

# Điều khiển lực căng kết hợp bù thích nghi thành phần mô men quán tính lô vật liệu sử dụng neural RBF cho hệ cuộn lại nhiều phân đoạn

## Tension control for multi-span web transport systems with roll inertia compensation using RBF neural network

Tổng Thị Lý<sup>1,2</sup>, Nguyễn Thanh Tùng<sup>1</sup>, Dương Minh Đức<sup>1\*</sup>, Nguyễn Danh Huy<sup>1\*</sup>, Nguyễn Tùng Lâm<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Đại học Bách Khoa Hà Nội,

<sup>2</sup>Đại học Công Nghiệp Hà Nội

\*Corresponding author E-mail: [duc.duongminh@hust.edu.vn](mailto:duc.duongminh@hust.edu.vn) and [huy.nguyendanh@hust.edu.vn](mailto:huy.nguyendanh@hust.edu.vn)

### Abstract

A roll-to-roll system which is a flexible multi-shaft web transport systems is very common in the industries such as paper, metal processing, polymers or fabric and so on. However, web tension and speed controls of the roll-to-roll system are difficult because of the nature of the system including multi-input multi-output, time variance, and nonlinearity. In this paper, modeling and controlling problems of the multispan roll to roll system are investigated. From the governing equations of the web dynamics, a backstepping based controller with Neural RBF for web velocity and tension regulation is developed. The neural network design is based on the Radial Basis Function network that estimates the uncertainty of roll inertia. Simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

**Keywords:** Web Tension Control, Web Transport Systems, Multispan Roll to Roll (R2R) Systems, Backstepping controller, Lyapunov Stability Theorem, Neural Radial Basis Function (RBF)

### Tóm tắt

Hệ cuộn lại trong hệ vận chuyển vật liệu dạng băng là một trong những hệ truyền động nhiều lô vật liệu và lô dẫn phức tạp được ứng dụng rất phổ biến trong công nghiệp hiện nay như trong ngành giấy, phim nhựa, dệt may... Tuy nhiên, hệ cuộn lại có nhiều lô dẫn là một hệ thống có nhiều đầu vào và nhiều đầu ra, phi tuyến có tham số biến thiên, do đó việc thiết kế điều khiển hệ thống gặp rất nhiều thách thức. Bài báo xây dựng mô hình toán học dạng tổng quát và đề xuất phương pháp điều khiển hệ cuộn lại có nhiều lô xem xét đến ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài tác động vào: cơ cấu quay của lô, biến dạng trong quá trình quay của lô vật liệu... Bộ điều khiển được thiết kế dựa theo phương pháp điều khiển Backstepping kết hợp thuật toán bù thích nghi thành phần mô men quán tính lô vật liệu sử dụng mạng Neural RBF, đảm bảo cho hệ thống ổn định, lực căng và vận tốc dài bám sát với giá trị đặt. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh dựa theo tiêu chuẩn Lyapunov. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink đã cho thấy được tính đúng đắn của phương pháp đề xuất.

### 1. Giới thiệu

Hệ vận chuyển vật liệu dạng băng rất phổ biến trong công nghiệp hiện nay [1][2] như trong ngành giấy, phim nhựa, dệt may... Vật liệu dạng băng sau khi chế thành phẩm và được cuộn lại thành những lô vật liệu, sau đó sẽ được đưa tới các

máy cắt cuộn lại (R2R) để chia nhỏ, hoặc in ấn [3][4],[5]... Hệ R2R là một trong những hệ truyền động phức tạp nhiều lô có tính phi tuyến mạnh, chịu ảnh hưởng của nhiễu rất nhiều, đặc biệt khi hệ thống hoạt động ở tốc độ cao[6]. Thêm vào đó, trong quá trình vận hành thực tế, do ảnh hưởng bởi nhiễu và tham số biến thiên, chất lượng hệ thống bị ảnh hưởng. Mặt khác các bộ điều khiển kinh điển như PID [7],[8],[9], và [10] được thiết kế cho đối tượng có mô hình toán học với giả thiết tham số hằng dẫn tới chưa đáp ứng tốt sự biến thiên đó. Thêm vào đó, hệ thống thường được tích hợp thêm các bộ bù hoặc các khâu chỉnh định bằng tay để đưa hệ thống về điểm làm việc ổn định mới, điều này gây khó khăn cho người vận hành và làm giảm năng suất của hệ thống. Do vậy, việc xây dựng bộ điều khiển linh hoạt hơn và khắc phục được các yếu tố bất lợi trên là điều cần thiết.

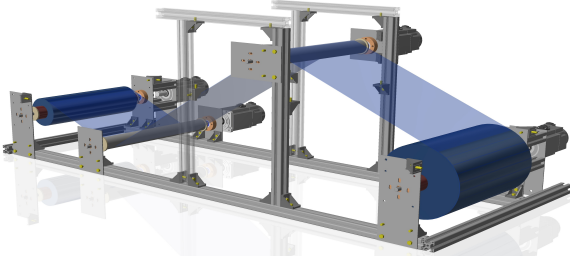
Để điều khiển được hệ thống này thì một trong những công việc quan trọng đầu tiên là phải xây dựng mô hình toán học chi tiết cho hệ. Tuy nhiên các mô hình toán học hiện nay đều đưa về dạng lý tưởng[11], bỏ qua rất nhiều yếu tố tác động vào hệ thống như giả thiết các con lăn không tải, bỏ qua sự trượt và biến dạng của vật liệu, lực và ma sát ở loadcell không được tính đến, do đó có thể giả thiết đây là hệ cắt cuộn lại một đoạn[12]. Với mô hình hệ cắt cuộn lại một đoạn, các giải pháp điều khiển phi tuyến hiện đại như điều khiển điều khiển trượt, điều khiển mờ[13],[14], và [6] ... đã được áp dụng nhằm nâng cao chất lượng điều khiển của các hệ thống cuộn lại. Các thuật toán điều khiển trên tuy có thể nâng cao chất lượng, nhưng vẫn chưa xem xét đến sự biến thiên của các thông số động học đối tượng. Thuật toán điều

khien Backstepping [11],[15], và [16] cho hệ thống cuộn lại đã phân nào cho thấy chất lượng và tính ổn định của hệ được đảm bảo, tuy nhiên chưa xét cho hệ thống với nhiều lô dẫn chủ động và lô bị động.

Từ các phân tích ở trên có thể thấy việc xây dựng mô hình toán học sát với thực tế và thiết kế một bộ điều khiển hệ cuộn lại nhiều lô dẫn có tính phi tuyến, tham số biến thiên là điều cấp thiết. Bài báo này đề xuất một phương pháp tổng quát hóa xây dựng mô hình toán học cho hệ cuộn lại nhiều lô dẫn và thiết kế bộ điều khiển thích nghi dựa trên luật điều khiển Backstepping kết hợp mạng neural RBF đảm bảo cho các hệ thống ổn định bền vững với các ảnh hưởng của tham số biến thiên.

## 2. Mô hình toán học của hệ cuộn lại nhiều lô dẫn

Hệ thống cuộn lại nhiều lô dẫn có thành phần chính là lô tở, lô cuộn và nhiều các lô dẫn bị động và chủ động được liên hệ với nhau qua 1 bản vật liệu dạng băng có độ dài nhất định, truyền động bằng nhiều động cơ điện được nối cứng lô như Hình 1.

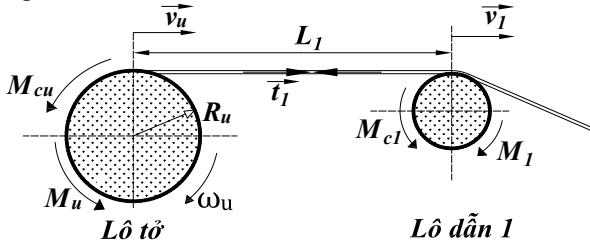


Hình 1: Mô hình hệ cuộn lại nhiều lô dẫn

Mô hình toán học của hệ thống vận chuyển vật liệu dạng băng được xây dựng dựa trên động lực học của các đoạn vật liệu và động lực học của các lô.

