

# NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN LỰC CĂNG CHO HỆ THỐNG RÚT SỢI THÉP

## RESEARCH ON TENSION CONTROL FOR STEEL SPINNING SYSTEM

HOÀNG CÔNG ANH<sup>1</sup>, BÙI GIA THỊNH<sup>1\*</sup>, NGUYỄN THỊ THU HỒNG<sup>1</sup>,  
TÔ QUỐC TUẤN<sup>1</sup>, ĐẶNG HỒNG HẢI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khoa Điện - Cơ, Trường Đại học Hải Phòng

<sup>2</sup>Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

\*Email liên hệ: [thinbg@dhhp.edu.vn](mailto:thinbg@dhhp.edu.vn)

### Tóm tắt

Trong lĩnh vực kéo sợi thép, hệ thống điều khiển lực căng biến tần được sử dụng phổ biến. Tuy nhiên, nhiều yếu tố khác nhau trong quá trình sản xuất có thể gây ra sự gián đoạn trong quá trình rút sợi thép, dẫn đến gián đoạn sản xuất. Để giải quyết vấn đề này, bài báo đề xuất các phương trình động lực học, thiết kế bộ điều khiển PID lực căng cho hệ thống kéo sợi thép và xây dựng mô hình nghiên cứu để kiểm chứng lý thuyết. Kết quả khẳng định tính chính xác của hệ thống kéo thép, đồng thời thuật toán được đề xuất nghiên cứu và ứng dụng tiếp theo trong các ngành liên quan khác như hệ thống sản xuất dây cáp điện và kéo thả cuộn giấy,...

**Từ khóa:** Kéo sợi thép, lực căng, biến tần, bộ điều khiển PID.

### Abstract

In the field of steel spinning, the inverter's tension control system is commonly used. However, various factors during the production process can cause disruptions to the steel fiber withdrawal process, leading to production interruptions. To address this issue, the article proposes dynamic equations, designs a tension PID controller for the steel spinning system, and builds a research model to verify the theory. The results confirm the accuracy of the steel drawing system, and the algorithm is suggested for further research and application in other related industries such as electric cable production systems and paper roll pulling and releasing,...

**Keywords:** Steel spinning, tension, inverter, PID controller.

## 1. Mở đầu

Trong giai đoạn công nghiệp hóa và hiện đại hóa, cùng với việc hội nhập kinh tế với thế giới, các ngành công nghiệp đang trải qua sự chuyển biến đáng kể trong việc đầu tư vào máy móc và phương tiện sản xuất. Nhiều nhà máy mới được xây dựng với công nghệ hiện đại, và nhu cầu cải tiến phương tiện sản xuất

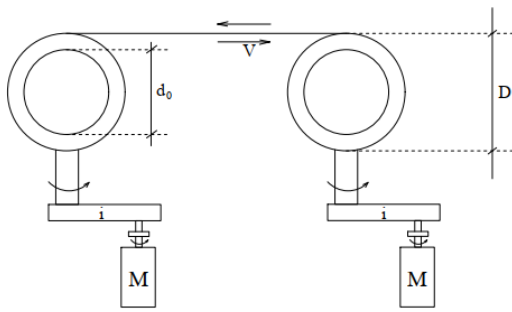
ngày càng tăng. Đáng chú ý, hệ truyền động điện được áp dụng rộng rãi trong các máy sản xuất để điều chỉnh nhiều thông số như tốc độ, moment, lực,... nhằm tối ưu hóa quá trình sản xuất. Cụ thể, hệ truyền động được sử dụng trong nhiều loại nhà máy, bao gồm sản xuất giấy, sản xuất vải dệt, cán tôn, và sản xuất cáp điện.

Trong hệ thống kéo nhả, việc kiểm soát lực căng của vật liệu là một nhiệm vụ cực kỳ quan trọng [1, 2]. Lực căng không đủ có thể dẫn đến sự suy giảm chất lượng vật liệu trên cuộn, trong khi lực căng quá mức có thể làm đứt gãy vật liệu. Do đó, việc điều chỉnh lực căng trong quá trình kéo nhả vật liệu thu hút sự quan tâm đặc biệt từ các nhà nghiên cứu [3, 4]. Trong truyền động kéo, cơ cấu hướng tâm được điều khiển bằng hai biến đổi tương tự: Tín hiệu lực căng được đo bởi cảm biến thông qua cánh tay đòn. Như vậy, hiện tại việc điều khiển lực căng chưa được tối ưu hóa khi rút thép, do tốc độ phản hồi từ cánh tay đòn có độ trễ lớn [5]. Để giải quyết vấn đề này, cơ cấu cánh tay đòn được hồi về bằng xi lanh khí đẩy với áp lực khí nằm trong khoảng 1-2 (Mpa). Tình trạng này ảnh hưởng đến quá trình sản xuất và có thể ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm.

