

NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG KHẪU ĐIỀU KHIỂN PI CHO HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG VỚI GHÉP NỐI ĐÀN HỒI

ADVANCING PI CONTROLLER QUALITY FOR DRIVER SYSTEM WITH AN ELASTIC JOINT

Trần Văn Thân

Trường Đại học Trần Đại Nghĩa; tranthanpkq@gmail.com

Tóm tắt - Trong bài báo này, tác giả sẽ trình bày phương pháp thiết kế và kết quả nghiên cứu sửa đổi khâu điều khiển PI cổ điển nhằm mục đích nâng cao chất lượng khâu điều khiển PI cho hệ thống truyền động với ghép nối đàn hồi. Sau phần mở đầu ngắn gọn tác giả sẽ trình bày về phương pháp và các bước thiết kế khâu điều khiển PI cũng như khâu PI được sửa đổi. Đồng thời tác giả đánh giá những ưu nhược điểm của khâu PI cổ điển từ đó sửa đổi khâu PI bằng cách bổ sung thêm các thành phần phản hồi về đầu vào khâu điều khiển PI như mô men xoắn m_s và sai lệch giữa tốc độ động cơ và tốc độ tải ($\omega_2 - \omega_1$). Tác giả đánh giá kết quả nghiên cứu và rút ra kết luận cho hệ thống được thiết kế thông qua kết quả mô phỏng bằng phần mềm Matlab & Simulink kết hợp với kết quả thử nghiệm tại phòng thí nghiệm trên đối tượng thực.

Từ khóa - hệ thống truyền động hai khối; khâu điều khiển PI; phản hồi trạng thái; chống rung xoắn; hệ thống truyền động.

Abstract - This paper presents the design methods and research results of classic PI controller modification in order to improve control quality in powertrain PI for driver system with an elastic joint. Following the brief opening, the author explains the methods and design stages in controlling as well as modifying PI. Simultaneously, the research assesses the advantages and disadvantages of classic PI and hence modifies it by adding feedback ingredients to controller input stages such as torque m_s , deviation between motor speed and load speed ($\omega_2 - \omega_1$). It also reviews the study outcomes and draws the conclusions on system through the simulation results using Matlab & Simulink software combining with the results of laboratory testing on real objects.

Key words - two-mass system drive; PI controller; feedback state; damping; drive system.

1. Đặt vấn đề

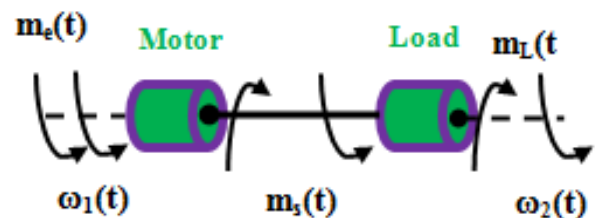
Trong thực tế, rất nhiều hệ thống truyền động có xảy ra hiện tượng ghép nối với trục không cứng hoàn toàn. Trong những hệ thống đó, có thể do kết cấu của trục không cứng hoàn toàn, hay do tương quan giữa mô men quán tính của động cơ cũng như máy công cụ rất lớn so với độ cứng của trục ghép nối... Trong rất nhiều nghiên cứu hiện nay, những hệ thống này được biết đến với tên gọi quen thuộc – hệ thống truyền động hai khối (two-mass system) – hay hệ thống truyền động với ghép nối đàn hồi, ghép nối mềm. Khi xảy ra hiện tượng trên, để điều khiển chính xác đối tượng là vô cùng khó khăn, dưới tác dụng mô men quay của động cơ gây nên hiện tượng biến dạng đàn hồi và sinh ra mô men xoắn trên trục, trong hệ thống có thể xảy ra hiện tượng dao động, có khả năng dẫn tới hiện tượng mất ổn định cho hệ thống, nguy hiểm hơn có thể dẫn tới phá hủy hệ thống. Hoặc hệ thống hoạt động được thì cũng với thời gian quá trình quá độ dài, độ chính xác và đáp ứng tín hiệu điều khiển với những giá trị xác lập mong muốn vô cùng khó khăn. Trong các nghiên cứu hiện nay, để điều khiển hệ thống truyền động dạng này có rất nhiều phương pháp khác nhau, nhưng nói chung nó được xem xét ở hai mảng sau đây: điều khiển hệ thống dùng các thuật toán điều khiển cổ điển [3], [5], [7], [8] và điều khiển hệ thống sử dụng các thuật toán điều khiển hiện đại [4], [6], [9], [10]. Với mục đích nâng cao chất lượng, thỏa mãn các yêu cầu đặt ra cho quá trình điều khiển hệ thống truyền động hai khối, trong nghiên cứu này tác giả thực hiện theo giải pháp mới đó là: sửa đổi thuật toán điều khiển PI cổ điển cho hệ thống truyền động với ghép nối đàn hồi.

