1 - g \geq 0$ . Mặt khác,  $i_1 = 0$  làm cho  $\ddot{y}_1 - g + y_2^2 = 0$  và như vậy  $\ddot{y}_1 - g \leq 0$ . Do đó, điều kiện liên kết dòng điện sẽ là:

$$y_2 = Y \quad g - \ddot{y}_1 = \begin{cases} 0 & ; \ddot{y}_1 - g \geq 0 \\ \sqrt{g - \ddot{y}_1} & ; \ddot{y}_1 - g \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó  $Y$  được gọi là hàm liên kết. Các điểm thỏa mãn điều kiện  $\ddot{y}_1 = g$  tại đó cuộn dây thứ nhất chuyển từ trạng thái làm việc (có dòng) sang trạng thái nghỉ (tắt dòng) và cuộn dây thứ hai thì ngược lại gọi là điểm ngắt.

$y_1$  có thể là một hàm theo thời gian bất kỳ, ít nhất khả vi bậc 2, và sau đó tính toán  $y_2$  theo (10). Các dòng điện đặt được tính toán từ  $y_1, \dot{y}_1, \ddot{y}_1, y_2$  theo (9). Quá trình xây dựng quỹ đạo đặt cần xét đến các ràng buộc sao cho biên độ cũng như tốc độ biến thiên của các dòng điện  $i_1, i_2$  phải là hữu hạn.

Trong [1] đã chứng minh rằng nếu quỹ đạo đặt  $y_1$  được chọn sao cho giới hạn trái tại điểm ngắt của  $\dot{y}_2$  là hữu hạn thì tốc độ thay đổi của các dòng điện  $i_1$  và  $i_2$  tại các điểm ngắt cũng là hữu hạn. Đối với hệ (2) quỹ đạo đặt được xây dựng với mục tiêu di chuyển vật từ một điểm xác lập này tới điểm xác lập khác (rest to rest). Quỹ đạo bắt đầu tại thời điểm  $t = 0$ , từ một vị trí bất kỳ  $y(0), |y(0)| < e$ , với  $\dot{y}(0) = 0$ , và tiến tới điểm kết thúc có vị trí bất kỳ  $y_1(T), |y_1(T)| < e$ , với  $\dot{y}_1(T) = 0$ .

Với điều kiện là tính liên tục và tốc độ thay đổi hữu hạn của dòng điện tại các điểm đầu và cuối dẫn tới:  $\ddot{y}_1(0) = \ddot{y}_1(T) = y_1^{(3)}(0) = y_1^{(3)}(T) = 0$ . Ngoài ra, tại điểm ngắt sẽ có điều kiện là  $y_1^{(3)}(t) = 0$ , với mọi  $t \in [0, T]$ .

Dạng tổng quát của quỹ đạo  $y_1(t)$  với  $0 \leq t \leq T$  là:

$$y_1(t) = \sum_{i=0}^k a_i t^i \quad (11)$$

với bậc nhỏ nhất phải là 7 để thỏa mãn 8 điều kiện ràng buộc (4 điều kiện cho điểm đầu và 4 điều kiện cho điểm cuối). Quỹ đạo đặt cho  $y_1, i_1$  và  $i_2$  phải tường minh và có giới hạn trên toàn quỹ đạo, bao gồm các điểm ngắt, đặc biệt  $y_1$  phải khả vi liên tục tới bậc 3. Hơn nữa, do có các điểm ngắt và để thỏa mãn các điều kiện ràng buộc tại các điểm đó thì quỹ đạo thực sẽ là tập hợp của các đoạn quỹ đạo gián đoạn.