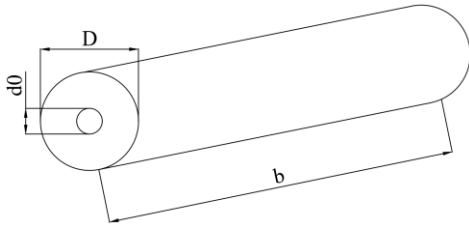
Vì vậy, trong bài báo này, tác giả đã nghiên cứu lý thuyết từ các tài liệu tham khảo và đề xuất cấu trúc điều khiển để tối ưu hóa hệ thống rút thép trong nhà máy. Đồng thời, tác giả cũng xây dựng mô hình vật lý để kiểm chứng lý thuyết đã đề ra. Bài báo được chia thành 4 phần chính: Mở đầu, phân tích động lực học và tải truyền kéo, xây dựng phương trình toán cho hệ thống và xây dựng mô hình nghiên cứu điều khiển lực căng.

## 2. Phân tích động lực học và tải truyền kéo - nhả theo nguyên lý hướng tâm

Trong bài báo, mô hình được mô tả trong Hình 1 và Hình 2. Mô hình bao gồm hai cuộn lô: Cuộn kéo và cuộn nhả. Động cơ truyền động tới cả hai cuộn lô thông qua hộp số với tỷ số truyền  $i$ . Kích thước của hai cuộn lô được xác định bởi đường kính lõi trong ( $d_0$ ), đường kính ngoài ( $D$ ), và chiều dài ( $b$ ). Động cơ sử dụng là động cơ 15kW với điện áp là 380V và nó được truyền động qua hệ thống không xích.



**Hình 1. Phân tích cuộn lô kéo - nhả trong hệ thống máy rút thép**



**Hình 2. Hình ảnh cuộn lô**

Trong quá trình sản xuất, các dây chuyền sử dụng hệ truyền động nhả (ở đầu dây chuyền) và hệ truyền động kéo (ở cuối dây chuyền) hoạt động dựa trên nguyên lý hướng tâm. Mục tiêu là đảm bảo cuộn vật liệu được chặt và duy trì lực căng T cùng với tốc độ dài V ổn định, tức là công suất tải không đổi  $P = VT = const$ . [1, 6, 7]. Trong các hệ thống này, việc sử dụng biến tần độc lập để điều khiển được áp dụng rộng rãi.

Tính quy đổi moment cân và tốc độ về trục động cơ được xác định:

$$\begin{cases} M_{cqd} = \pm T \cdot \frac{D}{2i} \\ \omega_{dc} = i \cdot \frac{2V}{D} \end{cases} \quad (1)$$

$M_{cqd}$ : Moment quy đổi (N.m);

T: Lực căng hay sức căng (N);

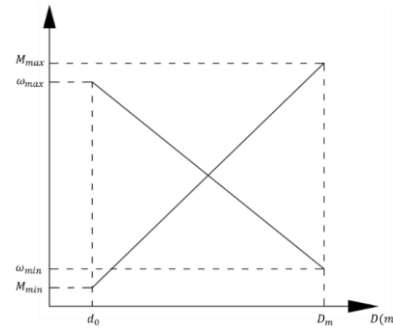
D: Đường kính tức thời cuộn kéo hay cuộn nhả;

V: Tốc độ dài (m/s);

i: Tỷ số truyền của hộp số.

Chú ý: Dấu “+”, “-” trong phương trình (1) chỉ ra chiều quay của cuộn lô vật liệu tương ứng với truyền động kéo và truyền động nhả.

Dựa vào phương trình Moment cân (1), ta nhận thấy có mối quan hệ tỷ lệ thuận giữa đường kính vật liệu D và Moment. Khi đường kính vật liệu tăng, Moment cũng tăng theo và ngược lại. Ta có mối quan hệ giữa moment và đường kính vật liệu D như Hình 3.



**Hình 3. Đặc tính giữa moment, tốc độ và đường kính cuộn vật liệu**

Khi đường kính của cuộn vật liệu tăng từ  $d_0$  đến  $D_m$  ta quan sát thấy Moment của động cơ tăng từ  $M_{min}$  đến  $M_{max}$ . Điều này là do tốc độ tỷ lệ nghịch với Moment, dẫn đến việc tốc độ giảm dần theo đường kính của động cơ.