2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Mô hình toán đối tượng nghiên cứu

Hệ thống truyền động với ghép nối đàn hồi được biết đến với tên gọi quen thuộc là hệ thống truyền động hai khối (two-

mass system). Khối thứ nhất được hiểu ở đây là động cơ điện (có thể là động cơ điện một chiều, xoay chiều, PMSM...) phát sinh ra truyền động trong hệ thống, khối thứ hai đó là máy tải, hay máy làm việc. Cả hai khối này được gắn lên hai đầu một trục dẫn động mà ở đó trục không cứng hoàn toàn, trên trục dẫn động phát sinh mô men xoắn trong quá trình truyền động [1], [2], [3], [5], [7], [11]. Đó chính là yếu tố gây ra sự sai khác (không mong muốn) giữa tốc độ động cơ phát động ω_1 và tốc độ máy làm việc ω_2 , hoặc nguy hiểm hơn còn có thể dẫn tới dao động mạnh phá hủy cả hệ thống.



Hình 1. Sơ đồ vật lý hệ thống truyền động hai khối

Sơ đồ vật lý mô tả hệ thống truyền động hai khối được thể hiện trên Hình 1. Qua phân tích hệ thống [3], [6], [7], [9] chúng ta nhận được hệ phương trình vi phân mô tả hệ thống truyền động hai khối như sau (1)-(3):

$$T_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} = m_e(t) - m_s(t) \quad (1)$$

$$T_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} = m_s(t) - m_L(t) \quad (2)$$

$$T_c \frac{dm_s(t)}{dt} = \omega_1(t) - \omega_2(t) \quad (3)$$

Ở đây: ω_1, ω_2 – tốc độ động cơ và tốc độ tải; m_e, m_s, m_L – mô men điện từ, mô men xoắn và mô men tải; T_1, T_2, T_c – hằng số thời gian cơ khí động cơ, của tải và thành phần đàn hồi hệ thống.

Hệ thống đã được nghiên cứu cả trên phần mềm mô

phòng *Matlab & Simulink* và kiểm nghiệm trên cả đối tượng thực ở phòng thí nghiệm với các giá trị hằng số thời gian danh định là: $T_1 = T_2 = 203\text{ms}$ và $T_c = 2,6\text{ms}$.

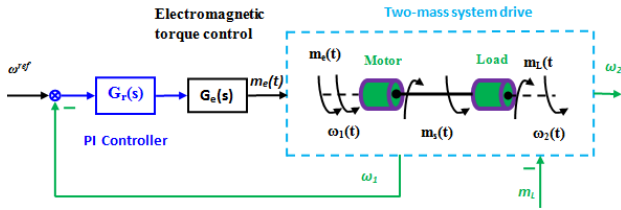
Từ mô hình toán học mô tả đối tượng (1) – (3) với giả định quan hệ tín hiệu vào hệ thống truyền động là mô men điện từ m_e và tín hiệu ra hệ thống truyền động là tốc độ tải ω_2 , qua tính toán ta nhận được hàm truyền đạt của hệ thống truyền động hai khối như sau (4):

$$G_{\omega_2}(s) = \frac{\omega_2(s)}{m_e(s)} = \frac{1}{s^2 T_1 T_2 T_c + s(T_1 + T_2)} \quad (4)$$

2.2. Cấu trúc điều khiển

Với mục đích nâng cao chất lượng điều khiển cho hệ thống truyền động hai khối, sau đây chúng ta sẽ nghiên cứu hệ thống với cấu trúc điều khiển là khâu *PI* cổ điển, qua kết quả mô phỏng sẽ phân tích chất lượng làm việc của khâu. Đó là cơ sở để tác giả đưa ra được giải pháp sửa đổi, thiết kế khâu *PI* với chất lượng làm việc tối ưu hơn.

