

Điều khiển lực căng hệ thống vận chuyển cuộn băng Tension Control of a Web Fed Machine

Nguyễn Tùng Lâm^{1*}, Nguyễn Văn Tài¹, Tống Thị Lý^{1,2},
Đỗ Trọng Hiếu¹, Phạm Đức Hiếu¹

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

*Email: lam.nguyentung@hust.edu.vn

Tóm tắt

Trong công nghiệp, việc sử dụng các hệ thống vận chuyển vật liệu mềm chẳng hạn như giấy, sợi dệt, kim loại, polymers, và các vật liệu composite... là rất phổ biến. Đối với những hệ thống này, kiểm soát thành công lực căng băng vật đóng vai trò cốt lõi. Để thực hiện mục tiêu đó, bài báo này trước tiên đã tiến hành xây dựng mô hình vận chuyển băng vật liên tục được trình bày nhờ vào phương trình cân bằng năng lượng. Sau đó, bài báo đã giới thiệu phương thức thiết kế bộ điều khiển tốc độ và điều khiển lực căng tích hợp cho hệ thống vận chuyển băng vật dựa trên phương án điều khiển LQR. Các đáp ứng của hệ kín thu được thông qua mô phỏng đã minh chứng tính hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất. Ngoài ra, các kết quả này cũng khẳng định sự chính xác của mô hình hệ thống và thuật toán điều khiển được đề xuất so với một số nghiên cứu khác.

Từ khoá: Điều khiển lực căng, hệ thống vận chuyển băng vật, hệ thống cuộn lại, hệ thống roll-to-roll.

Abstract

The applications of web handling systems such as paper manufacturing, printing and film process, flexible component, paper manufacturing, textile.. are widely used in processing and manufacturing industry. In the application, tension control of the web plays a very crucial role. To obtain this target, in this paper, at first, the mathematical model of the continuous web transport system is developed thanks to energy balance method. Then, the paper presents a method of designing a tension control based on Linear Quadratic Regulator. Several numerical simulation results are given to prove the effectiveness of the closed-loop system. In addition, the simulation results show incorrectness of another study in term of tension regulation.

Keywords: Web tension control, web-fed machine, winding systems, roll-to-roll process.

1. Giới thiệu

Hệ thống cuộn lại, tên tiếng anh là Rewinding System hay Roll-to-Roll System, là một hệ thống gồm hai cuộn vật liệu nối với nhau thông qua 1 bản vật liệu có độ dài nhất định và các lô dẫn, được điều khiển bằng hai hoặc nhiều động cơ riêng biệt được gắn ở cuộn tờ ra, cuộn cuộn lại và các lô dẫn chủ động. Đối với hệ thống cuộn lại, kiểm soát lực căng vật liệu là nhiệm vụ tối quan trọng. Lực căng thiếu hụt dẫn đến suy giảm chất lượng vật liệu phía lô cuộn lại, ngược lại nếu lực căng vượt quá mức cho phép sẽ làm đứt gãy vật liệu. Do đó, điều khiển lực căng trong hệ thống xử lý vật liệu dạng băng thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học. Mô hình toán học của hệ thống cuộn lại được đưa ra trong [1], thiếu sót lớn nhất của nghiên cứu này là chưa đưa ra mô tả sự lan truyền lực căng một cách cụ thể. Điều này được khắc phục trong [2,3] với giả thiết ứng suất vật liệu rất nhỏ dẫn đến mô hình phi tuyến kèm theo tác động xen kênh. Tính chất phức tạp của mô hình đặt ra

những thử thách lớn cho quá trình thiết kế điều khiển. Một số thuật toán điều khiển đã được đề xuất cho việc xử lý lực căng bao gồm điều khiển đa biến ứng dụng cho hệ cuộn lại trong công nghiệp cán thép [4,5] hay điều khiển bền vững H_∞ phân tách tương tác giữa tốc độ và lực căng [3,6]. Chiến lược điều khiển nhằm bù sai lệch những thành phần động học chưa được mô hình hóa hay nhiễu môi trường cũng được xây dựng dựa trên điều khiển kháng nhiễu chủ động ADRC trong [7]. Với sự phát triển của kỹ thuật điều khiển, những phương pháp điều khiển hiện đại đã được ứng dụng trong kiểm soát lực căng. Chung và cộng sự [8] áp dụng điều khiển mờ cho hệ thống cuộn lại, trong khi đó Wang và cộng sự [9] tách kênh giữa lực căng và tốc độ nhờ việc sử dụng mạng neural. Quá trình tách kênh cũng được xử lý thành công bởi Abjadi và cộng sự [10] với bộ điều khiển trượt. Pagilla và cộng sự [11-13] sử dụng bộ điều khiển phân tán với phân hồi trạng thái, khả năng của hệ thống được kiểm chứng qua thực nghiệm. Những công trình nêu trên đều tiếp cận hệ vận chuyển băng vật kiểu gián đoạn. Điều khiển lực căng cho hệ thống vận chuyển băng vật liên tục được trình bày trong [14]. Tuy nhiên bộ điều khiển ở đây có cấu trúc khá phức tạp nhưng hiệu quả lại chưa cao.

