TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN VỊ TRÍ CHO HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG BÁM ĐIỆN CƠ SỬ DỤNG ĐỘNG CƠ PMSM

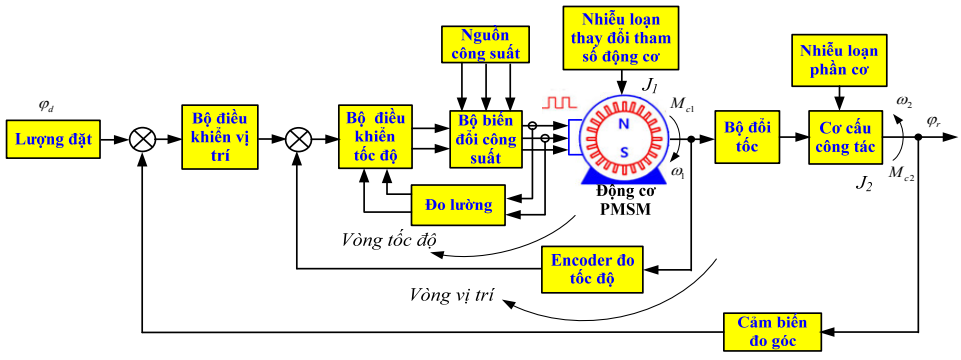
Phùng Mạnh Hùng[1*], Trần Đức Chuyển[2*], Đào Hoa Việt[1]

Tóm tắt: *Bài báo này trình bày một phương pháp tổng hợp hệ thống bám điều khiển vị trí sử dụng động cơ PMSM dùng trong công nghiệp và quân sự có tính đến tính phi tuyến và sự thay đổi thông số của mô hình. Hệ thống gồm vòng điều chỉnh vị trí và vòng điều chỉnh tốc độ. Trong đó, vòng điều chỉnh tốc độ sử dụng luật thích nghi để bù các hàm bất định và xây dựng bộ quan sát trượt để ước lượng mô men tải, ma sát và nhiễu. Bộ điều khiển được đề xuất nhằm nâng cao chất lượng hệ thống, khi tính đến các thành phần phi tuyến bất định cho hệ thống truyền động như: mô men quán tính, mômen ma sát, đàn hồi. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã kiểm chứng tính đúng đắn của thuật toán xây dựng bộ điều khiển. Các kết quả nghiên cứu này sẽ là cơ sở cho việc thiết lập các thuật toán điều khiển, thiết kế hệ thống truyền động bám trong công nghiệp và quân sự.*

Từ khóa: Điều khiển động PMSM; Hệ thống truyền động bám; Điều khiển có cấu trúc biến đổi.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các hệ thống truyền động bám (HTB) điện cơ dùng trong những hệ thống truyền động ngắm quân sự đòi hỏi có độ chính xác và chất lượng động học cao. Trước đây, các hệ thống truyền động bám thường sử dụng động cơ điện chấp hành một chiều. Động cơ một chiều có đặc tính điều khiển tốt nhưng có nhược điểm là luôn tồn tại cổ góp và chổi than với độ bền điện và độ bền cơ thấp hay phải bảo dưỡng nên trong những năm gần đây nó dần bị thay thế bởi động cơ xoay chiều, đặc biệt là động cơ PMSM (Động cơ đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu (loại có $L_d \neq L_q$), [6]. Khi HTB với động cơ PMSM mô hình của đối tượng điều khiển là mô hình phi tuyến rõ rệt, có thông số biến thiên. Bài toán tổng hợp bộ điều khiển (BĐK) cần có cách tiếp cận mới khác với mô hình tuyến tính, thì việc tổng hợp điều khiển sẽ được đơn giản hơn. Sau đây, ta xét hệ thống như sau:



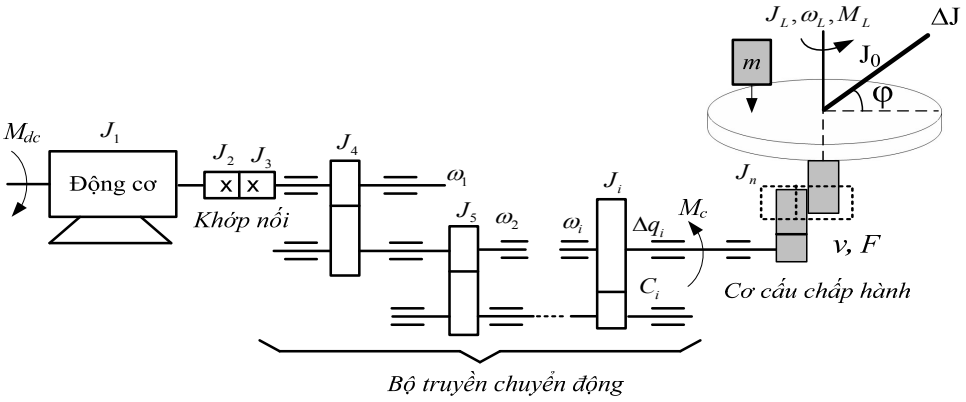
Hình 1. *Sơ đồ hệ thống truyền động bám vị trí.*