2.2.1. Cấu trúc điều khiển với *PI* cổ điển



Hình 2. Cấu trúc điều khiển hệ thống với khâu *PI* cổ điển

Cấu trúc điều khiển tốc độ hệ thống với khâu điều khiển *PI* cổ điển thể hiện trên Hình 2, trong đó: tín hiệu tác động vào hệ thống hai khối là mô men điện từ m_e và mô men tải m_L . Trong cấu trúc này, tín hiệu tốc độ động cơ ω_1 được đưa về đầu vào khâu điều khiển *PI* để so sánh với tốc độ đặt. Tín hiệu ra của khâu *PI* được đưa tới vòng điều khiển mô men để tạo ra mô men điện từ m_e đưa đến điều khiển động cơ điện (ở khối thứ nhất) và đảm bảo cho cả hệ thống truyền động hai khối vận hành. Tuy nhiên, vòng điều khiển mô men sẽ được đề cập đến trong một nghiên cứu khác, ở đây coi như vòng điều khiển mô men điện từ đã là tối ưu cho hệ thống truyền động hai khối.

Với quan hệ tín hiệu vào hệ thống là tốc độ đặt ω_r và tín hiệu ra là tốc độ tải ω_2 . Trong các nghiên cứu đã chỉ ra rằng vòng điều khiển mô men cho hệ thống tối ưu có hàm truyền đạt tương đương như khâu quán tính có hằng số thời gian khá nhỏ, nên có thể lấy gần đúng là $G_e(s) \approx 1$. Với giả thiết đó, qua tính toán nhận được hàm truyền đạt cho cả cấu trúc điều khiển hệ thống là (5):

$$G_{\omega_2}(s) = \frac{\omega_2(s)}{\omega_r(s)} = \frac{G_R(s)}{s^3 T_1 T_2 T_c + s^2 T_2 T_c G_R(s) + s(T_1 + T_2) + G_R(s)} \quad (5)$$

Với: $G_R = K_p + \frac{K_I}{s}$ hàm truyền đạt của khâu *PI* (6)

Từ (5) chúng ta nhận được phương trình đặc trưng mô tả hệ thống là (7):

$$s^4 + s^3 \frac{K_p}{T_1} + s^2 \left(\frac{K_I}{T_1} + \frac{1}{T_1 T_c} + \frac{1}{T_2 T_c} \right) + s \frac{K_p}{T_1 T_2 T_c} + \frac{K_I}{T_1 T_2 T_c} = 0 \quad (7)$$

Với hệ thống có phương trình đặc trưng dạng (7), phương trình đặc trưng của mô hình tham chiếu hệ thống sẽ có dạng như sau (8):

$$s^4 + s^3 4\zeta\omega + s^2 (2\omega^2 + 4\zeta^2\omega^2) + s 4\zeta\omega^3 + \omega^4 = 0 \quad (8)$$

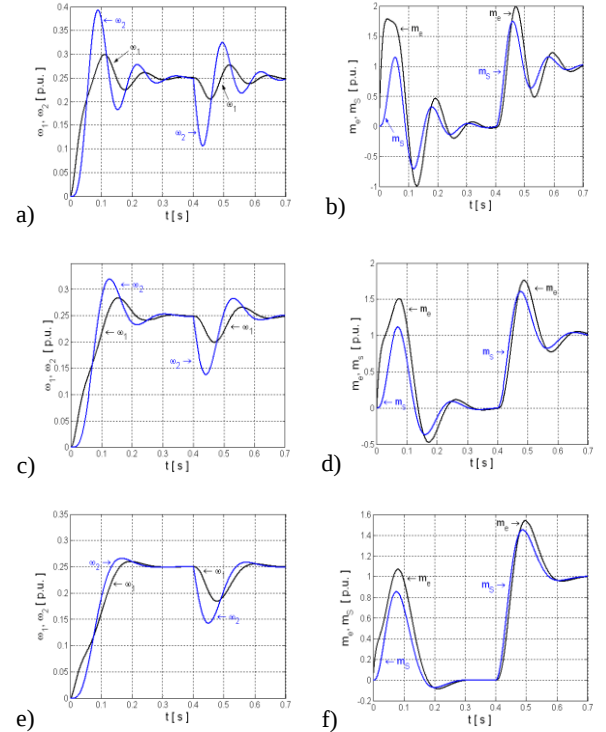
Sau khi đồng nhất các hệ số cùng bậc phương trình đặc trưng hệ thống (7) với phương trình đặc trưng của mô hình tham chiếu hệ thống (8), tính toán chúng ta nhận được hệ phương trình sau (9-12):