ISSN: 2734-9381

<https://doi.org/10.51316/jst.149.etsd.2021.31.2.4>

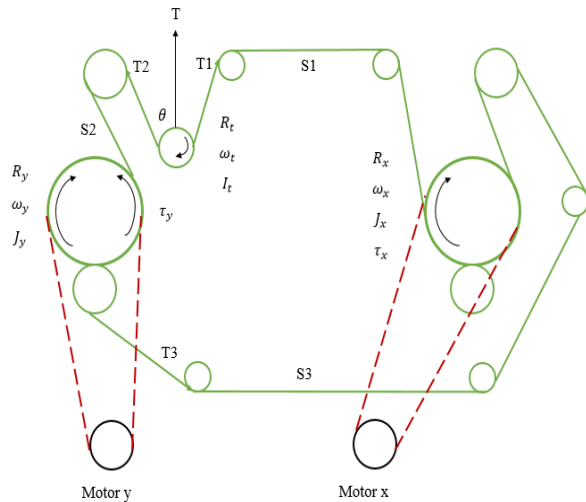
Received: October 16, 2019; accepted: March 02, 2021

Bài báo này trình bày một bộ điều khiển tốc độ và điều khiển lực căng tích hợp cho hệ thống điều khiển băng liểu đáp ứng các tham số của hệ thống. Mô hình toán học cho hệ thống tải băng liểu được phát triển dựa theo mô hình toán học đã cho trong [14]. Khác với cách tiếp cận sử dụng bộ điều khiển trượt phức tạp đã được sử dụng, bài báo dùng bộ điều khiển LQR cho đáp ứng động học tốt hơn rất nhiều so với kết quả mà các tác giả của [14] có được. Hơn nữa, kết quả trong bài báo này chính xác hơn một số nhận định mô phỏng không chính xác tại [14].

2. Mô hình hóa hệ thống

Trước khi tiến hành mô hình hoá, chúng tôi đặt những giả thiết như sau:

- Độ dày băng liểu không đổi trong quá trình vận hành.
- Các hiện tượng trượt thường tồn tại giữa web và lô vận chuyển không được xem xét.
- Cảm biến độ căng chỉ di chuyển theo hướng dọc trục.
- Lô bị động có quán tính quay không đáng kể và có thể bỏ qua.



Hình 1. Mô hình hệ thống máy web fed

Hình 1 mô tả hệ thống máy web fed, trong đó:

T_i : lực căng trên từng đoạn (N).

ω_i : các tốc độ dài của lô thứ i ($\frac{m}{s}$).

J_i : mô-moment quán tính của cuộn thứ i (kgm^2).

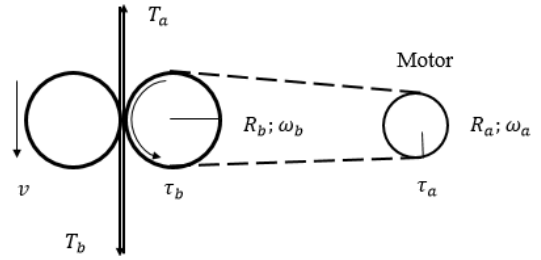
τ_i : mô-moment trên lô thứ i (Nm).

R_i : bán kính của lô thứ i (m).

S_i : độ dài băng liểu trong phân đoạn thứ i (m).

Giả thiết rằng khối lượng của dây truyền động giữa động cơ và lô không đáng kể và hiệu suất truyền là 100%. Các mối quan hệ của các đại lượng được mô

tả trong Hình 2 có thể suy ra được từ luật bảo toàn năng lượng như sau.



Hình 2. Mối quan hệ giữa lực căng và mô-moment động cơ truyền động

Theo định luật bảo toàn năng lượng:

$$\tau_a(t)\omega_a(t) = \tau_b(t)\omega_b(t) \quad (1)$$

Ở đây, τ_b là mô-moment của trên lô, τ_a là mô-moment đầu trục động cơ. Giả thiết, mô-moment động cơ τ_a tỷ lệ thuận với dòng điện trong động cơ $i(t)$ (giả thiết này hoàn toàn phù hợp với thực tế do động cơ hoàn toàn có thể hoạt động trong chế độ điều khiển mô-moment). Ta có:

$$\tau_a = k_i i(t) \quad (2)$$

trong đó k_i là biểu thị hằng số mô-moment động cơ và $i(t)$ là dòng điện động cơ. Để đơn giản hóa mô hình, ta cũng giả thiết điện áp đầu vào của động cơ $u(t)$ tỷ lệ thuận với dòng điện động cơ $i(t)$ trong suốt quá trình vận hành.