### 2.1. Động lực học của đoạn

Để xác định phương trình lực căng của đoạn vật liệu giữa 2 lô dẫn liên tiếp, ta sẽ xét một trường hợp cụ thể là đoạn vật liệu giữa lô vật liệu và lô dẫn 1 như Hình 2 :



Hình 2: Đoạn vật liệu giữa lô tở và lô dẫn 1

Theo[17], các mô hình về vận chuyển vật liệu dạng băng tính toán lực căng dựa trên 3 định luật vật lý chính: Định luật bảo toàn khối lượng; Định luật Hooke's; Định luật Coulomb, ta có:

$$\frac{L_1 dt_1}{dt} = ES(v_l - v_u) + v_u t_u - v_l t_l \quad (1)$$

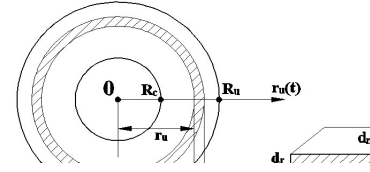
Phương trình (1) cho ta mối quan hệ giữa lực căng và vận tốc đoạn vật liệu giữa lô tở và lô dẫn 1. Công thức này cũng đúng trong trường hợp đoạn vật liệu giữa 2 lô liên tiếp.

## 2.2. Động lực học các lô

### 2.2.1. Xét lô tở

Xét phân tố khối lượng như Hình 3 với độ dày mỗi lớp vật liệu là  $a = d_r$ , chiều rộng lô tở là  $w$ , ta có:

$$dm = \rho dV = \rho \pi r d_r w \quad (2)$$



Hình 3: Momen quán tính trên lô tở

Tại thời điểm ban đầu khi lô tở chưa tở vật liệu,  $r_u(0) = R_u$  với  $r_u$  là hàm bán kính theo thời gian,  $J_{u0}$  là momen quán tính đối với lô có lõi bằng thép:

$$J_u(t) = J_{u0} + \frac{1}{2} \rho w \pi (r_u^4(t) - R_c^4) \quad (3)$$

$$\dot{J}_u(t) = 2\pi w \rho r_u^3(t) \dot{r}_u(t) \quad (4)$$

Xét điều kiện độ dày lớp vật liệu  $a$  rất nhỏ, bán kính lô tở sẽ thay đổi chậm, do đó ta coi góc quay được (rad) của lô tở là số nguyên dương lần  $2\pi$ . Khi đó ta có [18]:

$$\dot{r}_u(t) = -a \frac{v_u}{2\pi r_u} \quad (5)$$

Phương trình biến thiên momen động lượng[19] đối với lô tở trong Hình 2, chiếu các vec tơ lên trục của lô tở, chọn chiều dương là chiều của vec tơ tốc độ ta có:

$$d(J_u \omega_u) / dt = M_u - M_{cu} - M_{cl} \quad (6)$$

Trong đó:  $M_u$  là momen dẫn động trên trục của lô tở,  $M_{cu}$  là momen của lực căng tác dụng lên lô tở,  $M_{cl}$  là momen do lực ma sát tác dụng lên trục lô,  $M_{cl} = b_{f_l} \omega_u$ , với  $b_{f_l}$  là hệ số ma sát trượt.

Với  $v_u = \omega_u r_u$  ta có:

$$\frac{d\omega_u}{dt} = \frac{dv_u}{r_u dt} - \frac{v_u}{r_u^2} \frac{dr_u}{dt} \quad (7)$$

Do mô men quán tính của lô tở biến thiên theo thời gian, nên từ (6) ta có:

$$\frac{d(J_u \omega_u)}{dt} = J_u \frac{d\omega_u}{dt} + \omega_u \frac{dJ_u}{dt} = t_1 r_u - M_u - b_{f_u} \omega_u \quad (8)$$

Thay (4), (5), (7) vào (8)

$$J_u \frac{dv_u}{r_u dt} = t_1 r_u - M_u - b_{f_u} \frac{v_u}{r_u} - \frac{a v_u^2}{2\pi r_u} \left( \frac{J_u}{r_u^2} - 2\pi w \rho r_u^2 \right) \quad (9)$$

Phương trình (9) cho ta mối quan hệ giữa  $v_u$  với biến điều khiển  $M_u$  trên lô tở

### 2.2.2. Xét lô cuộn

Với  $m_r$  là momen dẫn động trên trục lô cuộn,  $M_{cr}$  là momen lực ma sát tác dụng lên lô cuộn, ta có phương trình biến thiên mô men động lượng trên lô cuộn:

$$d(J_r \omega_r) / dt = M_r - M_{cr} - M_{rl} \quad (10)$$

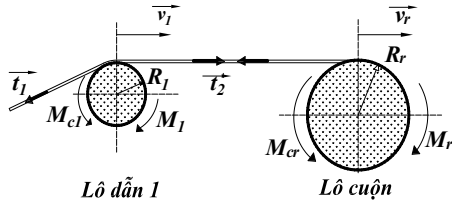
Tương tự như (3) ta có:

$$J_r(t) = J_{r0} - \frac{1}{2} \rho w \pi (r_r^4(t) - R_c^4) \quad (11)$$

Tương tự như (24) ta cũng có:

$$J_r \frac{dv_r}{r_r dt} = -t_2 r_r + M_r - b_{f_r} \frac{v_r}{r_r} + \frac{a v_r^2}{2\pi r_r} \left( \frac{J_r}{r_r^2} - 2\pi w \rho r_r^2 \right) \quad (12)$$

2.2.3. Xét lô dẫn chủ động:



Hình 4: Momen của ngoại lực tác dụng lên lô cuộn và lô dẫn

Tương tự ta có phương trình biến thiên động lượng trên trục lô dẫn một theo Hình 4 nhưng với mô men quán tính của lô dẫn 1 không thay đổi theo thời gian:

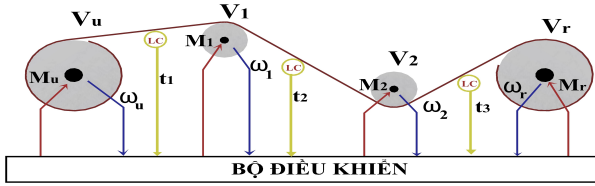
$$J_1 d(\omega_1 / dt) = (t_2 - t_1)r_1 + M_1 - b_{f_1}\omega_1 \quad (13)$$

Tương tự ta cũng có:

$$J_1 \frac{dv_1}{r_1 dt} = (t_2 - t_1)r_1 + M_1 - b_{f_1} \frac{v_1}{r_1} \quad (14)$$

2.3. Mô hình toán học cho hệ cuộn lại có 2 lô dẫn chủ động

Như trên chúng ta đã thực hiện mô hình hóa cho hệ thống một cách tổng quát bao gồm lô tờ ra, lô cuộn và n lô dẫn chủ động có dẫn động bằng trục của động cơ, để tiện cho việc mô phỏng nên trong bài báo cáo này ta sẽ lấy trường hợp hệ thống bao gồm có một lô tờ, lô cuộn và hai lô dẫn chủ động ở giữa như trong Hình 5



Hình 5: Mô hình hệ cuộn lại có hai lô chủ động

Áp dụng (1), (9), (12) và (14) trên vào mô hình cuộn lại có hai lô chủ động ta được mô hình toán học như sau:

$$\frac{L_1 dt_1}{dt} = ES(v_1 - v_u) + v_u t_u - v_1 t_1 \quad (15)$$

$$\frac{L_2 dt_2}{dt} = ES(v_2 - v_1) + v_1 t_1 - v_2 t_2 \quad (16)$$

$$\frac{L_3 dt_r}{dt} = ES(v_r - v_2) + v_2 t_2 - v_r t_r \quad (17)$$

$$J_u \frac{dv_u}{r_u dt} = t_1 r_u - M_u - b_{f_u} \frac{v_u}{r_u} - \frac{av_u^2}{2\pi r_u} \left( \frac{J_u}{r_u^2} - 2\pi w \rho r_u^2 \right) \quad (18)$$

$$J_1 \frac{dv_1}{r_1 dt} = (t_2 - t_1)r_1 + M_1 - b_{f_1} \frac{v_1}{r_1} \quad (19)$$

$$J_2 \frac{dv_2}{r_2 dt} = (t_3 - t_2)r_2 + M_2 - b_{f_2} \frac{v_2}{r_2} \quad (20)$$

$$J_r \frac{dv_r}{r_r dt} = -t_3 r_r + M_r - b_{f_r} \frac{v_r}{r_r} + \frac{av_r^2}{2\pi r_r} \left( \frac{J_r}{r_r^2} - 2\pi w \rho r_r^2 \right) \quad (21)$$