$$\xi = 2^{-1} \sqrt{T_2 T_1^{-1}} - \text{hệ số dao động tắt dần} \quad (9)$$

$$\omega = \sqrt{(T_2 T_c)^{-1}} - \text{tần số dao động cộng hưởng} \quad (10)$$

$$K_p = 2\sqrt{T_1 T_c^{-1}} - \text{hằng số khuếch đại tỉ lệ PI} \quad (11)$$

$$K_I = T_1 (T_2 T_c)^{-1} - \text{hằng số tỉ lệ tích phân PI} \quad (12)$$



Hình 3. Kết quả mô phỏng: tốc độ động cơ (đen), tốc độ tải (xanh) (a,c,e); mô men điện từ (đen), mô men xoắn (xanh) (b,d,f). $R=0,5$ (a,b); $R=1$ (c,d); $R=2$ (e,f)

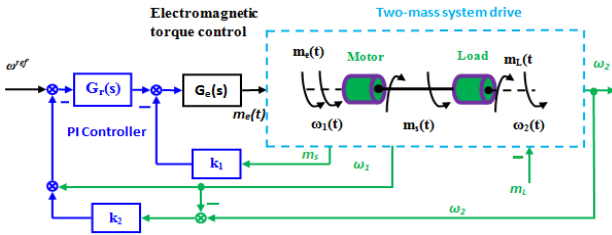
Với khâu *PI* cổ điển vừa xây dựng, quan sát chúng ta nhận thấy các hệ số của khâu hoàn toàn phụ thuộc vào tham số đối tượng T_1, T_2, T_c . Để chỉnh định tham số (các hệ số K_p, K_I) khâu *PI* chúng ta chỉ có thể thay đổi các tham số hệ thống, hay thay đổi tương quan giá trị giữa các tham số trên. Trong nghiên cứu này chúng ta đặt hệ số tỉ lệ $R = T_2/T_1$, với giá trị danh định cho hệ thống $R=1$ (hay $T_2=T_1=203\text{ms}$). Ứng dụng với các tham số tính toán như trên, tiếp theo sẽ trình bày kết quả mô phỏng xem xét phản ứng xảy trong hệ thống. Trên Hình 3 đã thể hiện kết quả mô phỏng cho khâu *PI* cổ điển với các giá trị R khác nhau.

Quan sát kết quả mô phỏng chúng ta nhận thấy, khi R nhỏ ($R=0,5$), tức là hằng số thời gian của máy tải T_2 nhỏ tương ứng mô men quán tính của máy công cụ nhỏ, các tín hiệu trong hệ thống xảy ra dao động và trong trường hợp này độ quá điều chỉnh cũng lớn hơn, sự sai khác giữa tốc độ tải ω_2 và tốc độ động cơ ω_1 lớn (Hình 3a,c). Khi tăng hệ số tỉ lệ R , tức là tăng hằng số thời gian của tải T_2 , mô men quán tính của máy tải tăng (Hình 3c, $R=1$, Hình 3e $R=2$), sẽ giảm

dao động xảy ra trong hệ thống, độ quá điều chỉnh cũng giảm nhanh, hệ thống nhanh chóng đạt giá trị tín hiệu tốc độ đặt và đi vào làm việc ổn định. Điều đó cũng thể hiện tương tự trên kết quả mô phỏng cho mô men điện từ m_e và mô men xoắn m_s (Hình 3b, d, f). Với khâu điều khiển PI cổ điển, để chất lượng điều khiển tốt hơn ta chỉ có mỗi phương pháp tăng hệ số R . Đó là điểm hạn chế cơ bản của khâu PI.

2.2.2. Cấu trúc điều khiển với khâu PI sửa đổi

Trên cơ sở các kết quả đã phân tích ở trên, tác giả đã đưa ra giải pháp sửa đổi khâu PI bằng cách bổ sung thêm các thành phần phản hồi về đầu vào khâu điều khiển. Trên Hình 4 giới thiệu khâu PI được sửa đổi, ngoài khâu PI cổ điển tương tự như trường hợp trên, hệ thống bổ sung thêm hai vòng phản hồi về khâu điều khiển. Vòng phản hồi thứ nhất đó là mô men xoắn m_s lấy từ hệ thống: giá trị mô men xoắn m_s này đưa qua hệ số k_1 và đưa vào so sánh với giá trị đầu ra khâu PI sau đó cùng đưa vào vòng điều khiển mô men của hệ thống; tín hiệu phản hồi thứ hai đó là sai lệch (hiệu số $\omega_2 - \omega_1$) giữa tốc độ động cơ ω_1 và tốc độ tải ω_2 được đưa qua hệ số k_2 sau đó chúng được đưa tới bộ tổng hợp cùng với giá trị tín hiệu tốc độ động cơ ω_1 và so sánh với tốc độ đặt ω^* để đưa vào khâu điều khiển PI.