Trong nội dung của bài báo này trình bày việc tổng hợp HTB điều khiển vị trí theo nguyên lí tổng hợp hệ thống với các vòng lệ thuộc. Hệ thống gồm 2 vòng điều khiển vị trí và tốc độ. Vòng tốc độ dựa theo kỹ thuật backstepping trượt thích nghi để đảm bảo tốc độ của động cơ luôn bám sát tốc độ đặt khi có tính đến các yếu tố phi tuyến bất định của mô hình như sự thay đổi các thông số động cơ, sự biến đổi

của mômen ma sát, cũng như khi các giá trị đặt và nhiễu phụ tải thay đổi. Vòng vị trí dựa trên kĩ thuật tổng hợp các hệ điều khiển tuyến tính có kết hợp nhận dạng mô hình đối tượng. Ta có sơ đồ khối cấu trúc HTB vị trí như hình 1.

2. MÔ HÌNH ĐỐI TƯỢNG CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG BÁM DÙNG ĐỘNG CƠ PMSM

Đối tượng điều khiển của hệ truyền động bám điện cơ gồm động cơ, bộ truyền động và máy công tác. Sơ đồ khối phần cơ của hệ thống truyền động được biểu biễn như hình 2.



Hình 2. *Sơ đồ phần cơ HTB phi tuyến cho pháo tàu Hải quân.*

Một cách tổng quát phần cơ của HTB gồm nhiều khối có liên kết đàn hồi với nhau sau đó quy đổi về trục động cơ, thông thường hay sử dụng mô hình hai vật, [2, 10].

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_d - B_m\omega - M_L \tag{1}$$

Ở đây, J là tổng mô men quán tính của động cơ và các phần khác quy đổi về trục động cơ, M_d là mô men động cơ, B_m là hệ số ma sát của thành phần ma sát phụ thuộc tốc độ, M_L là tổng các dạng mô men cản tác động lên trục động cơ và mô men cản quy đổi về trục động cơ. M_L là một hàm phi tuyến phức tạp phụ thuộc vào tốc độ động cơ, ma sát, độ đàn hồi của các trục truyền động, ...

Mô hình toán học của động cơ đồng bộ 3 pha PMSM trong hệ trục tọa độ d-q được viết như sau, [2, 6]:

$$\begin{aligned}
V_d &= R_s I_d + L_d\frac{dI_d}{dt} - P\omega L_d I_q \\
V_q &= R_s I_q + L_q\frac{dI_q}{dt} + P\omega L_q I_d + P\omega\lambda_m \\
M &= \frac{3}{2}P\lambda_m I_q + \frac{3}{2}P(L_d - L_q)I_d I_q \\
J\frac{d\omega}{dt} &= M - B_m\omega - M_L
\end{aligned} \tag{2}$$

Mô hình hệ truyền động bám là sự kết hợp của mô hình động học hệ truyền động cơ khí và động cơ chấp hành, khi xét HTB cần phải kể tới yếu tố phi tuyến và thông số biến thiên do phần cơ của hệ thống gây ra [1, 2, 3, 9, 10].

3. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN

3.1. Bộ điều khiển tốc độ backstepping trượt thích nghi

Khi tổng hợp vòng điều khiển tốc độ với đối tượng điều khiển phi tuyến, thì hệ phương trình của đối tượng điều khiển tồn tại dưới dạng phương trình trạng thái; chứa các ma trận có các phần tử phi tuyến, [2, 3, 4]. Vì vậy việc sử dụng các BĐK tuyến tính truyền thống như PID chưa khắc phục được ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến và thông số biến thiên đến chất lượng làm việc của hệ thống, [2, 8, 9, 10]. Bằng phương pháp tổng hợp BĐK backstepping trượt thích nghi các ảnh hưởng không tốt của ma sát, đàn hồi, đến chất lượng của hệ truyền động đã được giải quyết [5, 6]. Trong tài liệu [3] đã trình bày rất kĩ về phương pháp tổng hợp BĐK điều khiển backstepping trượt thích nghi cho vòng điều khiển tốc độ cho động cơ PMSM.