Trong đó:

$t_1$  : lực căng giữa lô tờ ra và lô dẫn 1 [N]

$t_2$  : lực căng giữa 2 lô dẫn [N]

$t_3$  : lực căng giữa lô cuộn và lô dẫn 2 [N]

$v_u$  : vận tốc dài lô tờ ra [m/s]

$v_1$  : vận tốc dài lô dẫn 1 [m/s]

$v_2$  : vận tốc dài lô dẫn 2 [m/s]

$v_r$  : vận tốc dài lô cuộn [m/s]

$J_u, J_r$  : momen quán tính lô tờ, lô cuộn [kg/m<sup>2</sup>]

$M_u$  : momen dẫn động của động cơ cho lô tờ [N.m]

$M_1$  : momen dẫn động của động cơ cho lô dẫn 1 [N.m]

$M_2$  : momen dẫn động của động cơ cho lô dẫn 2 [N.m]

$M_r$  : momen dẫn động của động cơ cho lô cuộn [N.m]

$r_u$  : bán kính lô tờ [m]

$r_1$  : bán kính lô dẫn 1 [m]

$r_2$  : bán kính lô dẫn 2 [m]

$r_r$  : bán kính lô cuộn [m]

$b_{f_u}$  : hệ số ma sát lô tờ [Nms]

$b_{f_1}$  : hệ số ma sát lô dẫn 1 [Nms]

$b_{f_2}$  : hệ số ma sát lô dẫn 2 [Nms]

$b_{f_r}$  : hệ số ma sát lô cuộn [Nms]

$E$  : hệ số Young đặc trưng tính đàn hồi vật rắn [N/m<sup>2</sup>]

$S$  : thiết diện của vật liệu [m<sup>2</sup>]

$L_1$  : khoảng cách giữa lô tờ và lô dẫn 1 [m]

$L_2$  : khoảng cách giữa 2 lô dẫn [m]

$L_3$  : khoảng cách giữa lô cuộn và lô dẫn 2 [m]

$h$  : độ dày của vật liệu [m]

$\rho$  : khối lượng riêng của vật liệu [kg/m<sup>3</sup>]

$w$  : độ rộng của vật liệu [m]

Từ các phương trình (15)-(21) ta có thể quy đổi từ vận tốc dài về vận tốc góc như sau:

$$\dot{t}_1 = c_1 \omega_u + c_2 t_1 \omega_1 + c_3 \omega_1 \quad (22)$$

$$\dot{t}_2 = c_4 \omega_1 + c_5 t_1 \omega_1 + c_6 t_2 \omega_2 + c_7 \omega_2 \quad (23)$$

$$\dot{t}_3 = c_8 \omega_2 + c_9 t_2 \omega_2 + c_{10} t_3 \omega_r + c_{11} \omega_r \quad (24)$$

$$\dot{\omega}_u = c_{12} M_u + c_{13} t_1 + c_{14} \omega_u + c_{15} \omega_u^2 \quad (25)$$

$$\dot{\omega}_1 = c_{16} M_1 + c_{17} t_1 + c_{18} t_2 + c_{19} \omega_1 \quad (26)$$

$$\dot{\omega}_2 = c_{20} M_2 + c_{21} t_2 + c_{22} t_3 + c_{23} \omega_2 \quad (27)$$

$$\dot{\omega}_r = c_{24} M_r + c_{25} t_3 + c_{26} \omega_r + c_{27} \omega_r^2 \quad (28)$$

Trong đó:

$$c_1 = -\frac{ESr_u}{L_1}, c_2 = -\frac{r_1}{L_1}, c_3 = \frac{ESr_1}{L_1}, c_4 = -\frac{ESr_1}{L_2}$$

$$c_5 = \frac{r_1}{L_2}, c_6 = -\frac{r_2}{L_2}, c_7 = \frac{ESr_2}{L_2}, c_8 = -\frac{ESr_2}{L_3}$$

$$c_9 = \frac{r_2}{L_3}, c_{10} = -\frac{r_r}{L_3}, c_{11} = \frac{ESr_r}{L_3}, c_{12} = -\frac{1}{J_u}$$

$$c_{13} = \frac{r_u}{J_u}, c_{14} = -\frac{1}{J_u} b_{f_u}, c_{15} = \frac{h}{J_u} w \rho r_u^3, c_{16} = \frac{1}{J_1}$$

$$c_{17} = -\frac{r_1}{J_1}, c_{18} = \frac{r_1}{J_1}, c_{19} = -\frac{1}{J_2} b_{f_2}, c_{20} = \frac{1}{J_2}$$

$$c_{21} = -\frac{r_2}{J_2}, c_{22} = \frac{r_2}{J_2}, c_{23} = -\frac{1}{J_2} b_{f_2}, c_{24} = \frac{1}{J_r}$$

$$c_{25} = -\frac{r_r}{J_r}, c_{26} = -\frac{1}{J_r} b_{f_r}, c_{27} = \frac{h}{J_r} w \rho r_r^3$$

Các phương trình vi phân (22)-(28) thể hiện mô hình toán học của hệ thống cuộn lại có hai lô dẫn chủ động. Trong đó, các phương trình (22)-(24) biểu diễn sự phụ thuộc lẫn nhau giữa các biến lực căng  $t_1, t_2, t_3$  trên các phân đoạn vật liệu và vận tốc góc  $\omega_u, \omega_1, \omega_2, \omega_r$  của các lô. Các phương trình (25)-(28) biểu diễn sự phụ thuộc của các biến vận tốc góc trên các lô vào lực căng các đoạn và biến điều khiển là 4 mô men tại 4 lô  $M_u, M_1, M_2, M_r$ . Với mong muốn có thể đảm bảo lực căng của tất cả các phân đoạn và vận tốc dài trên các lô bám theo lượng đặt, ta có thể nhận thấy số biến cần điều khiển nhiều hơn các biến điều khiển, và đây chính là hệ thiếu cơ cấu chấp hành [20]. Trong trường hợp này, ta sẽ phải chọn các biến đầu ra ưu tiên theo yêu cầu công nghệ, ta có thể gọi là vòng điều khiển bên ngoài. Cụ thể ta giả thiết ưu tiên điều khiển lực căng trên tất cả phân đoạn để đảm bảo chất lượng của vật liệu cần vận chuyển, các biến được ưu tiên điều khiển sẽ là  $t_1, t_2, t_3$ . Vận tốc của toàn hệ thống sẽ được điều khiển thông qua biến ưu tiên còn lại là vận tốc  $\omega_2$  tại lô 2. Tất cả các biến còn lại được điều khiển theo điều kiện ràng buộc được xác định và chứng minh tính ổn định thông qua phương pháp điều khiển được lựa chọn, đây chính là vòng điều khiển bên trong. Do đó ta có thể biểu diễn mô hình toán học của hệ thống dưới dạng phương trình trạng thái như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}) + \mathbf{BU} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{CX} \end{cases} \quad (29)$$

Trong đó:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \omega_u \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_r \end{bmatrix}; \mathbf{U} = \begin{bmatrix} M_u \\ M_1 \\ M_2 \\ M_r \end{bmatrix}; \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \omega_2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} c_1\omega_u + c_2t_1\omega_1 + c_3\omega_1 \\ c_4\omega_1 + c_5t_1\omega_1 + c_6t_2\omega_2 + c_7\omega_2 \\ c_8\omega_u + c_9t_2\omega_2 + c_{10}t_3\omega_3 + c_{11}\omega_2 \\ c_{13}t_1 + c_{14}\omega_u + c_{15}\omega_u^2 \\ c_{17}t_1 + c_{18}t_2 + c_{19}\omega_1 \\ c_{21}t_2 + c_{22}t_3 + c_{23}\omega_2 \\ c_{25}t_3 + c_{26}t_3 + c_{27}\omega_r^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{20} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{24} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

Từ hệ phương trình (29) có chứa các thành phần tích của các biến trạng thái, và có mô men quán tính của lô tở và lô cuộn thay đổi trong quá trình hoạt động, ngoài ra với các thay đổi của vật liệu và hệ vận chuyển các lô gồm lô vật liệu và lô dẫn... Như vậy ta có thể kết luận đây chính là hệ MIMO, phi tuyến, không những có tham số biến thiên mà còn có cả thông số bất định nên sẽ gặp rất nhiều thách thức cho việc thiết kế điều khiển cho hệ.

