

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG HỆ ĐỒNG BỘ TỐC ĐỘ TRÊN CƠ SỞ TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN XOAY CHIỀU TRONG DÂY CHUYỀN SẢN XUẤT DÂY CÁP ĐIỆN

RESEARCH ON BUILDING A SYNCHRONOUS SPEED SYSTEM ON THE BASIS OF AC ELECTRIC DRIVE IN ELECTRICAL CABLE PRODUCTION LINE

Phạm Tuấn Thành^{1,*}, Nguyễn Danh Điệp²,
Lê Thị Phi Nga³, Nguyễn Khắc Hoàng⁴

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.273>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp đồng bộ và ổn định tốc độ trong quá trình bọc dây cáp điện trên cơ sở ứng dụng hệ truyền động xoay chiều điều khiển vectơ cấp nguồn từ biến tần cho các cơ cấu chấp hành có mô men và tải trọng thay đổi. Xây dựng các bộ điều chỉnh theo các phương pháp tối ưu mô đun và tối ưu đối xứng trong hệ truyền động với các vòng điều chỉnh lệ thuộc và mô hình mô phỏng khảo sát trên Matlab Simulink để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Từ khóa: Điều khiển vectơ, đồng bộ tốc độ, tối ưu mô đun, tối ưu đối xứng.

ABSTRACT

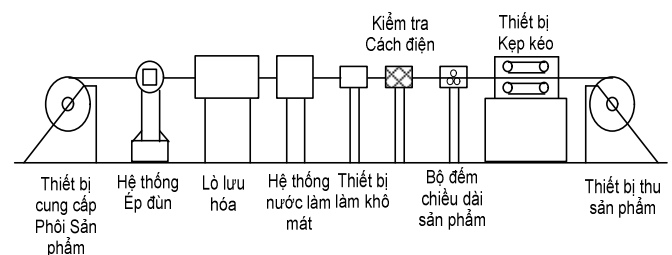
The paper presents a method of synchronizing and stabilizing the speed in the process of wrapping electric cables based on the application of vector-controlled AC drive systems powered by inverters for actuators with variable torque and load. Constructing regulators according to module optimization and symmetry optimization methods in the drive system with dependent control loops and a simulation model investigated on Matlab Simulink to evaluate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Vector control, speed synchronization, module optimization, symmetry optimization.

1. GIỚI THIỆU

Trong các ngành sản xuất công nghiệp cũng như trong sản xuất dây dẹt và cáp điện. Bài toán đồng bộ tốc độ và ổn định lực căng trong quá trình sản xuất là một yêu cầu cần thiết để nâng cao chất lượng và sản lượng sản phẩm. Quá trình sản xuất dây và cáp điện yêu cầu đảm bảo ổn định về đường kính và chiều dày vỏ bọc dây và cáp điện. Để đáp ứng được yêu cầu sản phẩm trong quá trình bọc tốc độ dây chuyền cần ổn định và căng đều ở suốt dây chuyền từ đầu ra dây đến đầu thu dây sản phẩm [1, 9].

Dây chuyền được trang bị thiết bị thu và sơ đồ điều khiển điện cơ thiết bị thu của dây chuyền như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ dây truyền sản xuất dây cáp điện

Quy trình công nghệ như sau: Phôi sản phẩm là dây cáp đồng bện từ thiết bị cung cấp qua hệ thống ép đùn để bọc vỏ bọc hoặc cách điện. Nguyên liệu cao su thiên nhiên dạng thô và hóa chất qua quá trình luyện cán trở thành cao su trạng thái dẻo có thể sử dụng được cho công đoạn ép đùn thành vật liệu cách điện hoặc vỏ bảo vệ. Sau đó được lưu hóa cao su liên tục để hóa hợp với lưu huỳnh, được gia nhiệt và xử lý ở nhiệt độ thích hợp sẽ biến đổi, cải thiện các cơ tính vốn có như bền dẻo,

¹Viện Tên lửa & Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Lớp Cao học Tự động hóa K35, Học viện Kỹ thuật Quân sự

³Khoa Ngoại ngữ, Học viện Kỹ thuật Quân sự

⁴Khoa Kỹ thuật - Công nghệ, Trường Đại học Văn Hiến TP. HCM

*Email: ptuanthanh1@yahoo.com

Ngày nhận bài: 10/4/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

đàn hồi, chịu lực cũng như khả năng chịu nhiệt. Tiếp theo là qua hệ thống nước làm mát, thiết bị làm khô cần thiết. Sau đó qua thiết bị kiểm tra cách điện, đếm chiều dài sản phẩm theo tiêu chuẩn. Cuối cùng là qua thiết bị kẹp kéo sử dụng khí nén hoặc động cơ điện để duy lực căng, hướng cần thiết trước khi vào thiết bị thu như hình 1.

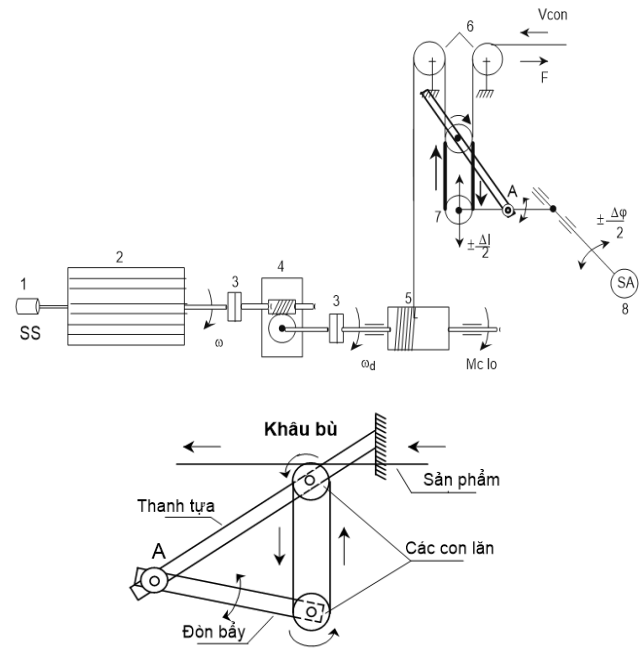
Hệ thống như hình 1 thuộc hệ truyền động bằng vật liệu với nhiều động cơ điện, ngoài việc kiểm soát lực căng trên băng vật liệu còn phải đảm bảo vấn đề ổn định tốc độ của cơ cấu chấp hành; vấn đề giảm thiểu tối đa các dao động sinh ra do mômen đàn hồi; vấn đề chất lượng của hệ không bị ảnh hưởng bởi mômen ma sát, mômen cản trong hệ thống. Các thuật toán điều khiển hệ truyền động này liên tục được nghiên cứu phát triển từ đơn giản như BDK PD, PID, logic mờ [10] đến phức tạp như mạng nơ ron [11], điều khiển tối ưu [12], điều khiển bền vững [13], điều khiển phản hồi đầu ra dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov [14, 15] và BDK đa biến H_∞ với một hoặc hai bậc điều khiển tự do cũng đã được đưa ra,.... Cấu trúc điều khiển thực hiện ổn định lực căng vòng trong và đồng bộ ổn định tốc độ vòng ngoài.