Các điều kiện ràng buộc cho mỗi đoạn quỹ đạo được thể hiện dạng véc tơ như sau:

$$Y = [y_1(T_1), \dot{y}_1(T_1), \ddot{y}_1(T_1), y_1^{(3)}(T_1), y_1(T_2), \dot{y}_1(T_2), \ddot{y}_1(T_2), y_1^{(3)}(T_2), T_1, T_2] \quad (12)$$

Khi quỹ đạo đặt  $y_1(t)$  thỏa mãn điều kiện ràng buộc tại điểm đầu  $T_1$  ta có các phương trình đại số như sau:

$$\begin{cases} y_1(t) = y_1(T_1) \\ \dot{y}_1(t) = \dot{y}_1(T_1) \\ \ddot{y}_1(t) = \ddot{y}_1(T_1) \\ y_1^{(3)}(t) = y_1^{(3)}(T_1) \end{cases} \quad (13)$$

Tương tự cho điểm cuối  $T_2$ . Giải hệ phương trình này tìm được vector hệ số của đa thức quỹ đạo đặt tổng quát của biến phẳng  $y_1(t)$  và từ (5) có quỹ đạo đặt tổng quát của biến phẳng  $y_2(t)$ .

Sau khi có quỹ đạo tổng quát thì cần xác định các điểm ngắt. Các điểm ngắt là các điểm có  $\ddot{y}_1(t) = g$ , và với điều kiện để dòng điện tại điểm ngắt có giới hạn thì  $y_1^{(3)}(t) = 0$ . Như vậy tại các điểm ngắt sẽ có:

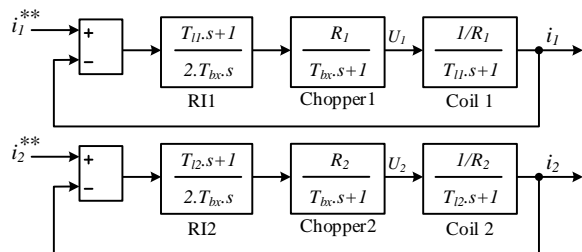
$$\begin{cases} t^2 12a_{4y} + 20t + 30a_{6y}t^2 + 42a_{7y}t^3 = g \\ t 24a_{4y} + 60a_{5y}t + 120a_{6y}t^2 + 210a_{7y}t^3 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Giải hệ phương trình này sẽ được các nghiệm thực trong khoảng  $0 < t < T$  là các điểm ngắt. Với các điểm ngắt đã xác định, cần xây dựng tập hợp các đoạn quỹ đạo gồm đoạn quỹ đạo từ điểm xuất phát tới điểm ngắt đầu tiên, điểm ngắt tới điểm ngắt kế tiếp và điểm ngắt cuối tới điểm kết thúc. Tất cả các đoạn quỹ đạo này đều phải thỏa mãn vector điều kiện (13) tương ứng. Giải hệ (14) với các vector điều kiện ràng buộc (13) cho từng đoạn quỹ đạo sẽ tìm được đa thức của từng đoạn. Quỹ đạo đặt thực sẽ là tổ hợp của các đoạn quỹ đạo rời rạc đi qua các điểm ngắt đã xác định.

### 3.4. Thiết kế các bộ điều khiển

#### 3.4.1. Bộ điều chỉnh dòng điện

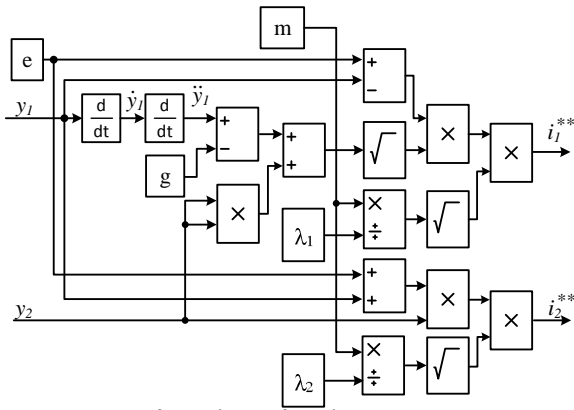
$i_1^{**}$  và  $i_2^{**}$  chỉ là tín hiệu đặt nên phải qua bộ khuếch đại công suất để điều khiển cuộn dây. Tuy nhiên, do cuộn dây nam châm là khâu quán tính bậc nhất và điện cảm cuộn dây biến thiên khi khe hở không khí thay đổi nên để dòng điện thực bám theo dòng điện đặt cần có bộ điều chỉnh dòng điện. Ở đây bộ khuếch đại công suất là bộ băm xung (chopper) có chu kỳ PWM là  $T_{bx}$ .  $T_{11} = L_1 \times R_1$  và  $T_{12} = L_2 \times R_2$  là hằng số thời gian các cuộn dây. Theo tiêu chuẩn modul tối ưu tổng hợp được mạch vòng dòng điện cho các cuộn nam châm với bộ điều chỉnh là PI. Mỗi cuộn dây có một mạch vòng dòng điện riêng như H.3:



H. 5 Mạch vòng dòng điện.

#### 3.4.2. Bộ điều khiển truyền thẳng

Sau khi có các đa thức quỹ đạo đặt  $y_1(t)$  và  $y_2(t)$ , từ (6) xây dựng khâu tính toán các dòng điện đặt  $i_1^{**}$  và  $i_2^{**}$  hay có thể gọi là bộ điều khiển truyền thẳng như H.4.



H. 6 Bộ điều khiển truyền thẳng (tính toán dòng điện đặt).

### 3.4.3. Điều khiển bám quỹ đạo vị trí.

Bộ điều khiển truyền thẳng có vai trò xác định tín hiệu điều khiển cần có để hệ (2) có đầu ra bám theo quỹ đạo mong muốn đã được thiết lập. Tuy nhiên nếu hệ chỉ có bộ điều khiển truyền thẳng và bộ điều chỉnh dòng điện ở vòng trong thì vẫn sẽ có sai lệch giữa quỹ đạo đặt và vị trí thực. Theo [1] thì sai lệch này là do một số yếu tố như là mô hình của hệ là không hoàn toàn chính xác, hay các điều kiện khả vi tối thiểu bậc  $n$  không đạt được, trong trường hợp này là mô hình hệ (2) không hoàn toàn chính xác do điện cảm của các cuộn dây thay đổi khi vật thay đổi vị trí và mạch vòng dòng điện chỉ là khâu vô sai cấp 1. Bởi vậy cần phải bù thêm ở đầu vào một lượng tương ứng với sai lệch ở tín hiệu ra. Với quỹ đạo đặt là  $(y_1^*, y_2^*)$ , cần phải thiết kế một bộ điều khiển phản hồi trạng thái sao cho sai lệch quỹ đạo  $y_1 - y_1^*, y_2 - y_2^*$  tiến tới không. Thực tế trong hệ này ta cần sai lệch quỹ đạo của biến phẳng thứ nhất  $y_1$   $t$  là vị trí của vật thỏa mãn:

$$\ddot{y}_1 - \ddot{y}_1^* = -k_0 (y_1 - y_1^*) - k_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_1^*) \quad (15)$$

Trong đó  $k_0$  và  $k_1$  là các số thực sao cho đa thức đặc trưng bậc hai  $P_2 s = s^2 + k_1 s + k_0$  là Hurwitz.

Trong [1] đã chứng minh rằng nếu  $k_0$  và  $k_1$  được chọn sao cho đa thức đặc trưng bậc hai  $P_2$  của (12) là Hurwitz thì luật điều khiển là:

$$\begin{cases} i_1 = \sqrt{\frac{m}{\lambda_1}} e - y \sqrt{A} y, \dot{y} ; i_2 = 0 \\ \text{khi } A y, \dot{y} \geq 0 \\ i_1 = 0, i_2 = \sqrt{\frac{m}{\lambda_2}} e + y \sqrt{-A} y, \dot{y} \\ \text{khi } A y, \dot{y} \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

trong đó:

$$y, \dot{y} = -k_0 (y_1 - y_1^*) - k_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_1^*) - g - \ddot{y}_1^* \quad (17)$$

Và khi đó hệ đạt được: điều kiện liên kết dòng điện, sai lệch quỹ đạo của biến phẳng  $y_1$   $t$  là tắt dần và

thỏa mãn (12), sai lệch quỹ đạo của biến phẳng thứ hai  $y_2$   $t$  tiến tới zero khi  $t \rightarrow \infty$ .

## 4. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

### 4.1. Thông số mô phỏng

Với các thiết kế như trên, ta thực hiện mô phỏng hệ thống hoạt động để nâng vật theo quỹ đạo mong muốn là dịch chuyển từ  $y_0 = -0.1mm$  tới  $y_T = 0.4mm$  với  $T = 10ms$ . Các thông số hệ thống như bảng 1.