$$u(t) = k_i i(t) \quad (3)$$

Như vậy, mô-moment trên lô và trên trục động cơ sẽ được mô tả như sau

$$\tau_a(t) = k_i \frac{u(t)}{k} = k_i u(t) \quad (4)$$

$$\tau_b(t) = k_{la} u(t), \text{ với } k_{la} = k_i \frac{R_b}{R_a} \quad (5)$$

Theo định luật II Newton mở rộng về chuyển động:

$$\vec{M} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

với

$\vec{L} = I\vec{\omega}$ là mô men động lượng

\vec{M} là tổng các mô men lực tác dụng

Áp dụng vào hệ thống được mô tả ở Hình 2 thu được:

$$h(t) = J\omega_b(t) \quad (6)$$

$$\dot{h}(t) = \tau_b(t) - B\omega_b(t) + (T_b(t) - T_a(t))R_b$$

Với J là mô-moment quán tính của lô, T là các lực căng, và B là hệ số ma sát nhớt của lô. Phương trình (6) được viết lại như sau:

$$J\dot{\omega}_b(t) = \tau_b(t) - B\omega_b(t) + (T_b(t) - T_a(t))R_b \quad (7)$$

Những phân tích trên có thể được mở rộng cho mô hình hệ thống vận tải băng liệu như ở Hình 1. Lúc này, mục tiêu của bài toán điều khiển là ổn định tốc độ truyền tải và lực căng của web thông qua điện áp đầu vào của động cơ x và y . Từ phương trình (7), phương trình mô-moment cho lô x và y có thể thu được như sau:

$$J_x\dot{\omega}_x(t) = k_{lx}u_x(t) - B_x\omega_x(t) + (T_1(t) - T_3(t))R_x \quad (8)$$

$$J_y\dot{\omega}_y(t) = k_{ly}u_y(t) - B_y\omega_y(t) + (T_3(t) - T_2(t))R_y \quad (9)$$

$$I_t\dot{\omega}_t(t) = (T_2(t) - T_1(t))R_t \quad (10)$$

Với I_t là mô-moment quán tính của lô bị động, nơi cảm biến tốc độ và lực căng được lắp đặt. Từ các phương trình trên ta thu được:

$$\dot{\omega}_x(t) = \frac{k_{lx}u_x(t) - B_x\omega_x(t) + (T_1(t) - T_3(t))R_x}{J_x} \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_y(t) = \frac{k_{ly}u_y(t) - B_y\omega_y(t) + (T_3(t) - T_2(t))R_y}{J_y} \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_t(t) = \frac{(T_2(t) - T_1(t))R_t}{I_t} \quad (13)$$

Chiều dài đoạn vật liệu giữa hai con lăn được xác định là mỗi chiều dài web tại thời điểm ban đầu được biểu diễn bằng S_0 , tức là $S_0 = S(t_0)$. Vì biến dạng của web được tạo ra bởi con lăn, có thể được biểu diễn dưới dạng sau:

$$S = \int_{t_0}^t r(\zeta)\omega(\zeta)d\zeta$$

Từ đó, ta suy ra được các chiều dài như sau:

$$S_1 = S_{10} + \int_{t_0}^t R_t\omega_t(\zeta)d\zeta - \int_{t_0}^t R_x\omega_x(\zeta)d\zeta \quad (14)$$

$$S_2 = S_{20} + \int_{t_0}^t R_y\omega_y(\zeta)d\zeta - \int_{t_0}^t R_t\omega_t(\zeta)d\zeta \quad (15)$$

$$S_3 = S_{30} + \int_{t_0}^t R_x\omega_x(\zeta)d\zeta - \int_{t_0}^t R_y\omega_y(\zeta)d\zeta \quad (16)$$

Hơn nữa, mỗi lực căng có thể được biểu diễn bởi phương trình sau:

$$T(t) = KS(t) + D\dot{S}(t) \quad (17)$$

trong đó K và D lần lượt là hệ số đàn nỡ và hệ số damping của vật liệu web. Đạo hàm hai vế của phương trình (17) ta được:

$$\dot{T}(t) = K\dot{S}(t) + D\ddot{S}(t) \quad (18)$$

Từ (11) – (13), (14) - (16) và (18), ta có thể suy ra được các phương trình sau:

$$\begin{aligned} \dot{T}_1(t) = & -\left(\frac{DR_x^2}{J_x} + \frac{DR_t^2}{I_t}\right)T_1(t) + \frac{DR_t^2}{I_t}T_2(t) \\ & + \frac{DR_x^2}{J_x}T_3(t) - \left(KR_x - \frac{DR_xB_x}{J_x}\right)\omega_x(t) \\ & + KR_t\omega_t(t) - \frac{DR_xK_{lx}}{J_x}u_x(t) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_2(t) = & \frac{DR_t^2}{I_t}T_1(t) - \left(\frac{DR_y^2}{J_y} + \frac{DR_t^2}{I_t}\right)T_2(t) \\ & + \frac{DR_y^2}{J_y}T_3(t) + \left(KR_y - \frac{DR_yB_y}{J_y}\right)\omega_y(t) \\ & - KR_t\omega_t(t) - \frac{DR_yK_{ly}}{J_y}u_y(t) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_3(t) = & \frac{DR_x^2}{J_x}T_1(t) + \frac{DR_y^2}{J_y}T_2(t) \\ & - \left(\frac{DR_x^2}{J_x} + \frac{DR_y^2}{J_y}\right)T_3(t) + \left(KR_x - \frac{DR_xB_x}{J_x}\right)\omega_x(t) \\ & - \left(KR_y - \frac{DR_yB_y}{J_y}\right)\omega_y(t) + \frac{DR_xK_{lx}}{J_x}u_x(t) \\ & - \frac{DR_yK_{ly}}{J_y}u_y(t) \end{aligned} \quad (21)$$

Để thuận tiện cho quá trình thiết kế ta đặt vector trạng thái như sau:

$$\underline{X} = [x_1x_2x_3x_4x_5x_6]^T = [\omega_x\omega_y\omega_tT_1T_2T_3]^T$$

$$\underline{U} = [u_xu_y]^T$$

Khi đó, các phương trình (11)-(13) và (19)-(21) mô tả hệ thống được viết lại như sau (trong đó $T_3 = -(T_1 + T_2)$):

$$\dot{x}_1 = -\frac{B_x}{J_x}x_1 + 2\frac{R_x}{J_x}x_4 + \frac{R_x}{J_x}x_5 + \frac{K_{lx}}{J_x}u_x \quad (22)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{B_y}{J_y}x_2 - \frac{R_y}{J_y}x_4 - 2\frac{R_y}{J_y}x_5 + \frac{K_{ly}}{J_y}u_y \quad (23)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{R_t}{I_t}x_4 + \frac{R_t}{I_t}x_5 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 = & -\left(KR_x - \frac{DR_x B_x}{J_x}\right)x_1 + KR_t x_3 \\ & -\left(2\frac{DR_x^2}{J_x} + \frac{DR_t^2}{I_t}\right)x_4 + \left(\frac{DR_t^2}{I_t} - \frac{DR_x^2}{J_x}\right)x_5 \\ & - \frac{DR_x K_{I_x}}{J_x} u_x \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 = & \left(KR_y - \frac{DR_y B_y}{J_y}\right)x_2 - KR_t x_3 \\ & + \left(\frac{DR_t^2}{I_t} - \frac{DR_y^2}{J_y}\right)x_4 - \left(2\frac{DR_y^2}{J_y} + \frac{DR_t^2}{I_t}\right)x_5 \\ & + \frac{DR_y K_{I_y}}{J_y} u_y \end{aligned} \quad (26)$$

Trong quá trình hoạt động, mục tiêu điều khiển là kiểm soát lực căng và tốc độ của web, do đó đầu ra hệ thống được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} V = R_x x_1 \\ T = \cos\theta(x_4 + x_5) \end{aligned} \quad (27)$$

Nếu ta định nghĩa biến trạng thái mới như sau:

$$\begin{aligned} \bar{x}_4 = x_1 + \frac{1}{DR_x} x_4 \\ \bar{x}_5 = x_2 - \frac{1}{DR_y} x_5 \end{aligned}$$

Khi đó, các phương trình (22)-(26) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & -\left(\frac{B_x}{J_x} + 2\frac{DR_x^2}{J_x}\right)x_1 + \frac{DR_x R_y}{J_x} x_2 \\ & + 2\frac{DR_x^2}{J_x} \bar{x}_4 - \frac{DR_x R_y}{J_x} \bar{x}_5 + \frac{K_{I_x}}{J_x} u_x \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = & \frac{DR_x R_y}{J_y} x_1 - \left(\frac{B_y}{J_y} + 2\frac{DR_y^2}{J_y}\right)x_2 \\ & - \frac{DR_x R_y}{J_y} \bar{x}_4 + 2\frac{DR_y^2}{J_y} \bar{x}_5 + \frac{K_{I_y}}{J_y} u_y \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & \frac{DR_x R_t}{I_t} x_1 + \frac{DR_y R_t}{I_t} x_2 - \frac{DR_x R_t}{I_t} \bar{x}_4 \\ & - \frac{DR_y R_t}{I_t} \bar{x}_5 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_4 = & \left(\frac{DR_t^2}{I_t} - \frac{K}{D}\right)x_1 + \frac{DR_y R_t^2}{R_x I_t} x_2 + \frac{KR_t}{DR_x} x_3 \\ & - \frac{DR_t^2}{I_t} \bar{x}_4 - \frac{DR_y R_t^2}{R_x I_t} \bar{x}_5 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_5 = & \frac{DR_x R_t^2}{R_y I_t} x_1 + \left(\frac{DR_t^2}{I_t} - \frac{K}{D}\right)x_2 + \frac{KR_t}{DR_y} x_3 \\ & - \frac{DR_x R_t^2}{R_y I_t} \bar{x}_4 - \frac{DR_t^2}{I_t} \bar{x}_5 \end{aligned} \quad (32)$$