Với quy trình kỹ thuật của dây chuyền làm việc với tốc độ tỉ lệ (tốc độ dài) không đổi cho trước của hệ thống như hình 1, khi đó đường kính của tang quay thay đổi theo sự lắp đầy vì vậy mà tốc góc quay truyền động điện của thiết bị thu cần phải điều chỉnh liên tục. Việc thực hiện quá trình điều khiển có thể được triển khai thực tế một cách đơn giản hơn mà vẫn đảm bảo được hiệu quả và chỉ tiêu chất lượng cho trước bằng cách ứng dụng hệ truyền động bám với thiết bị chuyên dụng để đo lực trực tiếp hay gián tiếp đặt trước thiết bị thu.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Sơ đồ hệ thống điều khiển đồng bộ tốc độ của dây chuyền với bộ bù (khâu bù) có thiết bị đo lực căng đặt phía trước tang quay của thiết bị thu sản phẩm như hình 2.

Nguyên lý khâu bù: Con lăn phía dưới quay tự do cùng với đòn bẩy so với trục A, trên đó đặt cảm biến góc quay SA. Góc quay của cảm biến được xác định bởi vị trí con lăn phía dưới. Tại đó xác định hiệu các vận tốc tỉ lệ của dây chuyền và tang quay tiếp nhận. Con lăn phía dưới sẽ xác định vị trí thiết lập trung bình khi tốc độ của chúng cân bằng nhau và lực kéo bằng với giá trị cho trước. Lực kéo của thiết bị tiếp nhận (con lăn trên) trong thiết bị này được xác định tương đương với trọng lực của đòn bẩy và con lăn phía dưới.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển điện cơ thiết bị thu của dây chuyền: 1- Cảm biến tốc độ (SS); 2- Động cơ xoay chiều 3 pha (Thuộc thiết bị thu sản phẩm); 3- Khớp nối; 4- Hộp số giảm tốc truyền động dạng bánh răng trực vít; 5- Tang quay tiếp nhận; 6- Con lăn (ròng rọc) dẫn hướng; 7- Bộ bù; 8- Cảm biến góc quay

Hệ truyền động điện bám của thiết bị thu được thực hiện trên cơ sở truyền động điện điều chỉnh tần số động cơ theo phương pháp điều khiển vector tựa từ thông rotor đảm bảo điều chỉnh trơn và phạm vi điều chỉnh tốc độ quay của động cơ truyền động đủ lớn với khi đó mô hình toán của động cơ xoay chiều không đồng bộ 3 pha được mô tả trong hệ tọa độ quay dq theo hệ phương trình dưới dạng toán tử laplat p như sau [3, 6-8]:

$$\begin{cases} U_{1d} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1d} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2d} - \omega_{kc} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}; \\ U_{1q} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1q} + \omega_{kc} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2d} - L_m \cdot I_{1d}; \\ \omega_{kc} = z_p \cdot \omega + \frac{L_m \cdot R_2'}{L_2} \cdot \frac{I_{1q}}{\Psi_{2d}}; \\ M_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q}; \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_e - M_c). \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: U_{1d} , U_{1q} , I_{1d} , I_{1q} : điện áp và dòng điện stator trên các trục d và q;

Ψ_{2d} - từ thông rotor theo trục d;

R_1 - điện trở mạch stator; R_2' - điện trở quy đổi của mạch rotor về stator;

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}; T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3}; T_2 = \frac{L_2}{R_2}$$

với $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$: hệ số tản toàn phần;

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m$: điện cảm tương đương của cuộn dây stator; $L_{1\sigma}$: điện cảm tản của cuộn dây stator; L_m : điện cảm tổng được tạo nên bởi từ thông trong khe hở không khí.

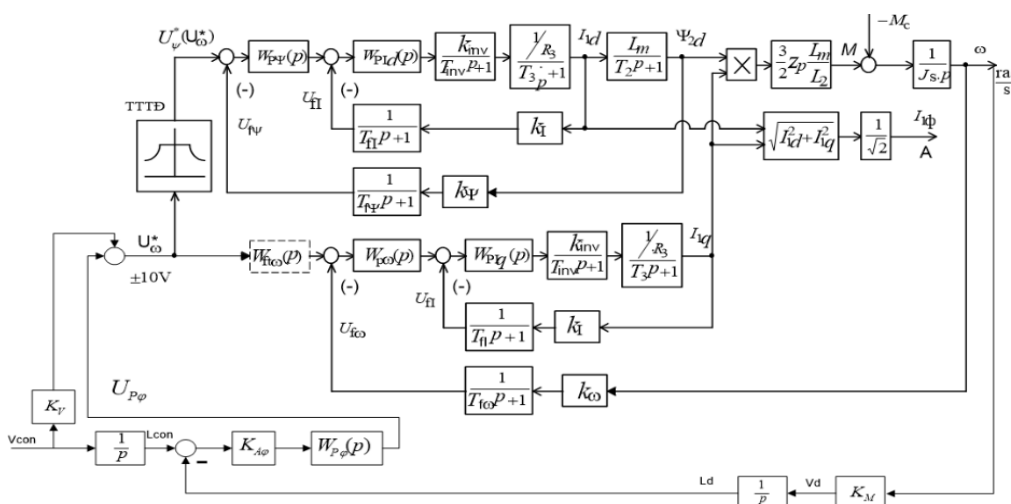
$L_2 = L_{2\sigma} + L_m$: điện cảm tương đương của cuộn dây rotor; $L_{2\sigma}$ - là điện cảm tản quy đổi của cuộn dây rotor về stator;

z_p : số đôi cực; ω , ω_{KC} : tốc độ động cơ và góc bất kỳ của hệ tọa độ quay;

J , M_e , M_c tương ứng là mô men quán tính, mô men điện từ của động cơ và mô men cản;

Khi đó sơ đồ cấu trúc của hệ thống đồng bộ và ổn định tốc độ dây chuyền sản xuất bọc cáp điện trên cơ sở hệ bám xoay chiều điều khiển vectơ như hình 3.