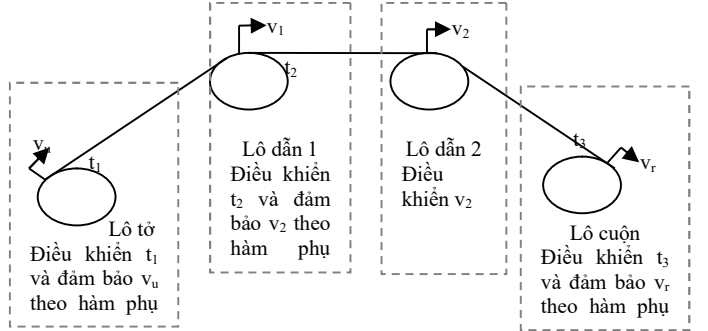
### 3. Thiết kế điều khiển cho hệ cuộn lại có nhiều lô dẫn

Trong phần này, các tác giả đề xuất phương pháp tổng hợp hệ điều khiển thích nghi dựa trên thuật toán điều khiển Backstepping kết hợp mạng Neural RBF [21] đảm bảo cho các hệ thống điều khiển ổn định bền vững với các ảnh hưởng của yếu tố biến thiên gây nên. Với đối tượng là hệ cuộn lại nhiều lô dẫn có mô hình toán học được biểu diễn bằng các phương trình (15)-(21), yêu cầu của bài toán điều khiển đặt ra là hệ thống ổn định với lực căng trên các đoạn và vận tốc dài bám sát giá trị đặt mà không bị ảnh hưởng bởi các thành phần thông số biến thiên và bất định.

Với mô hình cụ thể (29) ta có sẽ đặt ra yêu cầu điều khiển như sau:

- 1) Nhiệm vụ ưu tiên bộ điều khiển sẽ thực hiện là điều khiển lực căng của cả 3 đoạn vật liệu  $t_1, t_2, t_3$  và vận tốc dài do lô dẫn thứ 2 làm chủ cho cả hệ thống
- 2) Nhiệm vụ tiếp theo cần thực hiện là vận tốc dài của các cuộn còn lại sẽ được xác định qua hàm phụ thuộc.

Hai nhiệm vụ điều khiển được thể hiện qua Hình 6 như sau:



Hình 6: Nhiệm vụ điều khiển lực căng và vận tốc dài cho các lô

#### 3.1. Thiết kế bộ điều khiển Backstepping

Các bước thiết kế theo phương pháp backstepping[21][22] và [23] đảm bảo các yêu cầu điều khiển Hình 6 như sau:

Xác định các tín hiệu sai lệch:

$$\Delta t_{s1} = t_1 - T_{1d} \quad (30)$$

$$\Delta t_{s2} = t_2 - T_{2d} \quad (31)$$

$$\Delta t_{s3} = t_3 - T_{3d} \quad (32)$$

$$\Delta \omega_{su} = \omega_u - F_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) \quad (33)$$

$$\Delta \omega_{s1} = \omega_1 - F_{\omega_{1d}}(t_2, \omega_2, t_1, \omega_1) \quad (34)$$

$$\Delta \omega_{s2} = \omega_2 - W_{2d} \quad (35)$$

$$\Delta \omega_{sr} = \omega_r - F_{\omega_{rd}}(t_3, \omega_2, \omega_r) \quad (36)$$

Nhiệm vụ thiết kế dựa trên kỹ thuật Backstepping ta sẽ xác định các hàm cho 4 biến điều khiển  $M_u, M_2, M_2, M_r$  các hàm phụ thuộc  $F_{\omega_{ud}}, F_{\omega_{1d}}, F_{\omega_{rd}}$ .

Ta sử dụng tiêu chuẩn ổn định Lyapunov để xét tính ổn định của hệ thống, lấy đạo hàm của (30) kết hợp với (22) và (33) ta được phương trình như sau:

$$\Delta \dot{t}_{s1} = \dot{t}_1 - \dot{T}_{1d} = c_1(\Delta \omega_{su} + F_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) + c_2t_1\omega_1 + c_3\omega_1) \quad (37)$$

Chọn ứng viên hàm Lyapunov (CLF) thứ nhất  $V_1$  là:

$$V_1 = \frac{1}{2} \Delta t_{s1}^2 \quad (38)$$

Đạo hàm hai về phương trình (38) ta có:

$$\dot{V}_1 = \Delta t_{s1} \Delta \dot{t}_{s1} = \Delta t_{s1} (c_1 (\Delta \omega_{su} + F_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) + c_2 t_1 \omega_1 + c_3 \omega_1)) \quad (39)$$

Ở đây ta chọn:

$$F_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) = -\frac{1}{c_1} (c_2 t_1 \omega_1 + c_3 \omega_1 + k_1 \Delta t_{s1} - \Delta \omega_{su}) \quad (40)$$

Đảm bảo tính xác định âm của  $\dot{V}_1$  ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= t_{s1} (c_1 (\omega_{su} - \frac{1}{c_1} (c_2 t_1 \omega_1 + c_3 \omega_1 + k_1 t_{s1}) - \omega_{su}) + c_2 t_1 \omega_1 + c_3 \omega_1) \\ &= -k_1 t_{s1}^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (41)$$

Làm tương tự cho (31),(32),(33),(34),(35),(36) ta có:

$$F_{\omega_{ud}}(t_2, \omega_2, t_1, \omega_2) = -\frac{k_2 \Delta t_{s2} + c_6 t_2 \omega_2 + c_7 \omega_2 - \Delta \omega_{s1}}{c_4 + c_5 t_1} \quad (42)$$

$$F_{\omega_{ud}}(t_3, \omega_2, \omega_r) = -\frac{k_3 \Delta t_{s3} + c_9 t_2 \omega_2 + c_8 \omega_2 - \Delta \omega_{sr}}{c_{11} + c_{10} t_3} \quad (43)$$