Hình 4. Cấu trúc điều khiển với khâu PI bổ sung thêm thành các biến trạng thái phản hồi từ hệ thống

Với sơ đồ cấu trúc hệ thống trên Hình 4, ta có thể dễ dàng tính được hàm truyền đạt của hệ thống để từ đó nhận được phương trình đặc trưng có dạng (13) như sau:

$$s^4 + s^3 \frac{K_p}{T_1} (1 + k_2) + s^2 \left[\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1} \left(\frac{k_1}{T_c} + \frac{1}{T_c} + K_i (1 + k_2) \right) \right] + s \frac{K_p}{T_1 T_2 T_c} + \frac{K_i}{T_1 T_2 T_c} = 0 \quad (13)$$

Tính toán tương tự như trường hợp cho khâu PI cổ điển ở trên sẽ nhận được hệ phương trình (14-17) quan hệ như sau:

$$k_1 = 4\zeta^2 \omega^2 T_2 T_1 - T_1 T_c^{-1} - T_c T_2^{-1} \quad (14)$$

$$k_2 = (\omega^2 T_2 T_c)^{-1} - 1 \quad (15)$$

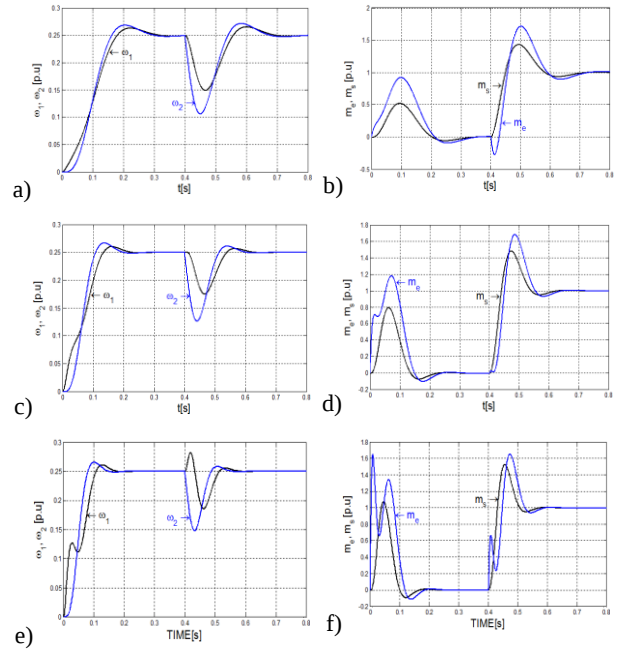
$$K_p = 4T_1 T_2 T_c \zeta \omega^3 \quad (16)$$

$$K_i = T_1 T_2 T_c \omega^4 \quad (17)$$

Trong đó: ω là tần số dao động cộng hưởng và ζ là hệ số dao động tắt dần của khâu PI sửa đổi mà ta thiết kế.

Quan sát hệ phương trình (14-17) dễ dàng nhận thấy, các hệ số của khâu PI (K_p , K_i) và các hệ số bổ sung (k_1 , k_2) ngoài phụ thuộc vào tham số của hệ thống T_1 , T_2 , T_c và nó còn phụ thuộc vào tần số dao động cộng hưởng ω và hệ số dao động tắt dần ζ của hệ thống vừa mới thiết kế. Thay đổi giá trị của các tham số này (ζ và ω) cho phép chúng ta thay đổi chất lượng của quá trình điều khiển hệ thống. Đây là điểm đặc biệt quan trọng mà khâu PI cổ điển không thể có được. Qua các kết quả mô phỏng đã được thử nghiệm, hệ số dao động tắt dần $\zeta=0.7$ là tốt nhất cho hệ thống. Giá trị này thỏa mãn các yêu

cầu cho quá trình đáp ứng nhanh, độ quá điều chỉnh thích hợp cũng hạn chế dao động xảy ra trong hệ thống.