Trong đó $W_{pi}(p)$; $W_{pv}(p)$; $W_{pw}(p)$ - Các hàm truyền của các bộ điều chỉnh dòng điện, từ thông và tốc độ; k_i - hệ số phản hồi theo dòng điện; k_ψ - hệ số phản hồi theo từ thông rotor; k_ω - hệ số phản hồi theo tốc độ; T_{fi} - Hằng số thời gian của mạch hồi tiếp theo dòng điện; T_{fv} - Hằng số thời gian của mạch hồi tiếp theo từ thông; T_{fw} - Hằng số thời gian của mạch phản hồi theo tốc độ. k_{inv} và T_{inv} là các hệ số khuếch đại và hằng số thời gian của bộ biến đổi.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc của hệ điều khiển tự động tuyến tính liên tục bộ truyền động điện bám trên cơ sở động cơ không đồng bộ điều chỉnh tần số khi sử dụng điều khiển vectơ

- Tốc độ tỉ lệ của băng chuyển V_{con} ; Tốc độ góc tang quay tiếp nhận ω_d ; Vận tốc dài trên tang quay tiếp nhận L_d tương ứng với vận tốc V_d của tang quay tiếp nhận; Độ dài L tương ứng với tốc độ tỉ lệ của băng chuyển V_{con} ; Tín hiệu điện áp phản hồi âm tốc độ U_{fw} ; Tín hiệu điện áp phản hồi từ thông U_{fv} ; Điện áp đặt từ thông U_ψ^* ; Điện áp đặt tốc độ U_ω^* ; Điện áp đặt vị trí $U_\phi^* = K_{A\phi} \cdot \Delta L$ với $K_{A\phi}$ là hệ số truyền cảm biến vị trí của bộ bù; Đường kính vị trí khâu bù ΔL ;

Mô men quán tính truyền động điện tương ứng với các trạng thái của tang quay tiếp nhận rỗng, đầy J_s .

- Bộ điều chỉnh vị trí: P; PI với hệ số khuếch đại $K_{p\phi}$; Bộ điều chỉnh tốc độ PI với hệ số khuếch đại K_{pw} tương ứng với các trạng thái của tang quay tiếp nhận rỗng, đầy; Khâu tạo từ thông đặt (TTTĐ) tạo điện áp U_ψ^* .

- Khâu bù xác định hiệu các vận tốc tỉ lệ của băng chuyển và tang quay tiếp nhận. Đường kính vị trí bù $\Delta L = f(V_{con}, V_d)$; Momen ma sát trên trục động cơ và Momen ma sát của cơ cấu máy đến trục động cơ là: $\Delta M_{cmo} + \Delta M_{cme}$

- Tín hiệu bù theo tốc độ băng chuyển trên đầu vào vòng điều chỉnh tốc độ với hệ số truyền K_V để loại bỏ khả năng dẫn tới sự bão hòa của các bộ điều chỉnh trong các chế độ động học khi tốc độ băng chuyển đạt cực đại, đồng thời nó làm trị điện áp đầu ra bộ điều chỉnh vị trí giảm.

- Xung động điều hòa tức thời của băng chuyển do tác động của nhiễu ngoài đến băng chuyển:

$$\Delta V_{con}(t) = \Delta V \cdot V_{con} \cdot \sin(f_B \cdot t)$$

Trong đó, ΔV là giá trị thay đổi tương đối của tốc độ tỉ lệ băng chuyển, f_B là tần số tác động nhiễu Hz.

- Hệ quả của sự sắp xếp không đều đặn trên tang quay tiếp nhận với bán kính là:

$$R_d(t) = R_{do} \cdot (1 + \Delta_d \cdot \sin(\omega_d \cdot t))$$

trong đó, Δ_d là giá trị thay đổi tương đối của bán kính cuộn dây tang quay và dẫn tới sự thay đổi tuần hoàn

tốc độ tỉ lệ tức thời của tang quay tiếp nhận cũng như làm thay đổi tuần hoàn giá trị mô men tải truyền động tức thời:

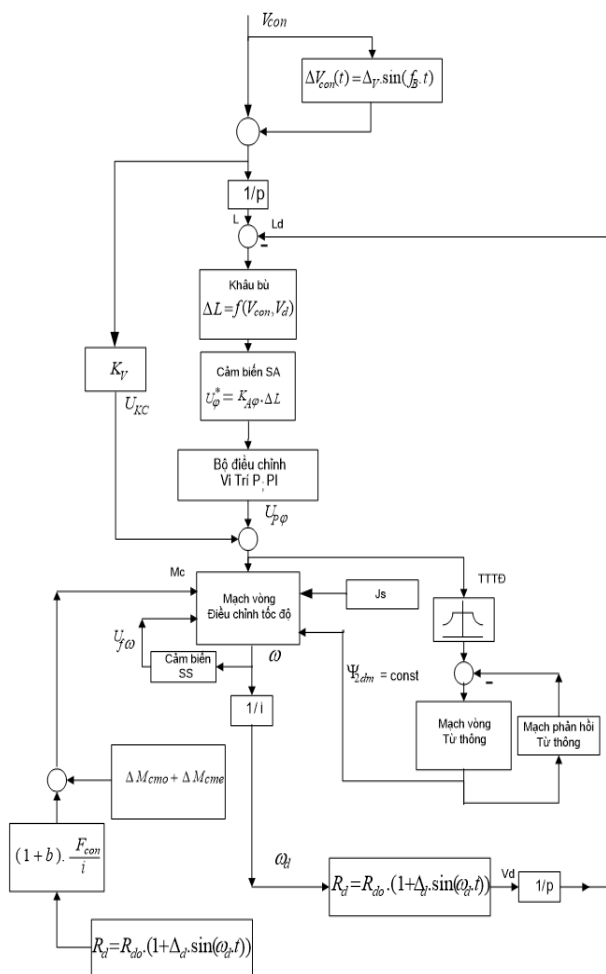
$$V_d = \omega \cdot \frac{1}{j} \cdot R_{do} \cdot (1 + \Delta_d \cdot \sin(\omega_d \cdot t)) \quad (2)$$