Đầu ra của hệ thống sẽ là:

$$\begin{aligned} V = R_x x_1 \\ T = D \cos\theta \left[-R_x x_1 + R_y x_2 + R_x \bar{x}_4 - R_y \bar{x}_5 \right] \end{aligned} \quad (33)$$

Ta đặt:

$$\begin{aligned} y_1 = x_1 \\ y_2 = -R_x x_1 + R_y x_2 + R_x \bar{x}_4 - R_y \bar{x}_5 \end{aligned} \quad (34)$$

Từ các phương trình (29)-(35) ta có thể viết lại hệ thống máy web-fed dưới dạng không gian trạng thái như sau:

$$\dot{y} = \underline{A}y + \underline{B}u + \underline{d}(x) \quad (35)$$

$$\dot{x} = \underline{C}x + \underline{D}y$$

Với $\underline{y} = [y_1 \ y_2]^T$, $\underline{u} = [u_x \ u_y]^T$, $\underline{x} = [x_3 \ \bar{x}_4 \ \bar{x}_5]^T$, và:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{B_x}{J_x} + \frac{DR_x^2}{J_x}\right) & \frac{DR_x}{J_x} \\ \frac{R_x B_y}{J_x} - \frac{R_x B_y}{J_y} + \frac{DR_x^3}{J_x} - \frac{DR_x R_y^2}{J_y} & -\left(\frac{DR_x^2}{J_x} + \frac{B_y}{J_y} + 2\frac{DR_y^2}{J_y} - \frac{K}{D}\right) \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{I_x}}{J_x} & 0 \\ -\frac{R_x K_{I_x}}{J_x} & \frac{R_y K_{I_y}}{J_y} \end{bmatrix}$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 0 & -2\frac{DR_x R_t}{I_t} & 0 \\ \frac{KR_t}{DR_x} & -2\frac{DR_t^2}{I_t} & 0 \\ \frac{KR_t}{DR_y} & -\left(2\frac{DR_x R_t^2}{R_y I_t} - \frac{KR_x}{DR_y}\right) & -\frac{K}{D} \end{bmatrix}$$

$$\underline{d}(x) = \begin{bmatrix} \frac{DR_x^2}{J_x} \bar{x}_4 \\ \left(\frac{R_x B_y}{J_y} + \frac{DR_x R_y^2}{J_y} - \frac{DR_x^3}{J_x} - \frac{KR_x}{D}\right) \bar{x}_4 + \left(\frac{KR_y}{D} - \frac{R_y B_y}{J_y}\right) \bar{x}_5 \end{bmatrix}$$

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} 2 \frac{DR_x R_t}{I_t} & \frac{DR_t}{I_t} \\ 2 \frac{DR_t^2}{I_t} - \frac{K}{D} & \frac{DR_t^2}{R_x I_t} \\ 2 \frac{DR_x R_t^2}{R_y I_t} - \frac{KR_x}{DR_y} & \frac{DR_t^2}{R_y I_t} - \frac{K}{DR_y} \end{bmatrix}$$

3. Thiết kế bộ điều khiển lực căng và mô phỏng kiểm chứng.

Trong phần này ta thiết kế bộ điều khiển lực căng ở dạng bộ điều khiển phản hồi trạng thái LQR (Linear Quadratic Regulator). Bộ điều khiển phản hồi trạng thái LQR còn được gọi là điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính. Mục đích của thiết kế là xây dựng một hệ thống điều khiển đáp ứng được yêu cầu đặt ra được thể hiện thông qua các chỉ tiêu chất lượng được biểu thị dưới các hàm chất lượng. Định nghĩa biến trạng thái mới:

$$\underline{v} = \int_0^t (\underline{y} - \underline{y}^*) dt \quad (36)$$

$$\begin{cases} \dot{\underline{y}} = \underline{A}\underline{y} + \underline{B}\underline{u} + \underline{d}(x) \\ \dot{\underline{v}} = \underline{E}\underline{y} - \underline{y}^* \end{cases} \quad (37)$$

Viết lại dạng ma trận, với việc tăng thêm biến trạng thái:

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{y}} \\ \dot{\underline{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & 0 \\ \underline{E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{y} \\ \underline{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{d}(x) \\ \underline{y}^* \end{bmatrix} \quad (38)$$