### 3. Nghiên cứu xây dựng phương trình toán cho hệ thống

Từ các phân tích động học nêu ra ở phần trên, ta nhận thấy rằng trong quá trình hoạt động, khi đường kính của vật liệu thay đổi, Moment của động cơ cũng thay đổi theo. Do đó, việc thiết kế điều khiển cần bao gồm hai vòng điều khiển, bao gồm vòng điều khiển Moment và vòng điều khiển tốc độ dài. Đối với moment động cơ gồm có ba thành phần:

$$M_{dc} = M_c + M_{ms} + M_{dg} \quad (2)$$

Theo phương trình (2), ta có:  $M_c = \pm T \cdot \frac{D}{2i}$  thế

vào phương trình ta được:

$$M_{dc} = \pm T \cdot \frac{D}{2i} + M_{tt} + M_{dg} \quad (3)$$

$M_{c\Sigma}$  là moment cân tổng;  $M_{tt}$  là moment tổn thất;  $M_{dg}$  là moment động.

$$M_{dg} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_{dc}}{dt} + \frac{\omega_{dc}}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt} \quad (4)$$

$J_{\Sigma}$  là moment quán tính quy đổi về trục động cơ (Nms<sup>2</sup>).

Trong Hình 1, có đường kính lõi  $d_0$ (m), Đường kính tức thời cuộn kéo hay cuộn nhả D (hay là đường kính lớn nhất của cuộn vật liệu), chiều rộng của cuộn là  $b$ (m).

- Khi đó moment quán tính được quy đổi về trục của động cơ được tính:

$$\begin{cases} J_{\Sigma} = J_{dc} + J_i + \frac{1}{i^2} \cdot J_G + \frac{1}{i^2} \cdot J_l = J_0 + \frac{1}{i^2} \cdot J_G \\ J_0 = J_{dc} + J_i + \frac{1}{i^2} \cdot J_l \end{cases} \quad (5)$$

$J_{dc}$  : Moment quán tính của động cơ ( $Nms^2$ );  
 $J_i$ : Moment quán tính hộp số giảm tốc ( $Nms^2$ );  
 $J_1$ : Moment quán tính của cuộn vật liệu ( $Nms^2$ );  
 $J_0$ : Moment quán tính không đổi ( $Nms^2$ );  
 $J_G$ : Moment quán tính của cuộn vật liệu khi đường kính của vật liệu thay đổi ( $Nms^2$ ).

Ta có:

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad (Nms^2) \quad (6)$$

$$G = \rho \cdot V$$

Lại có:  $V = \frac{\pi \cdot (D^2 - d_l^2) \cdot b}{4}$

Suy ra:

$$J = \left[ \frac{\pi \cdot b \cdot \rho}{16 \cdot g} (D^4 - d_l^4) \right] \quad (7)$$

Moment quán tính của cuộn lô khi đường kính vật liệu thay đổi được tính:

$$J_G = \left[ \frac{\pi \cdot b \cdot \rho}{16 \cdot g} (D^4 - d_l^4) \right] \quad (8)$$

Trong đó:  $b$  là chiều rộng của cuộn vật liệu ( $m$ );  $\rho$  là trọng lượng riêng của thép ( $N/m^3$ );  $g$  là gia tốc trọng trường ( $m/s^2$ );  $g = 9,8m/s^2$ .

Kết hợp phương trình (5), phương trình (8): Ta được phương trình Moment tổng quát như sau:

$$J_{\Sigma} = J_0 + \frac{1}{i^2} \cdot J_G = J_0 + \frac{1}{i^2} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot b \cdot \rho}{16 \cdot g} (D^4 - d_l^4) \right] \quad (9)$$

Đặt  $A_1 = \frac{\pi \cdot b \cdot \rho}{16 \cdot g \cdot i^2}$ . Từ đó: Moment tổng quát được tính bằng  $J_{\Sigma} = J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4)$  cùng với quan hệ giữa tốc độ quay của động cơ  $\omega_{dc} = 2 \cdot V \cdot i / D$ , ta được:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\omega_{dc}}{dt} &= \frac{2i}{D^2} \cdot \left( D \cdot \frac{dV}{dt} - V \cdot \frac{dD}{dt} \right) \\ \frac{dJ_{\Sigma}}{dt} &= \frac{d}{dt} [A_1 \cdot (D^4 - d_l^4)] = 4 \cdot A_1 \cdot D^3 \cdot \frac{dD}{dt} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Từ phương trình (4), (5), (7), (8), (9). Ta có phương trình moment động:

$$M_{dg} = [J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4)] \cdot \left[ \frac{2i}{D^2} \cdot \left( D \cdot \frac{dV}{dt} - V \cdot \frac{dD}{dt} \right) \right] + \frac{\omega_{dc}}{2} \cdot \left[ 4 \cdot A_1 \cdot D^3 \cdot \frac{dD}{dt} \right] \quad (11)$$

Biến đổi (11) ta được Moment động được tính:

$$M_{dg} = \left[ J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4) \right] \cdot \frac{2i}{D} \cdot \frac{dV}{dt} - \left[ J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4) \right] \cdot \frac{2i}{D^2} + 4 \cdot i \cdot A_1 \cdot D^2 \cdot V \cdot \frac{dD}{dt} \quad (12)$$