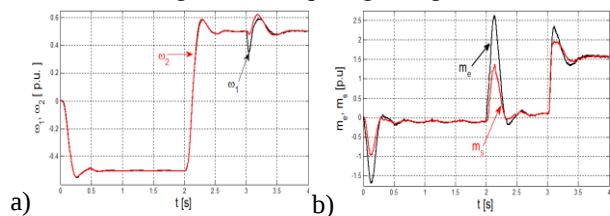


Hình 5. Kết quả mô phỏng: tốc độ động cơ (đen), tốc độ tải (xanh) (a,c,e); mô men điện từ (đen), mô men xoắn (xanh) (b,d,f). Với $\zeta=0.7$ và $\omega=30s^{-1}$ (a,b); $\omega=45s^{-1}$ (c,d); $\omega=60s^{-1}$ (e,f)

Sau đây ta sẽ đi nghiên cứu kết quả mô phỏng với các giá trị khác nhau của tần số dao động cộng hưởng ω . Các kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 5 với giá trị $\zeta=0.7$. Ở Hình 5a, b với giá trị $\omega=30s^{-1}$, với giá trị này quan sát chúng ta thấy thời gian đáp ứng của hệ thống chậm, do khi có đột biến mô men điện từ m_e tăng chậm là kết quả của đáp ứng tốc độ. Ở Hình 5e, f khi giá trị $\omega=60s^{-1}$, đặt giá trị khá lớn mô men điện từ lớn nhưng không ổn định, có xảy ra hiện tượng dao động nên ảnh hưởng đến tín hiệu tốc độ động cơ ω_1 , khi có tác động của tải ($t=0.4s$) hiện tượng tương tự xảy ra trên tốc độ động cơ ω_1 . Mặc dù thời gian đáp ứng giá trị đặt tương đối nhanh, thời gian quá độ ngắn, nhưng nhìn chung trong trường hợp này tín hiệu không thực sự tốt. Trở lại với Hình 5c, d, khi giá trị $\omega=45s^{-1}$ chất lượng điều khiển hệ thống hai khối đạt tốt nhất so với hai trường hợp vừa phân tích ở trên. Tốc độ động cơ ω_1 và tốc độ tải ω_2 đều đảm bảo đáp ứng nhanh, khi có tác động của mô men tải cả mô men và tốc độ đều đạt độ ổn định cao, đặc biệt không xảy ra dao động trong quá trình động, đây là giá trị tham số tối ưu cho cài đặt khâu PI sửa đổi.

Ngoài các kết quả mô phỏng trên phần mềm *Matlab* & *Simulink* đã phân tích trên đây, nghiên cứu còn tiến hành đánh giá trên đối tượng thực tại phòng thí nghiệm (Hình 7) (*). Trên Hình 6 thể hiện kết quả kiểm định tại phòng Lab, với tham số mô phỏng tối ưu đã phân tích trên đây, cài đặt cho khâu điều khiển PI sửa đổi, chúng ta nhận thấy thời gian đáp ứng cũng như độ quá điều chỉnh của hệ thống rất tốt, đặc biệt khi có tác động đột biến hệ thống không xảy ra dao động và nhanh chóng đi vào trạng thái làm việc ổn định. Trong quá trình đó mô men điện từ m_e tăng nhanh (về độ lớn), sau khi hệ thống làm việc ổn định nó lại giảm nhanh về giá trị danh định, còn mô men xoắn bám theo mô

men điện từ và đặc biệt không xảy ra dao động, hay mất ổn định. Điều này chứng tỏ khâu PI sửa đổi làm việc rất tốt trên cả đối tượng thực tế tại phòng thí nghiệm.

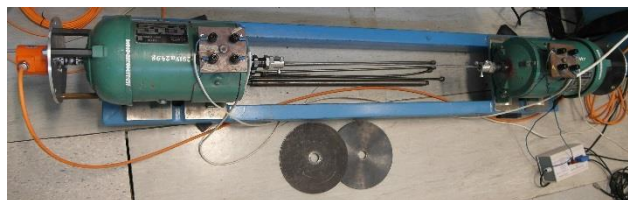


Hình 6. Kết quả thực nghiệm đo lường trên đối tượng thực, tốc độ động cơ (đen), tốc độ tải (đỏ) (a); mô men điện từ (đen), mô men xoắn (đỏ) (b) (Trong cấu trúc điều khiển PI sửa đổi, với $\omega=45s^{-1}$, $\zeta=0,7$)

3. Kết luận

Với các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra trên đây, chúng ta có thể rút ra các kết luận sau:

Khâu điều khiển PI cổ điển vẫn có thể điều khiển hệ thống truyền động hai khối, tuy nhiên chất lượng điều khiển hệ thống chưa tốt, chưa đáp ứng được các yêu cầu đặt ra cho các tiêu chí thiết kế. Hơn nữa, việc chỉnh định các tham số của khâu PI rất khó khăn chỉ có thể điều chỉnh qua tham số của hệ thống, điều này rất bị động cho quá trình thiết kế.