Khi $\underline{d}(x)$ và \underline{y}^* là hằng số, ở trạng thái tĩnh $\dot{\underline{y}} = \dot{\underline{v}} = 0$, nghĩa là hệ thống ổn định. Điều đó đồng nghĩa với việc ở trạng thái tĩnh $\underline{y}_s, \underline{v}_s, \underline{u}_s$ phải thỏa mãn phương trình sau:

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & 0 \\ \underline{E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{y} \\ \underline{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{B} \\ 0 \end{bmatrix} \underline{u} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{d}(x) \\ \underline{y}^* \end{bmatrix} = 0 \quad (39)$$

Trừ (38) cho (39) thu được :

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{y}} \\ \dot{\underline{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & 0 \\ \underline{E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{y} - \underline{y}_s \\ \underline{v} - \underline{v}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{B} \\ 0 \end{bmatrix} (\underline{u} - \underline{u}_s) \quad (40)$$

Ta đặt: $\underline{z} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{y}} \\ \dot{\underline{v}} \end{bmatrix}; \underline{z} = \begin{bmatrix} \underline{z}_1 \\ \underline{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y} - \underline{y}_s \\ \underline{v} - \underline{v}_s \end{bmatrix}; \underline{q} = \underline{u} - \underline{u}_s$

Khi đó (40) sẽ được viết lại thành :

$$\dot{\underline{z}} = \underline{A}_z \underline{z} + \underline{B}_z \underline{q} \quad (41)$$

Với :

$$\underline{A}_z = \begin{bmatrix} -\left(\frac{B_x + DR_x^2}{J_x} + \frac{DR_x^2}{J_x}\right) & \frac{DR_x^2}{J_x} & 0 & 0 \\ \frac{R_x B_x}{J_x} - \frac{R_x B_y}{J_y} + \frac{DR_x^3}{J_x} - \frac{DR_x R_y^2}{J_y} & -\left(\frac{DR_x^2}{J_x} + \frac{B_y}{J_y} + 2\frac{DR_y^2}{J_y} - \frac{K}{D}\right) & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B}_z = \begin{bmatrix} \frac{K_{lx}}{J_x} & 0 \\ -\frac{R_x K_{lx}}{J_x} & \frac{R_y K_{ly}}{J_y} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Hàm chất lượng J và đầu vào điều khiển q được viết lại như sau:

$$\begin{cases} J = \int_0^{\infty} (\underline{z}^T \underline{Q} \underline{z} + \underline{q}^T \underline{R} \underline{q}) dt \\ \underline{q} = -\underline{K}_q \underline{z} \end{cases} \quad (42)$$

trong đó:

$$\begin{cases} \underline{K}_q = [\underline{K}_1 \quad \underline{K}_2] \\ \underline{q} = -\underline{K}_1 \underline{z}_1 - \underline{K}_2 \underline{z}_2 \\ \underline{u} - \underline{u}_s = -\underline{K}_1 (\underline{y} - \underline{y}_s) - \underline{K}_2 (\underline{v} - \underline{v}_s) \end{cases}$$

Những trạng thái tĩnh phải tương tự với những trạng thái khác, do đó thay thế \underline{y} bởi phương trình (36) vào và đầu vào điều khiển \underline{u} trở thành:

$$\underline{u} = -\underline{K}_1 \underline{y} - \underline{K}_2 \underline{v} = -\underline{K}_1 \underline{x} - \underline{K}_2 \int_0^t (\underline{y} - \underline{y}^*) dt \quad (43)$$

Đặt $\underline{K}_1 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$; $\underline{K}_2 = \begin{bmatrix} k_{r1} & k_{r2} \\ k_{l1} & k_{l2} \end{bmatrix}$ do đó \underline{u} trở thành:

$$\underline{u} = -\underline{K}_1 \underline{y} - \underline{K}_2 \int_0^t (\underline{y} - \underline{y}^*) dt \quad (44)$$

Ma trận Q và R là ma trận có dạng như sau để thỏa mãn hệ:

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta_2 \end{bmatrix}; \underline{R} = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix};$$

Thì hàm chất lượng J sẽ trở thành:

$$J = \int_0^{\infty} \{ \alpha (\underline{y} - \underline{y}^*)^2 + \delta (\underline{v} - \underline{v}_s)^2 + \gamma (\underline{u} - \underline{u}_s)^2 \} dt \quad (45)$$

trong đó α là trọng số cho yêu cầu bám theo lệch, δ là trọng số cho sai lệch tĩnh, γ là trọng số cho đầu vào điều khiển. Những trọng số α , δ và γ có thể được lựa chọn bằng phương pháp thử theo đặc tính thiết kế mong muốn thông qua phương pháp mô phỏng. Với thông số mô phỏng được cho như sau [14]:

$$B_x=B_y=7.10^{-3}Nms, \quad D=2Ns/m, \quad J_x=J_y=I_r=8.10^{-4}kgm^2, \\ R_x=R_y=R_r=0.02m, \quad k_{I_x}=k_{I_y}=0.318Nm/V.$$