$$M_{c \text{ prelo}}(t) = (1+b) \cdot \frac{F_{con} \cdot R_{do} \cdot (1 + \Delta_d \cdot \sin(\omega_d \cdot t))}{i} \quad (3)$$

$$M_c = M_{cpre} + \Delta M_{cmo} + \Delta M_{cme} \quad (4)$$

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG

Hệ thống đảm bảo đồng bộ tốc độ, vị trí tang quay tiếp nhận V_d và tốc độ V_{con} của băng chuyển với lực căng băng chuyển đặt trước. Tốc độ động cơ cung cấp phôi sản phẩm có thể thay đổi hoặc không đổi. Tốc độ băng chuyển cũng liên tục thay đổi do bán kính cuộn cung cấp phôi sản phẩm (cuộn xả) hoặc cả tốc độ động cơ xả thay đổi trong quá trình làm việc. Đường kính của tang quay tiếp nhận thay đổi theo sự lấp đầy nó, vì vậy mà tốc góc quay truyền động điện của thiết bị thu cần phải điều chỉnh liên tục. Với nguyên lí làm việc của thiết bị đo lực căng và sơ đồ điều khiển hệ thống như trên thì nguyên lí làm việc của hệ bám có thể được mô tả theo lưu đồ thuật toán điều khiển như hình 4.



Hình 4. Lưu đồ thuật toán điều khiển hệ thống

- Khi tốc tang quay tiếp nhận nhỏ hơn tốc độ cần đồng bộ tương ứng với tốc độ V_{con} , lực căng F đặt trước dẫn đến vị trí bù sẽ là $+\frac{\Delta L}{2}$ và cảm biến góc quay lệch theo một

góc $+\frac{\Delta\varphi}{2}$. Cảm biến góc quay (SA) đưa tín hiệu giá trị điện áp tăng lên tương ứng góc lệch với hệ số truyền cảm biến vị trí tương tự $K_{A\varphi}$ vào đầu vào bộ điều chỉnh vị trí của bộ điều khiển-Biến tần. Điện áp đầu ra bộ điều chỉnh vị trí là giá trị đặt cho vòng điều chỉnh tốc độ kín với bộ điều chỉnh tốc độ được tổng hợp theo tiêu chuẩn tối ưu mô đun hoặc đối xứng với tín hiệu phản hồi âm tốc độ từ cảm biến phát tốc (SS) đưa về. Do đó biến tần sẽ điều khiển tốc độ động cơ xoay chiều ba pha thiết bị thu nhanh chóng tăng lên, qua bộ giảm tốc trục vít bánh răng truyền động cho tang quay tiếp nhận bám theo tốc độ cần đồng bộ và lực căng được ổn định.

- Khi tốc tang quay tiếp nhận lớn hơn tốc độ cần đồng bộ tương ứng với tốc độ V_{con} , lực căng F đặt trước dẫn đến vị trí bù sẽ là $-\frac{\Delta L}{2}$ và cảm biến góc quay lệch theo một

góc $-\frac{\Delta\varphi}{2}$ và quá trình hoạt động được thực hiện tương tự theo chiều giảm của các đại lượng.

Hệ truyền động đảm bảo bám tốc độ, bám vị trí theo mét dài. Quá trình điều khiển khởi động, hãm dừng và làm việc đều liên quan đến hai trường hợp trên.

4. TỔNG HỢP CÁC VÒNG ĐIỀU CHỈNH

Các bộ điều chỉnh dòng điện, từ thông, tốc độ và vị trí theo sơ đồ cấu trúc điều chỉnh lệ thuộc trên hình 3 được thực hiện trên cơ sở tối ưu mô đun và tối ưu đối xứng với phản hồi là khâu quán tính [1, 2, 6, 7].

Trường hợp chung khi tối ưu vòng điều chỉnh theo tối ưu mô đun, khi đó hàm truyền đạt hệ hở mong muốn có dạng:

$$W_{ho,mm}(p) = \frac{1}{a_k \cdot T_{up} p \cdot (T_{up} p + 1)} \quad (5)$$

Khi tối ưu vòng điều chỉnh theo tối ưu đối xứng, khi đó hàm truyền đạt hệ hở mong muốn có dạng:

$$W_{ho,mm}(p) = \frac{a_k \cdot b_k \cdot T_{\mu} p + 1}{a_k^2 \cdot b_k \cdot T_{\mu}^2 p^2 \cdot (T_{\mu} p + 1)} \quad (6)$$

Tối ưu đối xứng đáp ứng đầu ra có độ quá chỉnh lớn, để giảm độ quá chỉnh thường đặt bộ lọc đầu vào có dạng:

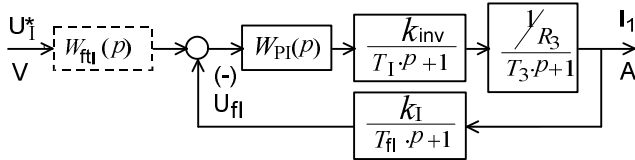
$$W_{loc}(p) = \frac{1}{a_k \cdot b_k \cdot T_u p + 1} \quad (7)$$

Trong đó: a_k, b_k - hệ số tối ưu của vòng thứ k ;

$T_{\mu} = \sum T_{\mu i}$ - hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng.

4.1. Tổng hợp vòng dòng điện

Sơ đồ cấu trúc vòng dòng điện với phản hồi quán tính của động cơ được thể hiện như trên hình 5.