Bài toán tổng hợp bộ điều khiển cho vòng điều khiển tốc độ chính là bài toán xác định luật điều khiển cho V_d,V_q bảo đảm cho HTB làm việc ổn định và sai số bám nhanh chóng giảm về không. Khi xây dựng vòng điều khiển tốc độ, ta định nghĩa sai số bám như sau:

$$e_1 = \omega_d - \omega \tag{3}$$

$$e_2 = i_{\text{dd}} - i_d \tag{4}$$

Trong đó, ω_d và i_{dd} tương ứng là giá trị đặt của tốc độ rôtor và dòng điện trục d. Do động cơ PMSM có dạng cực ẩn, kích từ nam châm vĩnh cửu có tồn tại momen phản kháng. Dòng điện trục d được đặt khác không, được viết như sau, [2, 3, 7]:

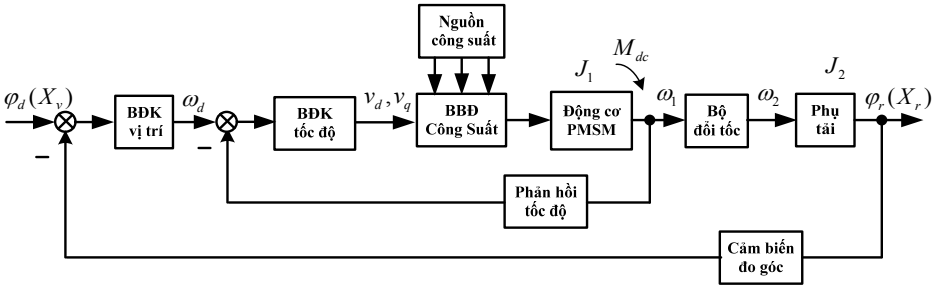
$$i_{\text{dd}} = \frac{-\lambda_m}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\lambda_m^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^2} \tag{5}$$

trong đó, λ_{mo} là từ thông móc vòng danh định, L_{do} *và* L_{qo} lần lượt là điện cảm trục d và điện cảm trục q danh định.

BĐK tốc độ Backstepping trượt thích nghi đã được mô tả trong như ở [3].

3.2. Tổng hợp vòng vị trí sử dụng động cơ PMSM trên cơ sở BĐK tốc độ backstepping trượt thích nghi

Khi giải bài toán tổng hợp vòng vị trí trong khuôn khổ mạch vòng tốc độ sử dụng phương pháp backstepping trượt thích nghi ở [3], có tính đến bộ quan sát phụ tải thì bài toán điều khiển sẽ đơn giản hơn.



Hình 3. *Sơ đồ khối bộ điều khiển vị trí HTB điện cơ làm việc ở chế độ chậm sử dụng động cơ PMSM.*

Khi tổng hợp BĐK vị trí, ta giả thiết rằng BĐK tốc độ đã tổng hợp ở [3] là đã tốt. Vòng điều khiển vị trí có đối tượng điều khiển chính là vòng tốc độ. Qua khảo

sát thực nghiệm và mô phỏng ta thấy vòng tốc độ có đặc tính động học tương đương với khâu bậc hai. Vì vậy, khi tổng hợp BĐK vị trí ta tiến hành nhận dạng các thông số của mô hình và coi vòng tốc độ tương đương với môt khâu bậc hai, nhiệm vụ chính lúc này là tổng hợp BĐK vị trí theo các phương pháp kinh điển.

Thực hiện tổng hợp BĐK vị trí trên cơ sở cho rằng vòng tốc độ đã được tổng hợp ở [3]. Động học của nó tương đương với khâu bậc hai có hàm truyền là [2]:

$$W_{K_\omega} = \frac{K_\omega}{(T_1 s+1).(T_2 s+1)} \tag{6}$$

Các thông số của hàm truyền này được xác định bằng thực nghiệm, như ở [2]. Tổng hợp BĐK vị trí có thể thực hiện theo các cách sau:

- Tổng hợp BĐK vị trí theo tiêu chuẩn tối ưu mô đun hoặc tối ưu đối xứng theo phương pháp đã được trình bày trong tài liệu [8, 9, 10].

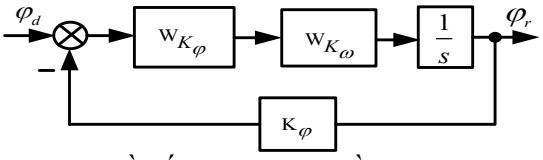
- Tổng hợp BĐK vị trí theo phương pháp Ziegler-Nichols hoặc phương pháp sử dụng phần mềm thiết kế BĐK PID Design như trong tài liệu [2], ... để thiết kế BĐK vị trí PID.