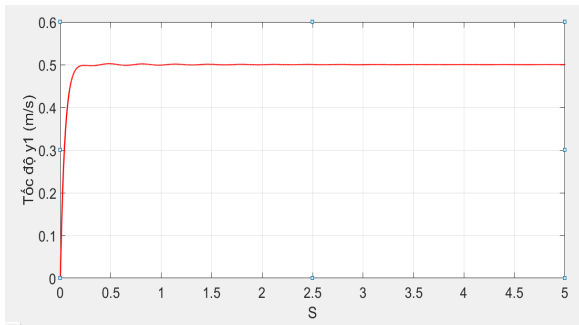
Chỉnh định các tham số của ma trận trọng lượng trong quá trình mô phỏng tìm được thông số tối ưu cho ma trận \underline{Q} và \underline{R} như sau:

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{15} \end{bmatrix}; \quad \underline{R} = \begin{bmatrix} 10^4 & 0 \\ 0 & 10^4 \end{bmatrix}.$$

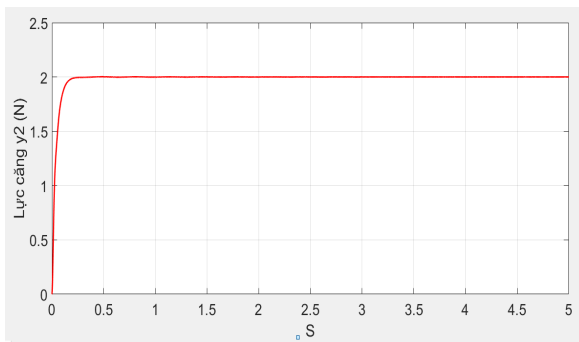
Ta tìm được \underline{P} bằng cách giải phương trình Riccati. Kết quả ma trận phản hồi trạng thái sau khi đã hiệu chỉnh:

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{11} & k_{11} \\ k_{21} & k_{22} & k_{12} & k_{12} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 0,2.10^6 & -0,001.10^6 & 5.10^6 & -0,17.10^6 \\ 0,001.10^6 & 0,2.10^6 & 0,17.10^6 & 5.10^6 \end{bmatrix}.$$

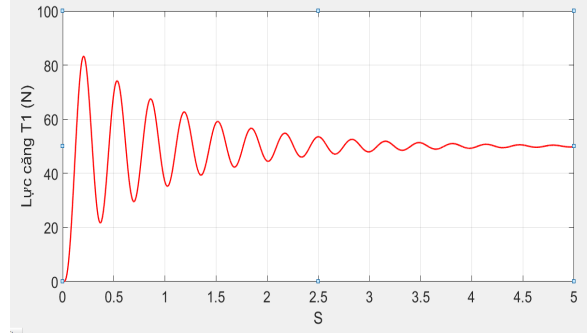
Đáp ứng lực căng trên mỗi phân đoạn khi có sự can thiệp của bộ điều khiển được trình bày lần lượt trong các Hình 3, 4, và 5.