Hình 5. Sơ đồ cấu trúc vòng dòng điện

Các vòng dòng điện I_{1d} và I_{1q} tương đương như nhau. Vòng dòng điện được đặc trưng bởi một hằng số thời gian lớn ở kênh trực tiếp T_3 và hai hằng số thời gian nhỏ ở kênh trực tiếp $T_1 = T_{inv}$ và trong mạch phản hồi T_{fl} .

Bộ điều chỉnh dòng trên cơ sở tối ưu mô đun là bộ điều chỉnh PI với hàm truyền:

$$W_{PI}(p) = k_{PI} \cdot \frac{T_{PI} \cdot p + 1}{T_{PI} \cdot p} \quad (8)$$

Trong đó, $k_{PI} = \frac{T_3 \cdot R_3}{k_{inv} \cdot k_1 \cdot a_1 \cdot (T_1 + T_{fl})}$ là hệ số khuếch đại bộ điều chỉnh dòng; $T_{\mu l} = T_1 + T_{fl}$ là hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng dòng điện; $k_1 = \frac{U_1^*}{I_{1q \max}}$ - hệ số phản

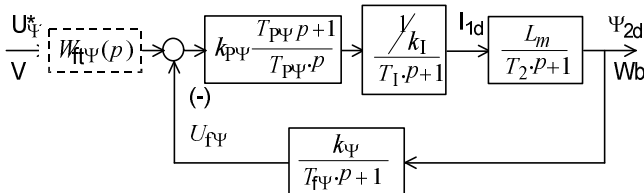
hồi theo dòng điện; U_1^* - giá trị cực đại của điện áp đầu vào vòng dòng điện; $a_1 = 2$ - hệ số tối ưu của vòng dòng điện; $T_{PI} = T_3$ - hằng số thời gian của bộ điều chỉnh dòng.

hồi theo dòng điện; U_1^* - giá trị cực đại của điện áp đầu vào vòng dòng điện; $a_1 = 2$ - hệ số tối ưu của vòng dòng điện; $T_{PI} = T_3$ - hằng số thời gian của bộ điều chỉnh dòng.

4.2. Tổng hợp vòng từ thông

Khi tối ưu hóa vòng từ thông thì vòng dòng điện kín tối ưu bên trong được đưa về dạng hàm truyền rút gọn bậc nhất như sau: $W_{fkl}(p) \approx \frac{1/k_1}{T_{\mu l} \cdot p + 1}$. Trong đó: $T_{\mu l} = a_1 \cdot T_{\mu l}$ - hằng số thời gian tương đương của vòng dòng điện.

Vòng từ thông được đặc trưng bởi một hằng số thời gian lớn T_2 và một hằng số thời gian nhỏ T_{T1} ở kênh trực tiếp, còn ở kênh hồi tiếp là $T_{f\psi}$ như hình 6.



Hình 6. Sơ đồ cấu trúc vòng từ thông

Bộ điều chỉnh từ thông theo tối ưu mô đun là bộ điều chỉnh PI với hàm truyền:

$$W_{P\psi}(p) = k_{P\psi} \cdot \frac{T_{P\psi} \cdot p + 1}{T_{P\psi} \cdot p} \quad (9)$$

Với $T_{f\psi} = T_2$ - hằng số thời gian của bộ điều chỉnh từ thông; $k_{P\psi} = \frac{T_2 \cdot k_1}{L_m \cdot k_{\psi}} \cdot \frac{1}{a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi}}$ - hằng số khuếch đại của bộ

điều chỉnh từ thông. Trong đó: $T_{\mu\psi} = T_{T1} + T_{f\psi}$ - hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng được tối ưu.

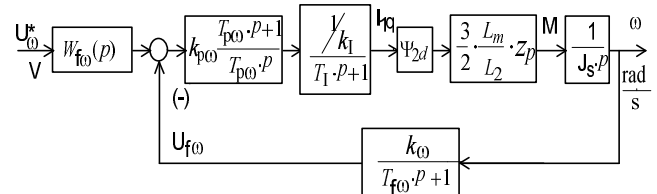
$k_{\psi} = \frac{U_{\psi \max}^*}{\Psi_{2dm}}$ - hệ số kênh hồi tiếp theo từ thông; $U_{\psi \max}^*$ -

giá trị điện áp cực đại đầu vào vòng từ thông; $a_{\psi} = 2$ - hệ số tối ưu vòng từ thông; $T_{\mu\psi} = T_2$ - hằng số thời gian của bộ điều chỉnh từ thông.

4.3. Tổng hợp vòng tốc độ

Khi tối ưu hóa vòng điều chỉnh tốc độ thì vòng điều chỉnh dòng điện kín bên trong được tối ưu và rút gọn thành hàm truyền bậc nhất $W_{fkl}(p) \approx \frac{1/k_1}{T_{\mu l} \cdot p + 1}$, trong đó

$T_{\mu l} = a_1 \cdot T_{\mu l}$ - hằng số thời gian tương đương của vòng điều chỉnh dòng điện được tối ưu. Khi đó sơ đồ cấu trúc vòng điều chỉnh tốc độ như hình 7.



Hình 7. Sơ đồ cấu trúc của vòng điều chỉnh tốc độ

Hàm truyền bộ điều chỉnh theo tối ưu đối xứng là bộ PI có dạng:

$$W_{P\omega}(p) = k_{P\omega} \cdot \frac{T_{P\omega} \cdot p + 1}{T_{P\omega} \cdot p} \quad (10)$$

Trong đó:

$$k_{P\omega} = \frac{(J_{s \min} \div J_{s \max}) \cdot k_1}{\Psi_{2dm} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_{\omega}} \cdot \frac{1}{a_{\omega} \cdot T_{\mu\omega}}; T_{P\omega} = b_{\omega} \cdot a_{\omega} \cdot T_{\mu\omega}$$

Với $T_{\mu\omega} = T_{\omega} + T_{f\omega} = T_{T1} + T_{f\omega}$ - hằng số thời gian nhỏ

tương đương; $k_{\omega} = \frac{U_{\omega \max}^*}{\omega_{\max}}$ - hệ số phản hồi theo tốc độ;

$\omega_{\max}$ - giá trị tốc độ cực đại; $U_{\omega \max}^*$ - giá trị điện áp cực đại vòng điều chỉnh tốc độ. $b_{\omega} = a_{\omega} = 2$ - các hệ số tối ưu của vòng điều chỉnh tốc độ.