Như vậy, bài toán tổng hợp BĐK vị trí được tổng hợp theo hai bước: bước 1 là nhận dạng tham số của đối tượng điều khiển vòng vị trí (xác định các tham số của hàm truyền (6)), bước 2 là xác định tham số BĐK PID theo phương pháp kinh điển.

Khi tổng hợp theo tiêu chuẩn tối ưu đối xứng, theo phương pháp đã được trình bày trong tài liệu [2], ta biến đổi mẫu số của hàm truyền (6) như sau:

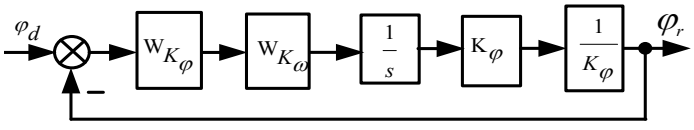
$$MS = (T_1 s+1).(T_2 s+1) = T_1 T_2 . s^2 + (T_1 + T_2)s + 1 \tag{7}$$

Bỏ qua số hạng bậc cao ở mẫu số ta có hàm truyền gần đúng là $W_{K_\omega} = K_\omega /(T_\omega s+1)$, với $T_\omega = T_1 + T_2$. Khi đó, sơ đồ cấu trúc được biến đổi thành sơ đồ như sau:



Hình 4. *Sơ đồ cấu trúc hệ truyền động bám vị trí.*

Tiếp tục biến đổi sơ đồ khối ta có sơ đồ sau:



Hình 5. *Biến đổi sơ đồ cấu trúc hệ truyền động bám vị trí.*

Ở hình 4, ta coi mạch vòng tốc độ $W_{k\omega}$ sau khi đơn giản hóa tương đương với một khâu quán tính, đây chính là bộ điều khiển tốc độ mà ta đã tổng hợp theo phương pháp backstepping trượt thích nghi [3]. Lúc này, BĐK vị trí cần xét chính là khâu $W_{k\varphi}$.

Vì thế đối với vòng vị trí, hàm truyền đối tượng có dạng sau:

$$W_{o\varphi} = W_{K_\omega} . K_\varphi (1/s) \tag{8}$$

trong đó, K_φ là hệ số truyền của phần đo (hoặc K_{do}), $W_{K_\omega} = K_\omega/(T_\omega s+1)$ là hàm truyền đạt vòng tốc độ đã được đơn giản gần đúng và bỏ qua số hạng bậc cao ở mẫu số.

Ta sử dụng phương pháp tổng hợp bộ điều khiển vị trí theo tiêu chuẩn tối ưu đối xứng, khi đó hàm truyền mong muốn của hệ hở có dạng:

$$W_{H\varphi} = \frac{2a_\varphi T_\omega s+1}{2a_\varphi T_\omega s}.\frac{1}{a_\varphi T_\omega s(T_\omega s+1)} \quad (9)$$

Khi đó hàm truyền bộ điều chỉnh vị trí là:

$$W_\varphi = \frac{W_{H\varphi}}{W_{0\varphi}} = \frac{K_\omega}{K_\varphi a_\varphi T_\omega} + \frac{K_\omega}{2K_\varphi a_\varphi^2 T_\omega^2 s} \quad (10)$$

Đặt $K_{d\varphi} = K_\omega/(K_\varphi a_\varphi T_\omega)$, ta thu được hàm truyền bộ điều chỉnh vị trí là:

$$W_\varphi = K_{d\varphi} + \frac{K_{d\varphi}}{2a_\varphi T_\omega s} \quad (11)$$

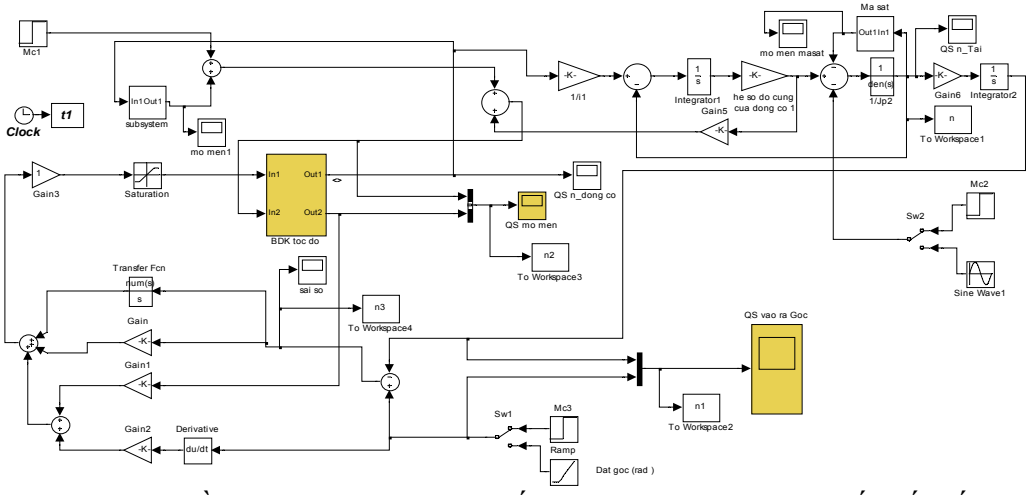
đây là bộ điều khiển tỷ lệ tích phân. Khi tổng hợp BDK vị trí PID ta sử dụng phần mềm chuyên dụng PID Design ở [2], để tính toán.