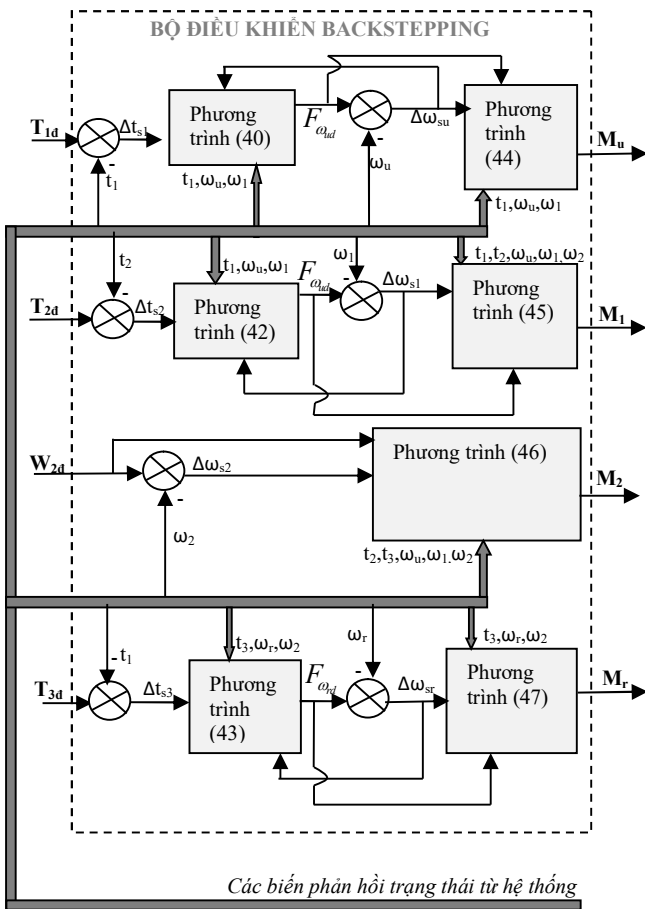
$$M_u = -\frac{1}{c_{12}} (c_{13} t_1 + c_{14} \omega_u + c_{15} \omega_u^2 - \dot{F}_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) + k_4 \Delta \omega_{su}) \quad (44)$$

$$M_1 = -\frac{1}{c_{16}} (c_{17} t_1 + c_{18} t_2 + c_{19} \omega_1 - \dot{F}_{\omega_{ud}}(t_2, \omega_2, t_1, \omega_1) + k_5 \Delta \omega_{s1}) \quad (45)$$

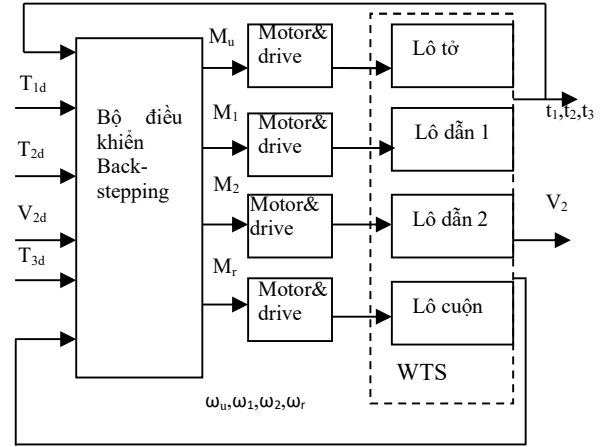
$$M_2 = -\frac{1}{c_{20}} (c_{21} t_2 + c_{22} t_3 - \dot{W}_{2d} + c_{23} \omega_2 + k_6 \Delta \omega_{s2}) \quad (46)$$

$$M_r = -\frac{1}{c_{24}} (c_{25} t_3 + c_{26} \omega_r + c_{27} \omega_r^2 - \dot{F}_{\omega_{ud}}(t_3, \omega_2, \omega_r) + k_7 \Delta \omega_{sr}) \quad (47)$$

Với  $k_5, k_6, k_7$  là các số dương,  $c_1 \rightarrow c_{27}$  được xác định trong mục 2.3 và  $J_u, J_r$  được tính theo công thức (3) và (11).



Hình 7: Sơ đồ cấu trúc chi tiết của bộ điều khiển Backstepping cho mô hình cuộn lại 2 lô dẫn chủ động



Hình 8: Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điều khiển cho hệ cuộn lại có hai lô dẫn chủ động

Từ (40);(42);(43);(44);(45);(46);(47) ta có cấu trúc của hệ thống điều khiển cho hệ cuộn lại hai lô dẫn động như Hình 8 và cấu trúc chi tiết bộ điều khiển như Hình 7 được thiết kế cho mô hình (29).

### 3.2. Sử dụng mạng Neural RBF để bù thích nghi thành phần mô men quán tính trên lô vật liệu

Bộ điều khiển được thiết kế phụ thuộc vào rất nhiều thông số của mô hình  $J_u, J_r, c_1 \rightarrow c_{27}$ . Trong đó  $J_u, J_r$  là các tham số biến thiên theo thời gian được xác định qua công thức (3) và (11). Và với cách tính này ta phải có giả thiết lô vật liệu tròn đều, hàm bán kính theo vận tốc được phản hồi chính xác kịp thời. Tuy nhiên trong thực tế, việc xử lý và cuộn các lô vật liệu gặp rất nhiều yếu tố bất lợi [24],[25] làm cho các lô vật liệu này không tròn đều lý tưởng. Vì vậy việc tính  $J_u, J_r$  theo (3) và (11) sẽ ko chính xác và việc cập nhật các giá trị này trong bộ điều khiển là rất khó thực hiện. Sai lệch này sẽ ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển, trong một số trường hợp có thể sẽ làm cho hệ mất ổn định.

Để khắc phục vấn đề trên, các tác giả đề xuất một phương pháp bù ảnh hưởng của sự biến thiên các tham số trên dựa trên mạng RBF với đầu vào của mạng là  $\omega_r, \omega_u$  và đầu ra là mô men quán tính  $\hat{J}_u, \hat{J}_r$  (xác định dương và bị chặn). Việc kết hợp giữa bộ điều khiển Backstepping và bộ bù thích nghi mô men quán tính lô vật liệu sẽ tạo ra bộ điều khiển thích nghi với tham số biến thiên và đảm bảo tính ổn định của hệ thống.

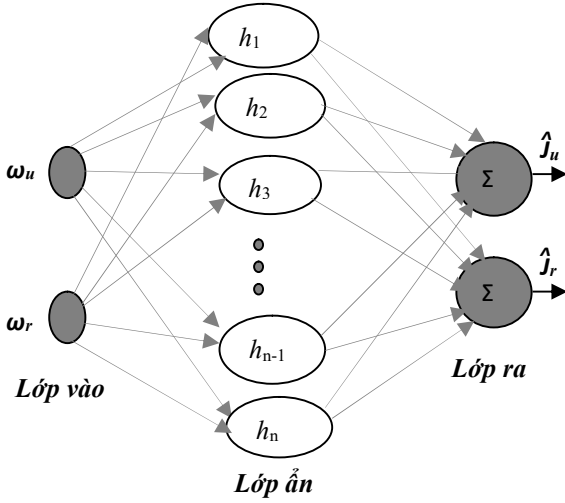
Nhiệm vụ của mạng RBF được huấn luyện để sao cho hệ thống ổn định và các sai lệch mong muốn về 0, giả sử  $J_u, J_r$  được tính toán bởi hai mạng neural RBF[23] có dạng:

$$\begin{cases} J_u = W_u^{*T} h_u \\ J_r = W_r^{*T} h_r \end{cases} \quad (48)$$

$$\begin{cases} h_{ui} = \exp\left(-\frac{\|\omega_u - q_{1i}\|^2 + \|\omega_r - q_{2i}\|^2}{2b_i^2}\right) \\ h_{rj} = \exp\left(-\frac{\|\omega_u - q_{2j}\|^2 + \|\omega_r - q_{1j}\|^2}{2b_j^2}\right) \end{cases} \quad (49)$$

Trong đó:  $W_u^*, W_r^*$  là trọng số 'lý tưởng',  $h_u, h_r$  là hàm cơ sở (Gaussian Function) tương ứng của hai mạng neural RBF,

$\omega_u, \omega_r$  là các đầu vào của mạng neural RBF,  $q_{1i}, q_{1j}, q_{2i}, q_{2j}$  là tâm của hàm cơ sở,  $b_i, b_j$  là bề rộng của hàm của hàm Gauss. Do  $h_{ui}, h_{rj}$  được xác định theo công thức (49) nên đầu ra ước lượng của mạng như Hình 9 và có dạng như sau:



Hình 9: Sơ đồ mạng Neural RBF

$$\begin{cases} \hat{J}_u = \hat{W}_u^T h_u \\ \hat{J}_r = \hat{W}_r^T h_r \end{cases} \quad (50)$$

Trong đó:  $\hat{W}_u, \hat{W}_r$  là các trọng số đánh giá được hiệu chỉnh trong quá trình huấn luyện mạng. Sai lệch của trọng số đánh giá so với trọng số lý tưởng:

$$\begin{cases} \tilde{W}_u = W_u^* - \hat{W}_u \\ \tilde{W}_r = W_r^* - \hat{W}_r \end{cases} \quad (51)$$