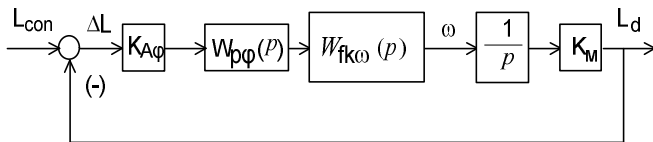
Vì vòng điều chỉnh tốc độ là vòng bên trong vòng điều chỉnh vị trí, khi thực hiện theo tối ưu đối xứng đặc trưng bằng độ quá chỉnh lớn, cho nên đầu vào vòng điều chỉnh tốc độ đặt hai bộ lọc để giảm độ quá chỉnh với các hàm truyền có dạng như sau:

$$W_{ftw}(p) = \frac{1}{T_{ftw} \cdot p + 1} \quad (11)$$

Với $T_{ftw} = T_{ftw2} = T_{fw}$; $T_{ftw} = T_{ftw1} = b_{\omega} \cdot a_{\omega} \cdot T_{\mu\omega}$.

4.4. Tổng hợp vòng vị trí

Vòng điều chỉnh vị trí được đặc trưng bởi một kênh phản hồi không quán tính có sơ đồ cấu trúc như hình 8.



Hình 8. Sơ đồ cấu trúc của vòng điều chỉnh vị trí

Khi tối ưu hóa vòng điều chỉnh vị trí thì vòng điều chỉnh tốc độ kín với bộ điều chỉnh PI được tối ưu bên trong với hai bộ lọc đầu vào có dạng hàm truyền rút gọn bậc 3:

$$W_{fk\omega}(p) = \frac{1}{k_{\omega}} \cdot \frac{1}{b_{\omega} \cdot a_{\omega}^2 \cdot T_{\mu\omega}^3 \cdot p^3 + b_{\omega} \cdot a_{\omega}^2 \cdot T_{\mu\omega}^2 \cdot p^2 + b_{\omega} \cdot a_{\omega} \cdot T_{\mu\omega} \cdot p + 1} \quad (12)$$

Vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh theo tối ưu mô đun

Khi đó hàm truyền của bộ điều chỉnh điều chỉnh vị trí có dạng khâu tỷ lệ P: $W_{p\phi} = k_{p\phi}$

$$k_{p\phi} = \frac{k_{\omega}}{k_M \cdot k_{A\phi} \cdot a_{\phi} \cdot T_{\mu\phi}} \quad (13)$$

Trong đó: $T_{\mu\phi} = b_{\omega} \cdot a_{\omega} \cdot T_{\mu\omega}$ - hằng số thời gian nhỏ tương đương của vòng điều chỉnh vị trí; $a_{\phi} = 2$ - hệ số tối ưu vòng điều chỉnh vị trí;

Vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh theo tối ưu đối xứng

Khi đó hàm truyền của bộ điều chỉnh vị trí có dạng khâu PI:

$$W_{p\phi}(p) = k_{p\phi} \cdot \frac{T_{p\phi} \cdot p + 1}{T_{p\phi} \cdot p} \quad (14)$$

Trong đó $k_{p\phi} = \frac{k_{\omega}}{k_M \cdot k_{A\phi} \cdot a_{\phi} \cdot T_{\mu\phi}}$; $T_{p\phi} = b_{\phi} \cdot a_{\phi} \cdot T_{\mu\phi}$;

$T_{\mu\phi} = b_{\omega} \cdot a_{\omega} \cdot T_{\mu\omega}$ - hằng số thời gian nhỏ tương đương của

Bảng 1. Thông số động cơ xoay chiều không đồng bộ 3 pha của tang quay tiếp nhận

P (kW)	R ₁ (Ωm)	R ₂ ' (Ωm)	R ₃ (Ωm)	L ₁ (H)	L ₂ (H)	L _m (H)	T ₂ (s)	T ₃ (s)	σ	Ψ _{2dm} (Wb)
2,2	3,53	3.42	6,602	0,3135	0,3178	0,301	0,09287	0,00429	0,0903	0.95

vòng điều chỉnh vị trí; $b_{\phi} = a_{\phi} = 2$ - các hệ số tối ưu của vòng vị trí.

5. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Thông số động cơ xoay chiều không đồng bộ 3 pha của tang quay tiếp nhận như bảng 1.

Thông số bộ biến đổi (biến tần) như bảng 2.

Bảng 2. Thông số bộ biến đổi (biến tần)

K _{inv}	T _{inv} (s)	f _{pwm} (KHz)	U _{dkmax} (V)	U _{invmax} (V)
31,1	0,625.10 ⁻⁴	8	±10	±311,17

Thông số vòng dòng điện và từ thông như bảng 3.

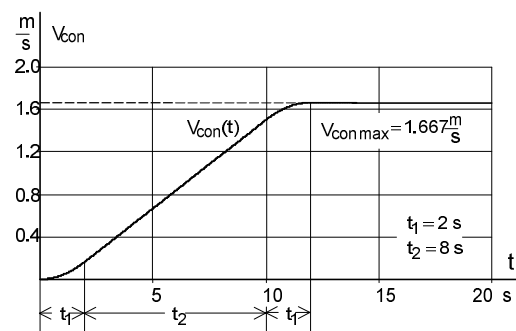
Bảng 3. Thông số vòng dòng điện và từ thông

U _{SImax} (V)	U _{SWmax} (V)	k _ψ ($\frac{V}{Wb}$)	T _{rv} (s)	T _{ftl} (s)	k _i ($\frac{V}{A}$)	T _{fi} (s)
±10	±10	10.53	0.00267	0.000333	1.14	0.000333

Thông số vòng tốc độ và vị trí như bảng 4.

Thực hiện thiết lập việc khởi động bằng chuyển từ bộ đặt tốc độ có giới hạn S và thời gian khởi động bằng chuyển như trên hình 9.