### 4.2. Tính toán các quỹ đạo đặt

Với điểm đầu và điểm cuối của dịch chuyển mong muốn như vậy, điều kiện liên kết dòng điện và các điều kiện ràng buộc về tín hiệu điều khiển được thể hiện bằng vec tơ:

$$Y = (-1 \times 10^{-4}, 0, 0, 0, 4 \times 10^{-4}, 0, 0, 0, 0, 10 \times 10^{-3}) \quad (18)$$

Tính toán (11) theo điều kiện (15) được vector hệ số của đa thức quỹ đạo đặt  $y_1(t)$ .

Theo (12) xác định được quỹ đạo này có hai điểm ngắt tại  $t_1 = 0.00081$ ;  $t_2 = 0.00462$ .  $t_1 = 0.00081$ ;  $t_2 = 0.00462$  Như vậy quỹ đạo đặt sẽ gồm 3 đoạn với vector điều kiện cho các đoạn:

$$Y_1 = (-0.0001, 0, 0, 0, -0.0000993, 0.00288, g, 0, 0, 0.00081) \quad (19)$$

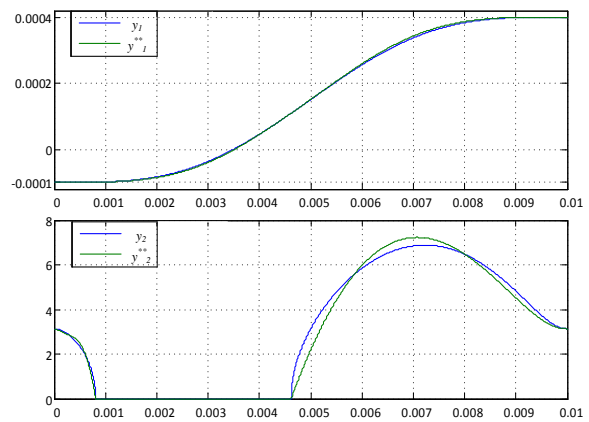
$$Y_2 = (-0.0001, 0, 0, 0, -0.0000993, 0.00288, g, 0, 0.00081, 0.00462) \quad (20)$$

$$Y_3 = (-0.0001, 0, 0, 0, -0.0000993, 0.00288, g, 0, 0.00462, 0.001) \quad (21)$$

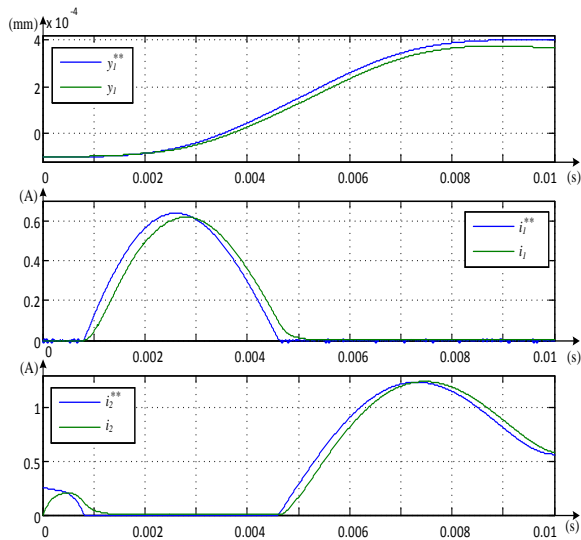
Tính toán theo (11) với các vector điều kiện (17), (18), (19) được các vector hệ số của 3 đoạn quỹ đạo.

Tổ hợp các đoạn quỹ đạo trên được quỹ đạo đặt thực của biến phẳng thứ nhất  $y_1^{**}$   $t$  đi qua các điểm ngắt và theo (5) xác định được quỹ đạo tương ứng của biến phẳng  $y_2^{**}$   $t$ .