Với  $\hat{J}_u, \hat{J}_r$  ước lượng qua RBF thay cho  $J_u, J_r$  được tính từ (3) và (11), các phương trình của bộ điều khiển được thiết kế trong mục 3.1 là  $M_u, M_r$  sẽ được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \hat{M}_u = -\frac{1}{\hat{c}_{12}} (\hat{c}_{13} t_1 + \hat{c}_{14} \omega_u + \hat{c}_{15} \omega_r - \dot{F}_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) + k_4 \Delta \omega_{su}) \\ \hat{M}_r = -\frac{1}{\hat{c}_{24}} (\hat{c}_{25} t_3 + \hat{c}_{26} \omega_r + \hat{c}_{27} \omega_r - \dot{F}_{\omega_{rd}}(t_3, \omega_2, \omega_r) + k_7 \Delta \omega_{sr}) \end{cases} \quad (52)$$

Nhiệm vụ thiết kế là ta phải đi xác định được hàm trọng số để hiệu chỉnh trong quá trình huấn luyện với điều kiện tiên quyết đảm bảo tính ổn định của hệ thống và sai lệch (51) đặt cực trị. Đạo hàm hai vế (33) và (36) kết hợp thay thế với 2 phương trình (25) và (28) và (52) ta có:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_{su} = \frac{\hat{J}_u}{J_u} \dot{F}_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) - \frac{\hat{J}_u}{J_u} k_4 (\Delta \omega_{su}) \\ \Delta \dot{\omega}_{sr} = \frac{\hat{J}_r}{J_r} \dot{F}_{\omega_{rd}}(t_3, \omega_2, \omega_r) - \frac{\hat{J}_r}{J_r} k_7 (\Delta \omega_{sr}) \end{cases} \quad (53)$$

Tương tự ta chọn hàm điều khiển Lyapunov của LCF với từng hàm của (53):

$$V_u = \frac{1}{2} J_u \Delta \omega_{su}^2 + \frac{1}{2} (\tilde{W}_u^T F_u^{-1} \tilde{W}_u) \quad (54)$$

$$V_r = \frac{1}{2} J_r \Delta \omega_{sr}^2 + \frac{1}{2} (\tilde{W}_r^T F_r^{-1} \tilde{W}_r) \quad (55)$$

Tương tự đạo hàm (54) và (55), để  $\dot{V}_u, \dot{V}_r$  xác định âm ta chọn hàm điều khiển với luật điều khiển như sau:

$$\dot{\hat{W}}_u = -F_u h_u \dot{F}_{\omega_{ud}}(t_1, \omega_1, \omega_u) \Delta \omega_{su}; \quad (56)$$

$$\dot{\hat{W}}_r = -F_r h_r \dot{F}_{\omega_{rd}}(t_3, \omega_2, \omega_r) \Delta \omega_{sr}; \quad (57)$$

Trong đó:

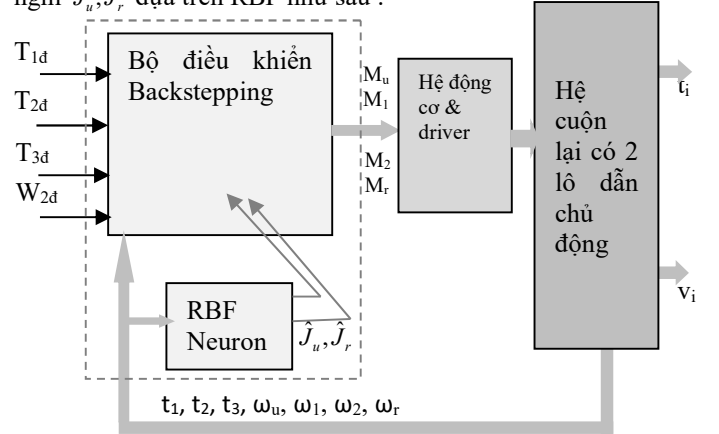
$\hat{J}_u$ : đầu ra ước lượng của mạng neural

$\hat{J}_r$ : đầu ra ước lượng của mạng neural

$F_u, F_r$ : ma trận đơn vị

$\hat{c}_i, \hat{c}_{i1}$  được tính lại theo  $\hat{J}_u, \hat{J}_r$

Như vậy bộ điều khiển Backstepping được thiết kế được thiết kế trong mục 3.1 sẽ được tích hợp thêm phần bù thích nghi  $\hat{J}_u, \hat{J}_r$  dựa trên RBF như sau:



Hình 10: Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển Backstepping kết hợp bộ bù thích nghi mô men quán tính lô vật liệu sử dụng Neural RBF

#### 4. Mô phỏng hệ thống

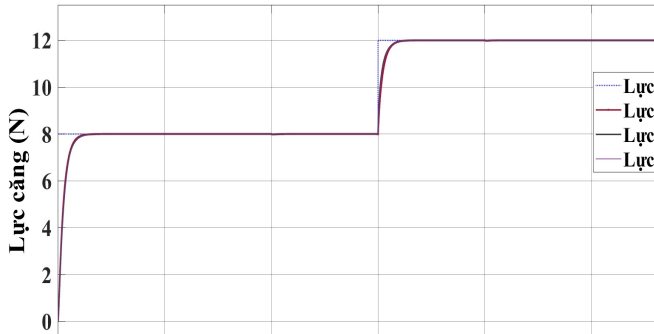
Để kiểm chứng hiệu quả thuật toán đề xuất, ta sẽ tiến hành mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink với thông số mô hình tham khảo theo [11] được đề cập trong Table 1:

Table 1: Bảng thông số của mô hình

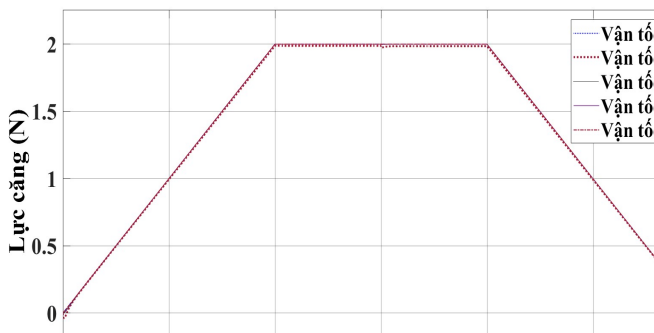
Ký hiệu	Thông số	Giá trị [đơn vị]
$R_{u0}$	Bán kính ban đầu lô tờ	0,1 m
$J_{u0}$	Momen quán tính ban đầu lô tờ	0,015 kg.m <sup>2</sup>
$b_{f_u}$	Hệ số ma sát giữa vật liệu và lô tờ, lô cuộn	0,0002533 Nms
$R_{r0}$	Bán kính ban đầu lô cuộn	0,05 m
$J_{r0}$	Momen quán tính ban đầu lô cuộn	0,005 kg.m <sup>2</sup>
$R_1, R_2$	Bán kính lô dẫn	0,05 m
$J_1, J_2$	Momen quán tính lô dẫn	0,005 kg.m <sup>2</sup>
$b_{f_r}, b_{f_2}$	Hệ số ma sát vật liệu với lô dẫn	0,00028 kgms/rad
$w$	Độ rộng	0,3 m
$h$	Độ dày	0,00005 m
$L_1, L_2, L_3$	Chiều dài các đoạn vật liệu	0,4 m
$E$	Mô đun đàn hồi vật liệu PET	$2,5 \cdot 10^9$ N/m <sup>2</sup>

### 4.1. Trường hợp 1

Giả thiết hệ có các lô tròn đều, mô men quán tính của các cuộn thay đổi tuyến tính theo tốc độ của lô tờ và lô cuộn được tính theo (3) và (11). Kết quả mô phỏng sử dụng sử dụng bộ điều khiển Backstepping cho hệ cuộn lại có 2 lô dẫn giả thiết như sau:

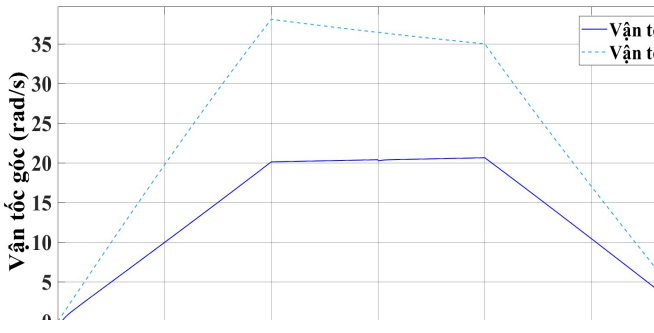


Hình 11: Lực căng trên từng phân đoạn khi sử dụng Backstepping



Hình 12: Vận tốc dài trên từng phân đoạn khi sử dụng Backstepping

Các giá trị đầu ra mong muốn như lực căng các đoạn trong Hình 11 và vận tốc dài của các lô trong Hình 12 đều bám sát giá trị đặt ban đầu. Trong đó thời gian quá độ khoảng 0.8s, khi khởi động, đặc biệt lực căng trên các đoạn không xuất hiện độ quá điều chỉnh, đây là yêu cầu quan trọng hàng đầu khi điều khiển lực căng, nhằm đảm bảo chất lượng cuộn không bị móp mép, vật liệu bị nhăn nhúm hoặc rạn đứt.



Hình 13: Tốc độ góc của lô tờ ra và lô cuộn khi sử dụng Backstepping



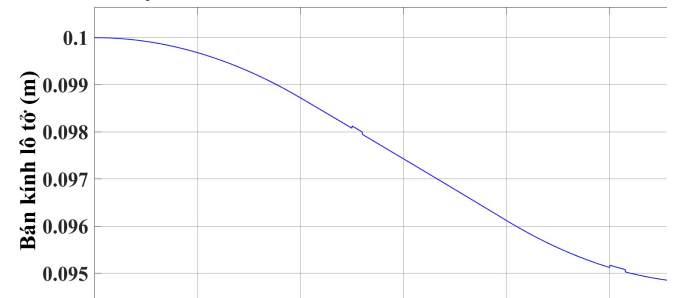
Hình 14: Tốc độ góc của hai lô dẫn chủ động khi sử dụng Backstepping

Kết quả mô phỏng cũng chỉ ra tính đúng đắn của mô hình toán học được xây dựng khi tốc độ góc của các cuộn và lô được thể hiện trong hình Hình 13 và Hình 14

Tại thời điểm bắt đầu vận chuyển, ta giả thiết lô tờ ra có bán kính lớn hơn lô cuộn vì vật liệu đang được cuộn trên lô tờ. Do đó khi hệ bắt đầu vận chuyển vật liệu, lô tờ ra sẽ có tốc độ góc nhỏ hơn lô cuộn, và trong quá trình vận chuyển tốc độ của lô tờ sẽ tăng dần và lô cuộn sẽ giảm dần như hình Hình 13. Với vận tốc góc của hai lô dẫn sẽ không thay đổi do bán kính không đổi trong quá trình vận chuyển, kết quả mô phỏng vận tốc góc của hai lô dẫn đã được kiểm chứng trong Hình 14.

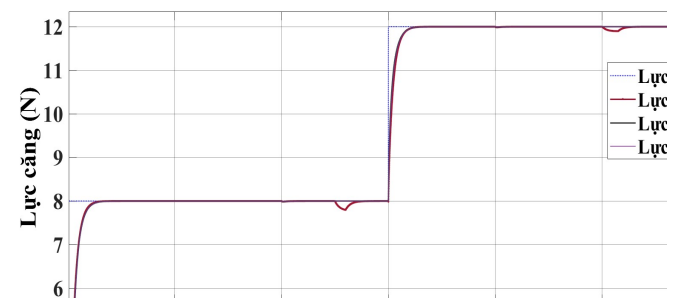
### 4.2. Trường hợp 2

Để kiểm chứng khả năng bù của RBF, ta giả thiết hệ có lô tờ không tròn đều lô tờ [24] và [26]. Có rất nhiều nguyên nhân gây ra nhưng bất thường này, ví dụ lô không tròn đều trước khi cuộn vật liệu lên hoặc trong dây chuyền cell khi lô tờ có đoạn vật liệu bị trùng lại tại một vòng, làm cho bán kính tại điểm đó thay đổi so với các điểm khác. Ta sẽ coi đó là yếu tố bất định của mô men quán tính lô tờ ra. Để tiến hành mô phỏng ta sẽ giả thiết có nhiều mô men quán tính của lô tờ thay đổi nguyên nhân do lô vật liệu không tròn đều và có bán kính thay như Hình 15.

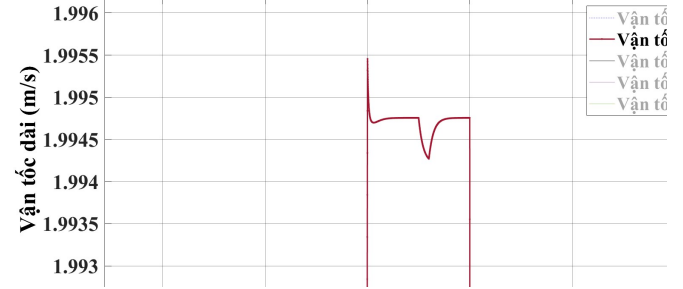


Hình 15: Giá trường hợp lô tròn đều và lô không tròn đều có giá trị bán kính thay đổi tại thời điểm 5s và 10s

#### 4.2.1. Xét trường hợp bộ điều khiển chưa có bộ bù RBF



Hình 16: Giá trị lực căng khi chưa có bộ bù RBF

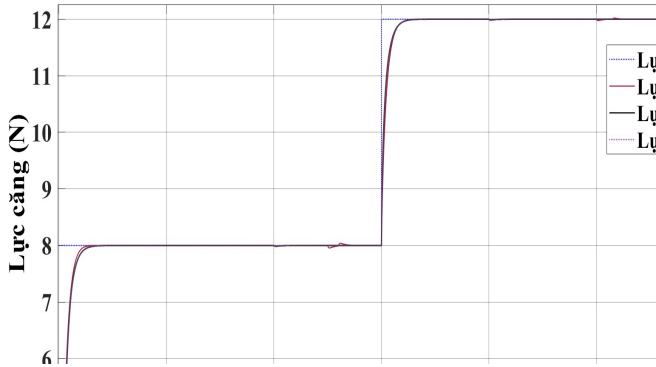


Hình 17: Giá trị vận tốc dài trên lô tờ chưa có bộ bù RBF

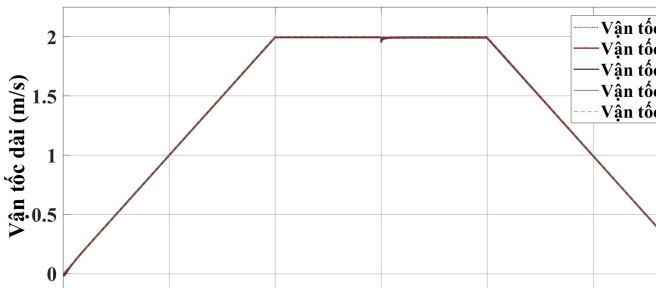
Khi có thay đổi bán kính lô dẫn sẽ dẫn đến thay đổi mô men quán tính của lô tờ, và làm ảnh hưởng đến đáp ứng lực căng đầu ra. Kết quả mô phỏng đã chỉ ra biến thiên lực căng và vận tốc dài tại các điểm có sự thay đổi của mô men quán tính trên cuộn khi chưa có RBF như trong Hình 16 và Hình 17.