Những thay đổi tuần hoàn tốc độ tỉ lệ bằng chuyển và tốc độ tuyến tính của tang quay tiếp nhận về nguyên tắc đều gây ảnh hưởng giống nhau lên sự làm việc truyền động của thiết bị tiếp nhận. Vì vậy chỉ cần đưa ra những kết quả đánh giá ảnh hưởng lên sự làm việc truyền động của các tác động nhiễu cơ cấu bên trong thiết bị tiếp nhận.



Hình 9. Đặc tính thời gian của bộ đặt tốc độ có giới hạn - S

Sự thay đổi tuần hoàn đường kính cuộn dây thiết bị trên tang quay tiếp nhận đồng thời dẫn tới các dao động

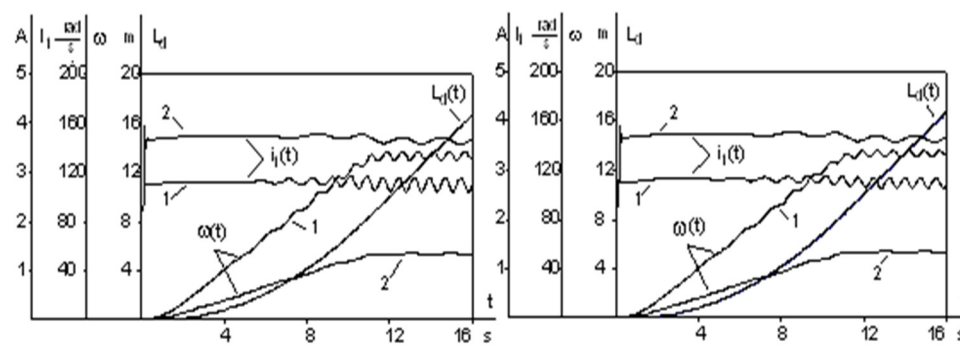
Bảng 4. Thông số vòng tốc độ và vị trí

T_{ftw1} (s)	T_{ftw2} (s)	k_{ω} ($\frac{V.s}{rad}$)	$T_{f\omega}$ (s)	$U_{S\omega max}$ (V)	$U_{S\phi max}$ (V)	$J_s(D_d)$ (Kg.m ²)	K_M (m/rad)	K_V (v.s/rad)	$K_{A\phi}$
0,01385	0,00267	0,0682	0,00267	± 10	± 10	$0,0327 \div 0,0812$	$0,0125 \div 0,03125$	3,82	10

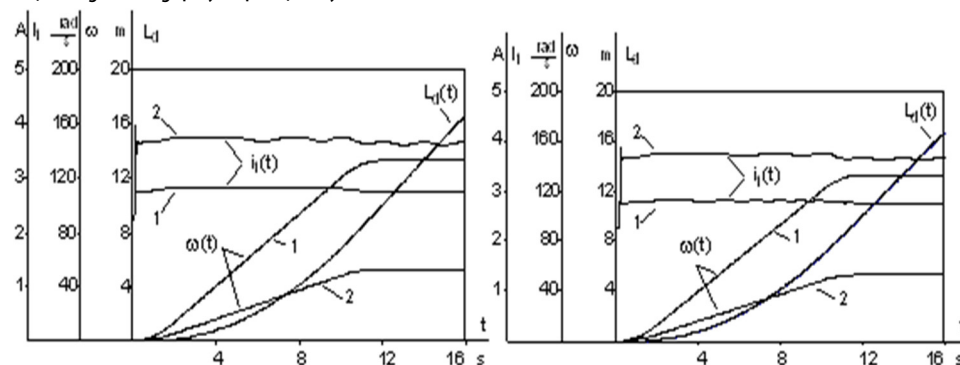
tuần hoàn của dao động tốc độ dài tức thời tang quay tiếp nhận $\Delta V_d(t)$ cũng như mô men tải $\Delta M_c(t)$. Để đánh giá mức độ ảnh hưởng mỗi tác động từ những nhiễu này tiến hành mô phỏng các quá trình truyền động điện với từng phần riêng và kết hợp.

Các quá trình quá độ của dòng điện, tốc độ và chiều dài sản phẩm trong vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng truyền khi tính tới tác động nhiễu $\Delta V_d(t)$ như hình 10.

Kết quả là là tốc độ động cơ và dòng điện động cơ tiếp nhận sẽ dao động để bù lại sự thay đổi của tốc độ dài tang quay. Các quá trình quá độ đảm bảo theo bộ đặt tốc độ giới hạn S.



Hình 10. Các quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh PI (hình trái); Bộ điều chỉnh vị trí P (hình phải) ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng truyền khi tính tới tác động nhiễu $\Delta V_d(t)$: 1 - tang quay tiếp nhận rỗng; 2- tang quay tiếp nhận đầy



Hình 11. Các quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh PI (hình trái); Bộ điều chỉnh vị trí P (hình phải) ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng truyền khi tính tới tác động nhiễu $\Delta M_c(t)$: 1 - tang quay tiếp nhận rỗng; 2- tang quay tiếp nhận đầy

Các quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyển khi tính tới tác động nhiễu $\Delta M_c(t)$ như hình 11.

Những dao động mô men tải gây nên có thể được giảm rất tốt nhờ vòng điều chỉnh tốc độ với bộ điều chỉnh PI. Hệ truyền động điện của thiết bị tiếp nhận sẽ giữ chính xác tốc độ dài đặt của tang quay tiếp nhận.

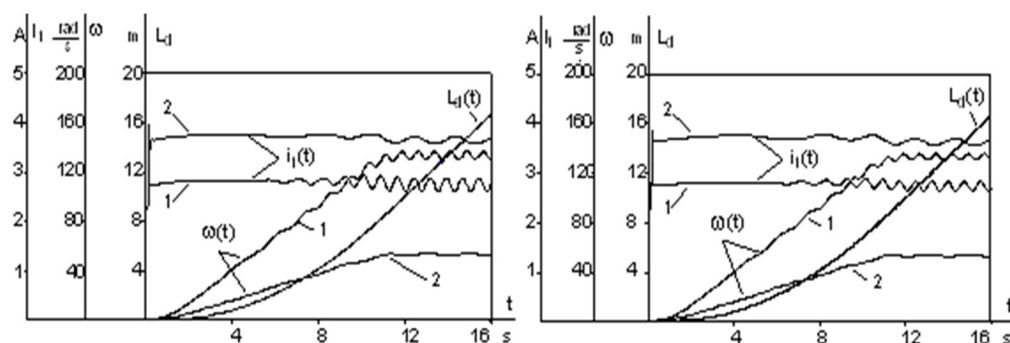
Khi tác động phối hợp các dao động tuần hoàn hình sin của tốc độ dài và mô men tải có thể bù từng phần các ảnh hưởng của chúng tới sự làm việc của hệ truyền động điện thiết bị tiếp nhận như hình 12.