4. KHẢO SÁT MÔ PHỎNG

Mô phỏng hệ thống truyền động bám phi tuyến với BĐK vị trí trên cơ sở phương pháp backstepping trượt thích nghi sử dụng động cơ PMSM.

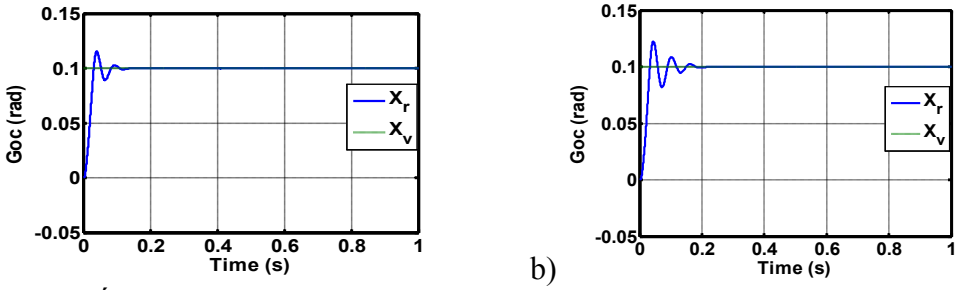
4.1. Nghiên cứu mô phỏng HTB trên cơ sở phương pháp backstepping trượt thích nghi với BĐK PI

Trên cơ sở bộ điều khiển vị trí PI đã được tổng hợp, đi nghiên cứu tính toán mô phỏng trong Matlab-Simulink như hình 6.



Hình 6. *Sơ đồ mô phỏng HTB phi tuyến với BĐK vị trí có tính đến yếu tố phi tuyến mô men ma sát và đàn hồi sử dụng khâu PI.*

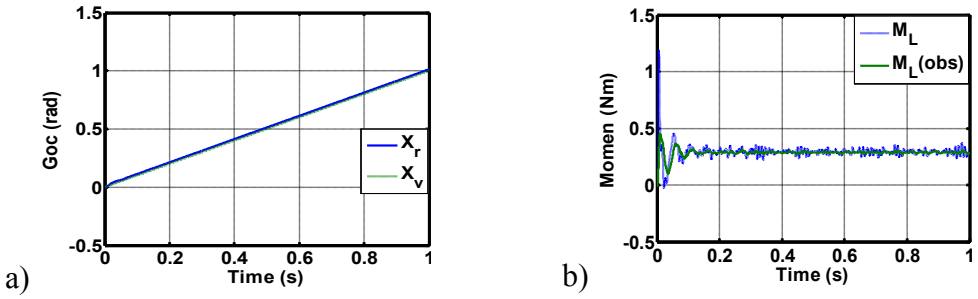
Trường hợp 1: Khi lượng vào hàm bậc thang X_v = 0.1 rad, mô men tải không thay đổi biên độ M_{cmax} = 0.5Nm. Thay đổi tăng mô men quán tính thêm 50% so với giá trị ban đầu. Với giá trị ban đầu (J_2 = 6Kgm^2); giá trị mới (J_2 = 9Kgm^2), kết quả mô phỏng như sau:



Hình 7. *Kết quả mô phỏng BĐK vị trí sử dụng khâu PI trường hợp 1 với đáp ứng vào ra theo góc với giá trị ban đầu: a) J_2 = 6Kgm^2, b) giá trị mới J_2 = 9Kgm^2.*

Trong trường hợp này kết quả cho thấy khi mô men quán tính tăng lên độ dao động của hệ thống có tăng (giá trị ban đầu "J_2 = 6Kgm^2" số lần dao động = 1; giá trị sau "J_2 = 9Kgm^2" số lần dao động = 2), lượng ra vẫn bám sát lượng vào ở quá trình cân bằng.