#### 4.2.2. Xét trường hợp bộ điều khiển có bộ bù RBF

Đáp ứng đầu ra của hệ thống khi có bộ bù sử dụng RBF như trong Hình 18 và Hình 19:



Hình 18: Giá trị lực căng khi có bộ bù RBF



Hình 19: Giá trị về vận tốc khi có RBF

Từ Hình 18 ta thấy lực căng trong trường hợp lô tờ không tròn đều vẫn được bù và có đáp ứng bám với lượng đặt, đảm bảo độ quá điều chỉnh nhỏ nhất, lực căng cuối cùng T3 vẫn bám được giá trị đặt, thời gian quá độ khoảng 0.8s, không có độ quá điều chỉnh. Kết quả mô phỏng cho thấy rõ vai trò của việc bù mô men quán tính.

Vận tốc dài của các lô vật liệu và lô dẫn vẫn bám theo giá trị đặt Hình 19. Kết quả mô phỏng chỉ ra vận tốc dài vẫn bám giá trị đặt không có độ quá điều chỉnh.

Qua kết quả trên Hình 18 và Hình 19 cho ta thấy được tính đúng đắn của thuật toán ước lượng sử dụng mạng neural RBF. Kết quả đánh giá thành phần bất định này sẽ được cập nhật liên tục làm cơ sở để tổng hợp tín hiệu điều khiển cho bộ điều khiển phối hợp giữa Backstepping với RBF cho hệ cuộn lại giúp cho cấu trúc điều khiển mang tính thích nghi với các sự bất định tồn tại trên hệ.

## 5. Kết luận

Bài báo đã xây dựng mô hình toán học tổng quát cho hệ cuộn lại nhiều phân đoạn có xét đến tính phi tuyến và tham số hệ thống biến thiên. Mô hình này sau đó được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển phi tuyến tập trung dựa trên kỹ thuật Backstepping. Thêm vào đó, để thích nghi với sự thay đổi của thành phần mô men quán tính lô tờ và lô cuộn, bài báo đã đề xuất sử dụng mạng Neural RBF. Thuật toán cập nhật trọng số mạng Neural RBF đã được chứng minh đảm bảo

tính ổn định của hệ thống. Các kết quả mô phỏng đã chỉ ra tính ổn định, khả năng thích nghi với sự thay đổi của tham số, khả năng bám tín hiệu đặt của đầu ra hệ thống khi sử dụng các bộ điều khiển đề xuất.

Trong thời gian tiếp theo các tác giả sẽ tập trung thiết kế và xây dựng hệ thống thực nghiệm cho hệ cuộn lại nhiều lô dẫn, để thử nghiệm và đánh giá các thuật toán được đề xuất ở trên. Việc sử dụng bộ quan sát lực thay thế cho cảm biến lực căng trong hệ thống cũng sẽ được xem xét đánh giá.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2020-PC-022.

## 6. Tài liệu tham khảo

- [1] D. R. Roisum, G. Guzman, and S. Shams Es-haghi, "Web Handling and Winding," *Roll. Manuf. Process Elem. Recent Adv.*, pp. 147–170, 2018.
- [2] F. C. Krebs, T. Tromholt, and M. Jørgensen, "Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing," *Nanoscale*, vol. 2, no. 6, pp. 873–886, 2010.
- [3] J. Lee and C. Lee, "Model-Based Winding Tension Profile to Minimize Radial Stress in a Flexible Substrate in a Roll-to-Roll Web Transporting System," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 2928–2939, 2018.
- [4] A. Seshadri, P. R. Pagilla, and J. E. Lynch, "Modeling print registration in roll-to-roll printing presses," *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME*, vol. 135, no. 3, pp. 1–11, 2013.
- [5] J. Damour, "the Mechanics of Tension Control," vol. 91, no. 5, pp. 1689–1699, 2012.
- [6] M. Zubair, G. Ponniah, Y. J. Yang, and K. H. Choi, "Web tension regulation of multispan roll-to-roll system using integrated active dancer and load cells for printed electronics applications," *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.)*, vol. 27, no. 2, pp. 229–239, 2014.
- [7] S. Liu, X. Mei, F. Kong, and J. Shen, "Tension controller design for unwinding tension system based on active disturbance rejection control," *2012 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2012*, pp. 1798–1803, 2012.
- [8] N. Nevaranta, M. Niemela, J. Pyrhonen, O. Pyrhonen, and T. Lindh, "Indirect tension control method for an intermittent web transport system," *15th Int. Power Electron. Motion Control Conf. Expo. EPE-PEMC 2012 ECCE Eur.*, pp. 1–6, 2012.
- [9] H. Glaoui, A. Hazzab, B. Bouchiba, and I. Khalil, "Modeling and Simulation Multi Motors Web Winding System," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 4, no. 2, pp. 110–115, 2013.
- [10] S. Liu, X. Mei, F. Kong, and K. He, "A decoupling control algorithm for unwinding tension system based on active disturbance rejection control," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, 2013.
- [11] K. H. Choi, T. T. Tran, and D. S. Kim, "Back-stepping controller based web tension control for



- roll-to-roll web printed electronics system,” *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, vol. 5, no. 1, pp. 7–21, 2011.
- [12] B. Allaoua, A. Laoufi, and B. Gasbaoui, “Multi-Drive Paper System Control Based on Multi-Input Multi-Output PID Controller,” no. 16. pp. 59–70, 2010.
- [13] S. Lee and N. Hoang, “Lateral control of roll-to-roll system using fuzzy control logic and vision sensor,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 317–319, pp. 1541–1544, 2011.
- [14] K. M. Chang and Y. Y. Lin, “Robust sliding mode control for a roll-to-roll machine,” *ICINCO 2013 - Proc. 10th Int. Conf. Informatics Control. Autom. Robot.*, vol. 1, pp. 405–409, 2013.
- [15] F. Mokhtari and P. Sicard, “Decentralized control design using Integrator Backstepping for controlling web winding systems,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 3451–3456, 2013.
- [16] L. T. Thi, L. N. Tung, C. Duc Thanh, D. N. Quang, and Q. N. Van, “Tension regulation of roll-To-roll systems with flexible couplings,” in *Proceedings of 2019 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2019*, 2019, pp. 441–444.
- [17] H. Koç, D. Knittel, M. De Mathelin, and G. Abba, “Modeling and robust control of winding systems for elastic webs,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 197–208, 2002.
- [18] P. R. Pagilla, N. B. Siraskar, and R. V. Dwivedula, “Decentralized control of web processing lines,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 106–117, 2007.
- [19] H. Irschik and A. K. Belyaev, *Dynamics of Mechanical Systems with Variable Mass*, vol. 557. 2014.
- [20] B. J. Emran and H. Najjaran, “A review of quadrotor: An underactuated mechanical system,” *Annu. Rev. Control*, vol. 46, no. xxxx, pp. 165–180, 2018.
- [21] X. Shi, Y. Cheng, C. Yin, X. Huang, and S. ming Zhong, “Design of adaptive backstepping dynamic surface control method with RBF neural network for uncertain nonlinear system,” *Neurocomputing*, vol. 330, pp. 490–503, 2019.
- [22] C. N. Manh, M. T. Van, D. N. Duc, L. N. Tung, D. P. Tien, and L. T. Thi, “Neural network based adaptive control of web transport systems,” in *Proceedings of 2019 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2019*, 2019, pp. 124–128.
- [23] D. N. Duc, T. Ly Thi Tong, and ung L. Nguyen, “Imperfect Roll Arrangement Compensation Control based on Neural Network for Web Handling Systems,” *Engineering, Technology & Applied Science ResearchTechnology*, vol. 10, no. 3. pp. 5694–5699, 2020.
- [24] K. H. Shin, J. I. Jang, H. K. Kang, and S. H. Song, “Compensation method for tension disturbance due to an unknown roll shape in a web transport system,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 1422–1428, 2003.
- [25] K. C. Lin, “Observer-based tension feedback control with friction and inertia compensation,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 109–118, 2003.
- [26] R. V. Dwivedula and P. R. Pagilla, “Effect of backlash on web tension in roll-to-roll manufacturing systems: Mathematical model, mitigation method and experimental evaluation,” *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, pp. 1087–1092, 2013.