Có thể quan sát được sự thay đổi biên độ dao động của tốc độ tang quay tuyến tính thông qua sự thay đổi đường kính vị trí bù như hình 13.

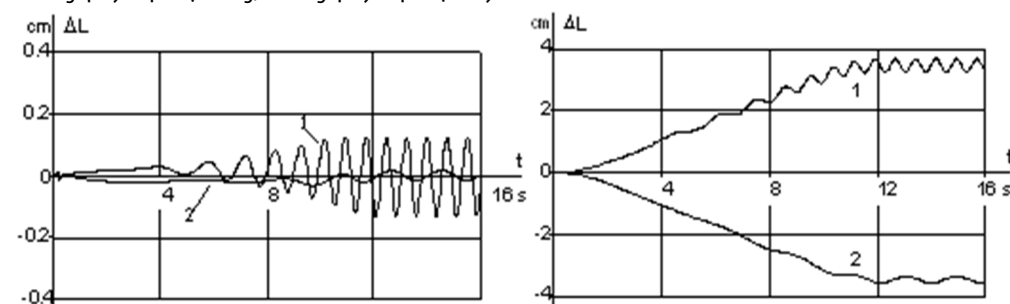
Từ các kết quả mô phỏng nhận thấy cả hai phương án lựa chọn bộ điều chỉnh vị trí P hoặc PI có thể đảm bảo giữ vững sức căng và tốc độ dài không đổi của hệ thống ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng chuyển.

6. KẾT LUẬN

Các kết quả tính toán phân tích và mô hình mô phỏng đảm bảo tính chính xác khi lựa chọn động cơ điện, bộ biến tần và thực tế hóa hệ thống tự động điều chỉnh truyền động điện thiết bị tiếp nhận trên cơ sở điều chỉnh tần số điều khiển vectơ động cơ không đồng bộ. Hệ thống tự động điều chỉnh với điều khiển vectơ đảm bảo ổn định các thông số kỹ thuật của dây chuyển ở các chế độ làm việc và tác động nhiễu với các thông số cài đặt.



Hình 12. Các quá trình quá độ trong vòng điều chỉnh vị trí với bộ điều chỉnh PI (hình trái); Bộ điều chỉnh vị trí P (hình phải) ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng truyền khi tính tới các tác động nhiễu $\Delta V_d(t)$ và $\Delta M_c(t)$: 1 - tang quay tiếp nhận rỗng; 2- tang quay tiếp nhận đầy



Hình 13. Đường kinh vị trí bù ở chế độ khởi động và chế độ làm việc của băng truyền với bộ điều chỉnh điều chỉnh vị trí PI (hình trái); Bộ điều chỉnh P (hình phải) khi tính tới các tác động nhiễu $\Delta V_d(t)$ và $\Delta M_c(t)$: 1 - tang quay tiếp nhận rỗng; 2- tang quay tiếp nhận đầy

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bùi Quốc Khánh, *Điều chỉnh truyền động điện tự động*, Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2001.
- [2]. Nguyễn Thương Ngô, *Lý thuyết điều khiển tự động thông thường và hiện đại*. Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2007.
- [3]. Nguyễn Phùng Quang - Andreas Ditttrich, *Truyền động điện thông minh*. Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2008.
- [4]. Nguyễn Phùng Quang, *Matlab và Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*. Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2004.
- [5]. Phạm Tuấn Thành, *Mô phỏng các hệ điện cơ*. Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân, Hà Nội, 2011.
- [6]. Phạm Tuấn Thành, *Phân tích và mô phỏng các hệ truyền động điện tự động*. Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân, Hà Nội, 2019.
- [7]. Đào Hoa Việt, *Phân tích và tổng hợp hệ thống truyền động tự động*. Nhà xuất bản Quân đội Nhân dân, Hà Nội, 2010.
- [8]. Rik De Doncker, Duco W. J, André Veltman, *Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control*. Springer Cham, 2010

[9]. Fouad Giri, *AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications*. John Wiley & Sons Press, 2010

[10]. Guihong Feng, Shunzhi Li, Bingyi Zhang, You Zhang, "Application of Multi-motor Synchronous Drive System Based on Fuzzy-PID Control on Fiber Spinning Production Line", in *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Chengdu, China, 1-4, 2010.

[11]. Chen Cong, Liu Xingqiao, Liu Guohai, Zhao Liang, Chen Li, Zhao Buhui, "Multi-motor Synchronous System Based on Neural Network Control", in *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, 1231-1236, 2008.

[12]. A. Angermann, M. Aicher, D. Schroder, "Time-optimal tension

control for processing plants with continuous moving webs," in *Proc. 35th Annual Meeting - IEEE Industry Applications Society*, Rome, 1999.

[13]. H. Koc, D. Knittel, M. D. Mathelin, G. Abba, "Robust gain-scheduled control of winding systems," in *IEEE Conf. Decision and Control*, Sidney, Australia, 2000.

[14]. P. R. Pagilla, I. Singh, R. V. Dwivedula, "A study on control of accumulators in web processing lines," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2004.

[15]. M. D. Baumgart, L. Y. Pao, "Robust Lyapunov-based feedback control of nonlinear web-winding systems," in *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, 2003.

AUTHORS INFORMATION

**Phạm Tuan Thanh¹, Nguyen Danh Diep²,
Le Thi Phi Nga³, Nguyen Khắc Hoàng⁴**

¹Institute of Missile and Control Engineering, Military Technical Academy, Vietnam

²Master's class Automation course K35, Military Technical Academy, Vietnam

³Faculty of Foreign Languages, Military Technical Academy, Vietnam

⁴Faculty of Engineering and Technology, Van Hien University Ho Chi Minh City, Vietnam