### 4.3. Kết quả mô phỏng.

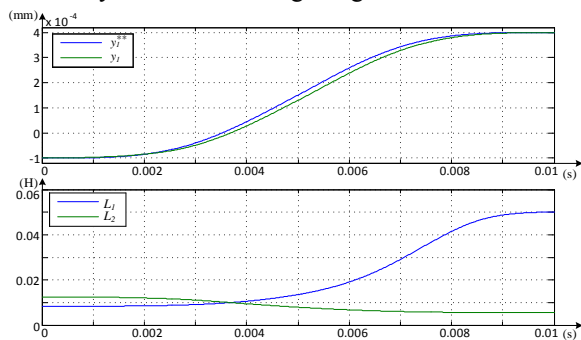


H. 7 Quỹ đạo đặt  $y_1, y_2$  và  $y_1^{**}, y_2^{**}$



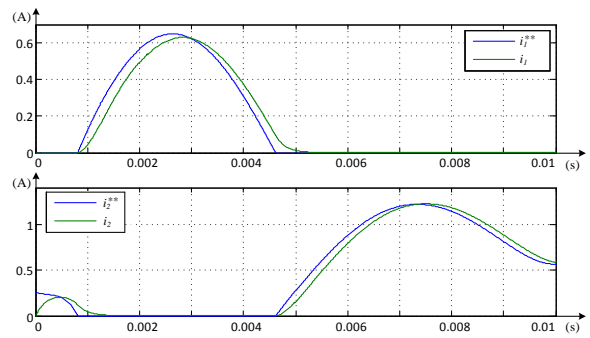
H. 8 Vị trí  $y_1$ , dòng điện  $i_1, i_2$  khi không bù trạng thái.

Hình 7 cho thấy quỹ đạo đặt  $y_1$   $t$  tổng quát và quỹ đạo đặt thực  $y_1^{**}$   $t$  là tập hợp các đoạn quỹ đạo đi qua các điểm ngắt. Hai quỹ đạo này gần như trùng nhau. Đối với biến phẳng thứ hai  $y_2$  - có liên hệ trực tiếp tới dòng điện đặt  $i_2$  - quỹ đạo đặt tính toán lại theo  $y_1^{**}$  không có tốc độ tăng đột biến tại các điểm ngắt nên đảm bảo yêu cầu về tốc tăng dòng là hữu hạn.

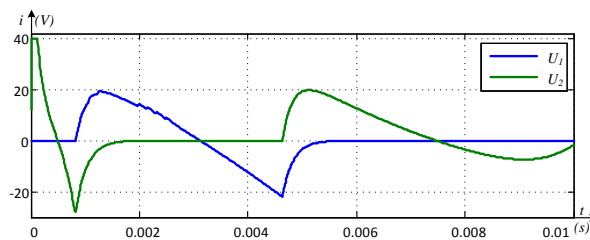


H. 9 Quỹ đạo đặt  $y_1^{**}$ , quỹ đạo thực  $y_1$  khi có bộ điều khiển bù sai lệch trạng thái (13) và sự thay đổi các điện cảm  $L_1, L_2$  theo vị trí.

Khi chưa có bù trạng thái, vẫn tồn tại sai lệch vị trí khi kết thúc quỹ đạo đặt như H.8. Với bộ điều chỉnh phản hồi trạng thái theo (13), như H8 có thể thấy vật đã đạt đến vị trí mong muốn. Đoạn giữa quỹ đạo là đoạn tốc độ tăng nhanh nên có sai lệch giữa quỹ đạo thực và quỹ đạo đặt. Sai lệch là do dòng điện – là một biến trạng thái – chưa bám hoàn toàn theo dòng đặt. Ngoài ra giá trị của  $k_0$  và  $k_1$  trong (13) cũng có ý nghĩa quan trọng với khả năng bám quỹ đạo của hệ thống. Cần có các nghiên cứu riêng để cải thiện điểm này.