Hình 7. Mô hình đối tượng nghiên cứu thực tại phòng thí nghiệm

(*) Phòng thí nghiệm tại bộ môn Cơ điện tử và Tự động hóa công nghiệp – Viện Máy, Đo lường và Truyền động điện Khoa Điện – Đại học Bách khoa Wrocław – CH Ba Lan.

Khâu điều khiển PI được sửa đổi với việc bổ sung thêm thành phần phản hồi như mô men xoắn m_s , và sai lệch giữa tốc độ động cơ ω_1 với tốc độ tải ω_2 về đầu vào qua các hệ số k_1, k_2 cho phép hệ thống có tác động nhanh; độ quá điều chỉnh nhỏ; không xảy ra dao động; độ ổn định làm việc và độ tin cậy làm việc cao. Hơn nữa, khâu PI sửa đổi có khả năng chỉnh định giá trị các hệ số K_I, K_P, k_1, k_2 thông qua hệ

số dao động tắt dần và tần số dao động cộng hưởng ω của hệ thống, đảm bảo linh hoạt trong quá trình chỉnh định chất lượng điều khiển hệ thống. Hệ thống làm việc tốt trên cả kết quả mô phỏng và trên cả đối tượng thực. Trên đây là những ưu điểm nổi bật của khâu PI sửa đổi, đảm bảo tốt các tiêu chí chất lượng cho quá trình điều khiển hệ thống truyền động với ghép nối đàn hồi./.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Văn Thân, Marcin Kamiński, Krzysztof Szabat., Ứng dụng mô hình mờ mờ trong ước lượng biến trạng thái hệ thống truyền động điện với ghép nối đàn hồi, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, trang 41-48. Số 52, 2012.
- [2] Trần Văn Thân, Marcin Kamiński, Krzysztof Szabat., Ước lượng các trạng thái không thể đo lường trong hệ truyền động điện với ghép nối đàn hồi sử dụng lô gic mờ cho khâu quan sát Luenberger. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, trang 79-84. Số 66, 2013.
- [3] Trần Văn Thân., Zastosowanie logiki rozmytej w estymatorach zmiennych stanu układu napędowego z połączeniem sprzężystym. Rozprawa doktorska (27.09.2013) Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wrocław
- [4] John H Lilly; Fuzzy control and identification; John Wiley & Sons, 4, October, 2010 – p.300
- [5] Krzysztof Szabat., Analiza układów sterowania napędu prądu stałego z połączeniem sprzężystym z regulatorami klasycznymi i rozmytymi. Rozprawa doktorska Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wrocław (20.09.2003)
- [6] Krzysztof Szabat., Serkies P., Cychowski M.; Application of the MPC to the robust control of the two-mass drive system; *Industrial Electronics (ISIE) page(s): 1901 - 1906, IEEE International Symposium on Date of Conference: 27-30 June 2011; Conference Publications 2011.*
- [7] Krzysztof Szabat., Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprzężystym., *Praca naukowe instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechnika Wrocławskiej.*, 2008
- [8] Muszynski R., Deskur J., Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 544-552, 2010.
- [9] Marcin Cychowski, Member, IEEE, Krzysztof Szabat, and Teresa Orłowska-Kowalska, Senior Member, IEEE.; Constrained model predictive control of the drive system with mechanical elasticity.; *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 56, No. 6, June 2009 1963
- [10] Erenturk K., Gray-fuzzy control of a nonlinear two-mass system, *Journal of the Franklin Institute*, vol. 347, no. 7, pp. 1171-1185, 2010
- [11] Tran Van Than., Krzysztof Szabat, Marcin Kamiński., A Modified Fuzzy Luenberger Observer for a Two-Mass Drive System., *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015, vol. 11, nr 2, p. 531-539.

(BBT nhận bài: 27/05/2015, phản biện xong: 29/06/2015)