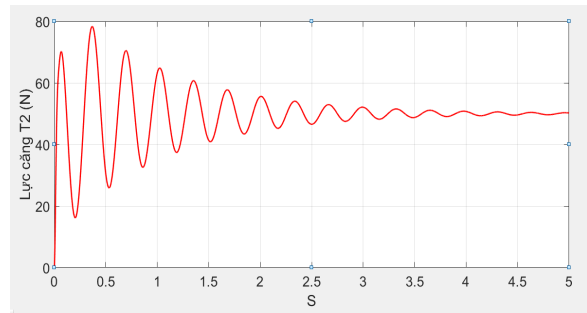
Hình 3. Đáp ứng của đầu ra y_1



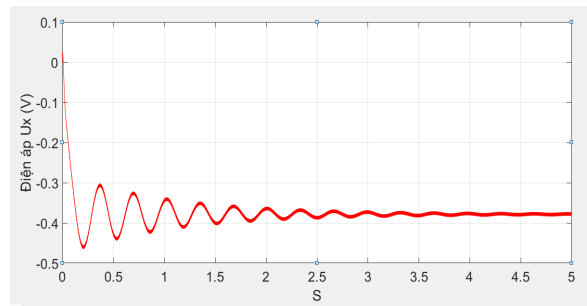
Hình 4. Đáp ứng đầu ra y_2



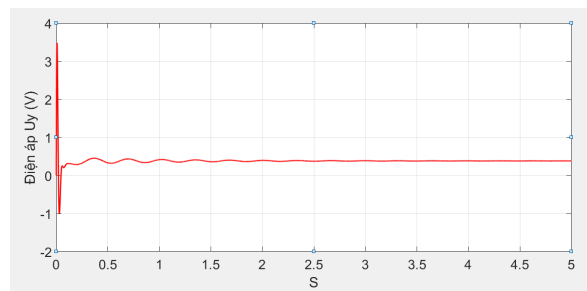
Hình 5. Lực căng T_1



Hình 6. Lực căng T_2



Hình 7. Điện áp u_x



Hình 8. Điện áp u_y

So sánh trực tiếp với kết quả được thể hiện trong [14] có thể nhận thấy lực căng chưa đúng khi tổng lực trên các phân đoạn băng liệu đều bằng không. Hơn nữa, khi so sánh tín hiệu điều khiển thể hiện trong bài báo này có biên độ nhỏ hơn nhiều so với kết quả của [14]. Điều này thể hiện rõ ưu điểm của bộ điều khiển LQR trong việc hạn chế tín hiệu điều khiển.

4. Kết luận

Bài toán đã thiết kế thành công bộ điều khiển lực căng cho hệ vận chuyển vật liệu dạng băng - một

hệ rất phổ biến trong công nghiệp sản xuất giấy, in ấn, cán thép. Bằng việc sử dụng bộ điều khiển LQR, lực căng và tốc độ dài của băng liệu được kiểm soát theo giá trị đặt mong muốn với đáp ứng động học cũng như khả năng bám lượng đặt tốt. Điều này được thể hiện rõ qua các kết quả mô phỏng cũng như so sánh với một số kết quả nghiên cứu trước. Trong tương lai, chúng tôi sẽ xem xét thay thế cảm biến đo lực căng bằng các bộ quan sát lực căng khi thiết kế bộ điều khiển nhằm giảm chi phí cũng như kết cấu cơ khí phức tạp để bố trí cảm biến lực căng.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Kang, H., Baumann, R.R. Mathematical modeling and simulations for machine directional register in hybrid roll-to-roll printing systems. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 15, 2109–2116 (2014).
<https://doi.org/10.1007/s12541-014-0570-z>
- [2]. Li J, Mei X, Tao T, Liu S. Research on the register system modelling and control of gravure printing press. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2012;226(3):626-635.
<https://doi.org/10.1177/0954406211415914>.
- [3]. H. Koç, D. Knittel, M de Mathelin and G. Abba, Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, Vol. 10, March 2002, pp. 197-208.
- [4]. Nguyen, vi & Nguyen, Hung & Tran, Thanh. (2019). Robust control design of nonlinear roll-to-roll dynamic system in printed electronics technology. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems.* 38. 1-12.
<https://doi.org/10.3233/JIFS-190368>.
- [5]. T. Zhang, Y. Zheng, Z. Chen and Z. Deng, "A Direct-Decoupling Closed-Loop Control Method for Roll-to-Roll Web Printing Systems," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*,
<https://doi.org/10.1109/TASE.2020.3005977>.
- [6]. D. Knittel, and al., Tension Control for Winding Systems with Two-Degrees of Freedom H_{∞} Controllers, *IEEE Trans. Ind. Applicat. Syst.*, Vol. 39, January/February 2003, pp. 113-120.
- [7]. B.T. Boulter, Y. Hou, Z. Gao and F. Jiang., Active Disturbance Rejection Control for Web Tension Regulation and Control, *IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, USA, December 2001, pp. 4974-4979.
- [8]. B.-M. Chung, S.-G. Lee, and C.-S. Cho, Active tension control of high-speed splitting Machines using fuzzy PID, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics (ICM '05)*, Taipei, Taiwan, July 2005, pp. 72–77.
- [9]. C. Wang, Y. Wang, R. Yang, and H. Lu, Research on precision tension control system based on neural network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, 2004, pp. 381–386.
- [10]. N. R. Abjadi, J. Soltani, J. Askari, and G. R. Arab Markadeh, Nonlinear sliding-mode Control of a multi-motor web-winding system without tension sensor, *IET Control Theory and Applications*, vol. 3, no. 4, 2009, pp. 419–427.
- [11]. P. R. Pagilla, N. B. Siraskar, and R. V. Dwivedula, Decentralized control of web processing lines, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, Toronto, Canada, 2005, pp. 940–945.
- [12]. P.R.Pagilla, N.B.Siraskar, and R.V.Dwivedula, Decentralized control of web processing lines, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 1, 2007, pp. 106–117.
- [13]. P. R. Pagilla, N. B. Siraskar, and R. V. Dwivedula, A decentralized model reference Adaptive controller for large-scale systems, in *Proceedings of the 16th Triennial World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC '05)*, Prague, Czech republic, July 2005, pp. 112–117.
- [14]. C. L. Chen, K. M. Chang, and C. M. Chang. Modeling and control of a web-fed machine, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 28, 2004, pp. 863-876.