Trường hợp 2: Nghiên cứu phản ứng của hệ thống khi góc đặt vào thay đổi theo quy luật hàm X_v = V.t, (V = 1rad/s) mô men tải không đổi M_c = 0,5Nm.



Hình 8. *Đáp ứng vào ra BĐK vị trí sử dụng khâu PI trường hợp 2: a) theo góc, b) quan sát mô men tải.*

Khi góc đặt là hàm V.t thời gian đạt giá trị cân bằng nhỏ. Sai số bám sát bằng không, ta thấy bộ quan sát mô men tải cho đáp ứng với thời gian khá nhanh; cung cấp đầy đủ thông tin về phụ tải cho BĐK.

4.2. Nghiên cứu mô phỏng HTB vị trí trên cơ sở phương pháp backstepping trượt thích nghi với BĐK PID

Bộ điều khiển PI có cấu trúc đơn giản và dễ thực hiện trên thực tế khi lượng vào hệ thống là các đại lượng thay đổi thì chất lượng động học của hệ thống chưa cao. Để nâng cao chất lượng hệ thống ta sử dụng thêm thành phần vi phân, đó là BĐK PID. Sơ đồ mô phỏng được xây dựng trên cơ sở Matlab simulink như hình 9.

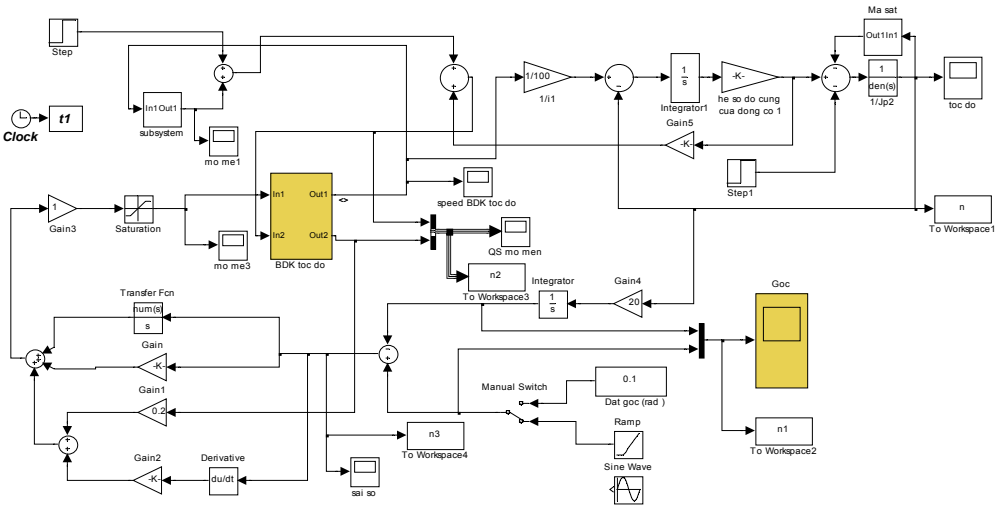
Khi đã có mô hình đối tượng điều khiển là BĐK tốc độ được nhận dạng trên cơ sở sử dụng nhiều phương pháp khác nhau để tính toán nhận dạng như: phương pháp Ziegler-Nichols, phương pháp sử dụng phần mềm thiết kế BĐK PID Design như trong tài liệu [2], ... để thiết kế BĐK vị trí PI và PID.

Sơ đồ mô phỏng của BĐK vị trí PID được thiết kế như sau: thông số của BĐK vị trí PID là: K_P = 9000, K_I = 60, K_D = 65.

Nghiên cứu mô phỏng được thực hiện với ba trường hợp cơ bản là:

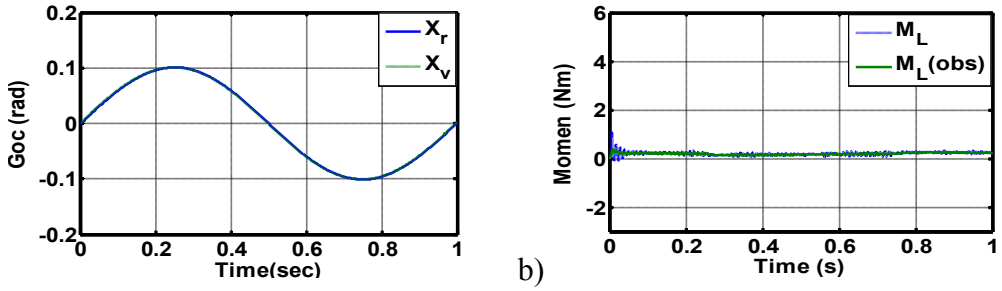
- Lượng vào thay đổi theo quy luật hình sin $X_v = X_m \sin(2\pi t)$.