H. 10 Các dòng điện đặt  $i_1^{**}, i_2^{**}$  và các dòng điện thực  $i_1, i_2$ .



H. 11 Điện áp  $U_1, U_2$  trên các cuộn nam châm.

## 5. KẾT LUẬN

Trong bài báo, phương pháp điều khiển phi tuyến dựa trên nguyên lý phẳng đã được xây dựng cho MLS. Từ quá trình thiết kế điều khiển có thể thấy rằng phương pháp phẳng với điều kiện liên kết dòng điện khi lập quỹ đạo mong muốn cho phép dùng mô hình phi tuyến của MLS chứ không phải mô hình tuyến tính (đoạn tuyến tính của (1)). Kết quả cho thấy MLS có thể làm việc trong toàn giải đặc tính làm việc cho phép,  $|y| < e$ , chứ không chỉ lân cận quanh điểm cân bằng,  $|y| \ll e$ .

Với điều kiện liên kết dòng điện, hệ làm việc chỉ với một cuộn dây tại mỗi thời điểm và dòng điện thực qua cuộn dây nam châm cũng chính là dòng điện điều khiển mà không phải duy trì một dòng điện lệch  $I_0$  qua cả hai cuộn dây. Do đó giảm được phát nóng của cuộn dây cũng như lõi thép, đồng thời giảm được đáng kể công suất điều khiển và cho phép thiết kế mạch công suất có thông số thấp hơn.

Trong mô phỏng không hạn chế điện áp nguồn cấp cho bộ khuếch đại công suất nhưng điện áp thực tế trên các cuộn dây biến thiên trong biên độ dưới 40V là phù hợp với mạch công suất nhỏ, dễ thiết kế, an toàn và có thể ứng dụng trong nhiều thiết bị.

Các kết quả trên cho thấy có thể phát triển áp dụng nguyên lý phẳng với quỹ đạo đặt theo điều kiện liên kết dòng điện cho các hệ nâng/kéo bằng từ trường như là ổ từ chủ động (active magnetic bearing – AMB), Động cơ ổ từ kết hợp kiểu khe hở dọc trục (Axial Gap Combined Bearing-Motor – AGBM) ...

## Tài liệu tham khảo

- [1] A.Charara, J.Miras, B.Caron.: “*Nonlinear control of a Magnetic Levitation system without premagnetization*”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 5, September 1996.
- [2] J.Lévine.: “*Analysis and Control of Nonlinear Systems – A Flatness-based Approach*”. Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 2009.
- [3] J.Lévine, J.Lottin, J.C.Ponsart.: “*A nonlinear approach to the control of magnetic bearing*”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 5, September 1996.
- [4] G.Schweitzer, E.H. Maslen.: “*Magnetic Bearings Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*”, Springer.
- [5] A.Chiba, T.Fukao, O.Ichikawa, M.Oshima, M.Takemoto and D.G.Dorrell.: “*Magnetic Bearings and Bearingless*”. Elsevier.
- [6] N. P. Quang, J. A. Dittrich.: “*Vector Control of Three-Phase AC machines*”, Springer, 2014.
- [7] Nguyễn Doãn Phước.: “*Bàn về khả năng ứng dụng lý thuyết hệ phẳng vào phân tích và điều khiển hệ phi tuyến*”. Hội nghị toàn quốc về điều khiển và tự động hóa, VCCA, 2011.



**Nguyễn Danh Huy** nhận bằng Kỹ sư Tự động hóa XNCN của trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 1997, bằng Thạc sĩ Kỹ thuật của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. Anh là giảng viên của Bộ môn Tự động hóa XNCN trường Đại học Bách khoa Hà

Nội. Hướng nghiên cứu đang quan tâm và triển khai là các hệ truyền động ứng dụng.



**Trần Trọng Minh** sinh năm 1960, tại Việt Nam. Từ năm 1978 - 1983 học tại đại học Bách khoa Bacu (Liên Xô cũ). Nhận bằng M.S tại AIT-Thái Lan năm 1997, bằng Tiến sĩ chuyên ngành Tự động hóa XNCN trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (ĐHBKHN) năm 2008. Từ năm 1984,

công tác tại bộ môn Tự động hóa XNCN – Viện Điện – ĐHBKHN. Lĩnh vực nghiên cứu: điều khiển điện tử công suất, bộ biến đổi công suất lớn, biến tần ma trận, ứng dụng điện tử công suất trong lưới điện thông minh, bộ biến đổi DC-DC hiệu suất cao, lọc tích cực,...