- Lượng vào thay đổi với tốc độ không đổi X_v = V.t.
- Lượng vào không đổi với góc đặt nhỏ X_v = 0,1rad.



Hình 9. *Sơ đồ mô phỏng HTB với BĐK vị trí có tính đến yếu tố phi tuyến mô men ma sát và đàn hồi sử dụng khâu PID.*

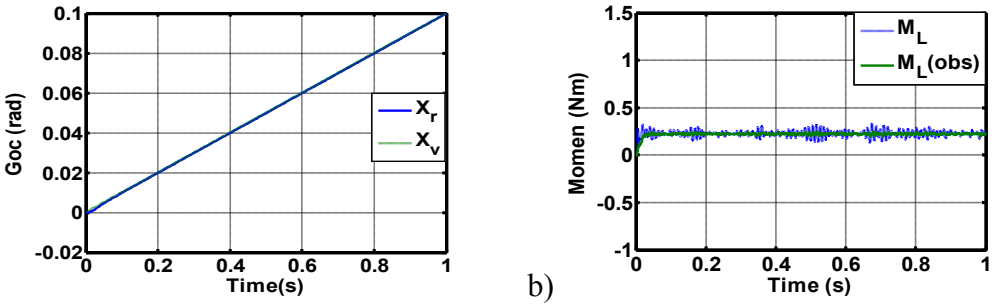
Trường hợp 1: Góc đặt vào một đại lượng điều hòa $X_v = X_m \sin(2\pi t)$, biên độ X_m = 0,1 chu kỳ T = 1s. HTB làm việc ở chế độ khi có sự ảnh hưởng mô men ma sát trên trục động cơ và mô men ma sát phía tải:



a) b)

Hình 10. *Đáp ứng vào ra BĐK vị trí sử dụng khâu PID trường hợp 1: a) theo góc, b) quan sát mô men tải.*

Trường hợp 2: Góc đặt vào là một đại lượng X_v = 0,1t, HTB làm việc ở chế độ khi có sự ảnh hưởng mô men ma sát trên trục động cơ, và mô men ma sát phía tải, ta có các kết quả như sau:

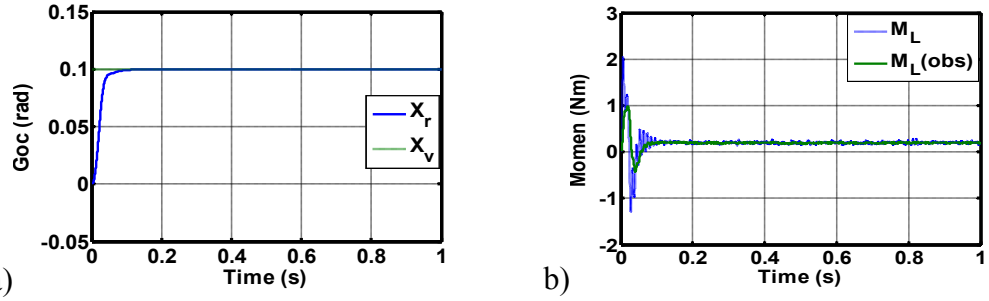


a) b)

Hình 11. *Đáp ứng vào ra BĐK vị trí sử dụng khâu PID trường hợp 2: a) theo góc, b) quan sát mô men tải.*

Khi lượng đặt là hàm X_v = 0,1t. Ta thấy trường hợp này lượng vào biến thiên với tốc độ chậm ω_v = 0,1 rad/s (tương đương với gần 1 vòng/phút). Bộ quan sát phụ tải cung cấp được đầy đủ thông tin về BĐK. Lượng ra bám sát lượng vào như hình 11. Như vậy, hệ thống có khả năng làm việc tốt (không có sai số) khi lượng vào biến thiên với tốc độ nhỏ không đổi.

Trường hợp 3: Góc đặt vào là một đại lượng không đổi X_v = 0,1 rad, hệ thống làm việc ở chế độ khi có sự ảnh hưởng của mô men ma sát trên trục động cơ, và mô men ma sát phía tải, ta có các kết quả như sau:



a) b)

Hình 12. *Đáp ứng vào ra BĐK vị trí sử dụng khâu PID trường hợp 3: a) theo góc, b) quan sát mô men tải.*

Kết quả bộ quan sát phụ tải cung cấp được thông tin để tổng hợp thuật toán điều khiển. Quá trình quá độ có tính chất tiệm cận, xẩy ra êm không có độ quá chỉnh. Lượng ra bám sát lượng vào, sai số tĩnh bằng 0 như hình 12. Như vậy, HTB có khả năng làm việc tốt bảo đảm tính chất tiệm cận khi khử góc sai lệch.

Như vậy, khi sử dụng BĐK vị trí PID cho thấy chất lượng động học HTB được cải thiện hơn nhiều so với BĐK PI. Quá trình làm việc tốt bảo đảm tính chất tiệm cận khi khử góc sai lệch. Khi lượng vào thay đổi theo thời gian có dạng hình sin hoặc hàm V.t thì đáp ứng của hệ thống làm việc tốt, không có sai số ở quá trình cân bằng.

4. KẾT LUẬN

Hệ thống truyền động bám vị trí cho các đối tượng trong công nghiệp và quân sự cần đòi hỏi độ tin cậy và độ chính xác cao, việc thay thế các động cơ 1 chiều bằng các động cơ xoay chiều đồng bộ là rất cần thiết. Bài báo đã trình bày được về cách tiệm cận mới tổng hợp HTB vị trí sử dụng động cơ đồng bộ có mô hình phi tuyến và thông số biến thiên. Kết hợp được BĐK tốc độ backstepping trượt thích nghi và bộ điều khiển kinh điển đã cho ta một hướng đi đúng và đã tạo ra được BĐK vị trí cho HTB điện cơ đang được sử dụng nhiều trong thực tế. Các kết quả nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng thu được đã chứng minh được tính đúng đắn của thuật toán và kết quả nghiên cứu này hoàn toàn có thể ứng dụng vào trong thực tế cho hệ thống truyền động điện bám trong công nghiệp và quân sự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Trần Đức Chuyển, Đào Hoa Việt, ”*Xây dựng hệ thống điều khiển vị trí với cấu trúc biến đổi sử dụng động cơ xoay chiều 3 pha”*, Tạp chí Khoa học Kỹ thuật; Học viện Kỹ thuật quân sự, tr 128-136, số 142; (2011).

[2]. Đào Hoa Việt, "*Phân tích và tổng hợp hệ thống truyền động điện"*. HVKTQS, (2010).
[3]. Tran Duc Chuyen, Nguyen Thanh Tien, Dao Hoa Viet, "*Designing a syntheszing adaptive backstepping sliding mode controller for drive systems tracking electric mechanisms using synchronous Ac motors"*, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering, page: 64 - 72. Volume 5, Issue 3, March - 2015.
[4]. Asif Sabanovic, Leonid M. Fridman and Sarah Spurgeon, "*Variable Structure Systems from principles to implementation"*, first published, (2004).
[5]. Andrzej Bartoszewicz, "*Sliding mode control*", first published March Printed in India, (2011).
[6]. John Chiasson "*Modeling and high performance control of electric machines*", Wiley-IEEE Press, (2005).
[7]. J.J. Slotine and W. Li, "*Applied Nonlinear Control"*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1991).
[8]. С.В. Емельянов, С.К. Коровин. "*Нелинейная динамика и управление"*. Выпуск 4, Москва Физматлит, (2004).
[9]. Б.К Чемоданов – "*Следящие приводы"* Т1, 2.- М.: Изд. МГТУ им Баумана, (1999).
[10]. КлючевВ.И. "*Теория электропривода"*, Москва энергоатомиздт, (2001).

ABSTRACT

SYNTHESISZING THE POSITION CONTROLLER FOR DRIVER SYSTEM TRACKING ELECTRIC MECHANISMS USES PMSM MOTORS

In this paper, a controller synthesis method drive system tracking control position uses PMSM motors used in industrial and military take into account nonlinear and the change parameters of the model is presented. The system consists of position controller loop and loop speed controller. In which loop speed controller using adaptive law to compensate the uncertainty function and built the sliding mode observers to estimate load torque, friction and interferences. The controller is proposed to improve the quality system, taking into account the uncertain nonlinear components for drive systems such as moment of inertia, friction torque, elasticity. Research results will be the basis for the establishment of control algorithms, system design electric drives in the industry and army.

Keywords: PMSM motor control, Drive system tracking control, Variable structural control.

Nhận bài ngày 19 tháng 5 năm 2016
Hoàn thiện ngày 21 tháng 10 năm 2016
Chấp nhận đăng ngày 14 tháng 12 năm 2016

Địa chỉ: [1]Khoa Kỹ thuật Điều khiển, Học Viện Kỹ thuật quân sự.
[2]Khoa Điện - Trường ĐH Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp
[*]Email*:* trdchuyenktd@gmail.com ; phungxhung@yahoo.com.