Đặt:

$$G_1(D) = [J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4)] \cdot \frac{2i}{D} \quad (13)$$

$$G_2(D) = \left[ [J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4)] \cdot \frac{2i}{D^2} + 4 \cdot i \cdot A_1 \cdot D^2 \right] \quad (14)$$

+ Thành phần thứ nhất  $G_1(D) = \left[ J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4) \right] \cdot \frac{2i}{D}$  gọi thành phần moment động

biến thiên theo tốc độ dài. Thành phần này chỉ tồn tại trong quá trình tăng tốc và giảm tốc hoặc do dao động tốc độ dài, do đó tốc độ dài  $V$  trong các trạng thái này bị biến đổi.

+ Thành phần thứ 2:  $G_2(D) = \left[ J_0 + A_1 \cdot (D^4 - d_l^4) \right] \cdot \frac{2i}{D^2} + 4 \cdot i \cdot A_1 \cdot D^2 \cdot V$  gọi là thành phần biến thiên theo đường kính, nó tồn tại trong suốt quá trình cuộn hoặc nhả vật liệu.

Từ phương trình (13), phương trình (14). Ta rút gọn phương trình (12) như sau:

$$M_{dg} = G_1(D) \cdot \frac{dV}{dt} - G_2(D) \cdot V \cdot \frac{dD}{dt} \quad (15)$$

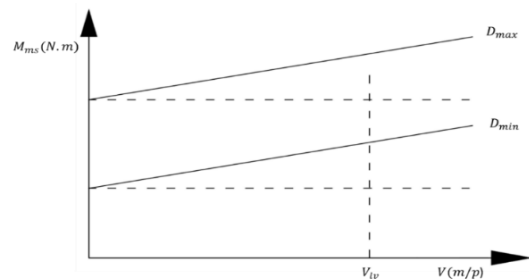
- Moment cần được tính bằng công thức:  $M_c = T \cdot V$

Ta lại có:  $\omega_{dc} = \frac{2 \cdot V \cdot i}{D}$ . Suy ra:  $V = \omega_{dc} \cdot \frac{D}{2i}$

Như vậy:

$$M_c = T \cdot \omega_{dc} \cdot \frac{D}{2i} \quad (16)$$

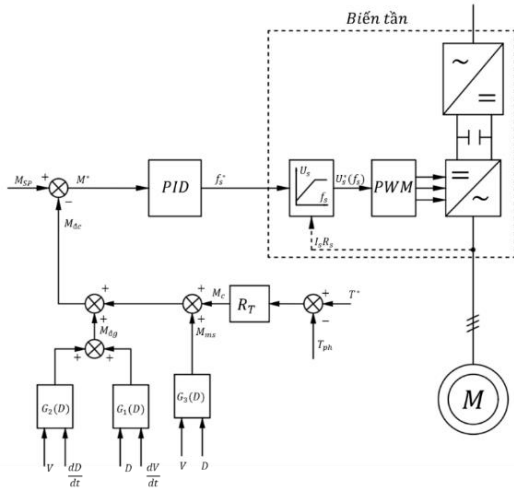
- Moment ma sát  $M_{ms} = G_3(D, V)$  là hàm của tốc độ và đường kính, được xác định thông qua thực nghiệm. Đặc tính của moment ma sát được mô tả ở Hình 4.



Hình 4. Đặc tính của moment ma sát

Để đảm bảo tính ổn định của hệ thống, không chỉ cần khắc phục moment cần do lực căng gây ra mà còn phải bù thêm hai thành phần là moment động và

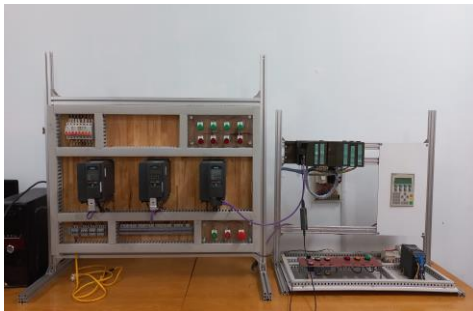
moment ma sát [8]. Cấu trúc điều khiển của hệ thống được mô tả trong Hình 5.



**Hình 5. Cấu trúc điều khiển lực căng cho hệ thống rút sợi thép**

**4. Xây dựng mô hình nghiên cứu điều khiển lực căng**

Để kiểm chứng tính hiệu quả của cấu trúc điều khiển, tác giả đã xây dựng mô hình nghiên cứu điều khiển lực căng. Mô hình này bao gồm hai phần chính: Phần điện (Hình 6) bao gồm: Bộ điều khiển PLC S7-300 CPU315-2DP, Biến tần MM420, Module Analog, Cấp MPI, Cấp Profibus,... và Phần cuộn lô (Hình 7).



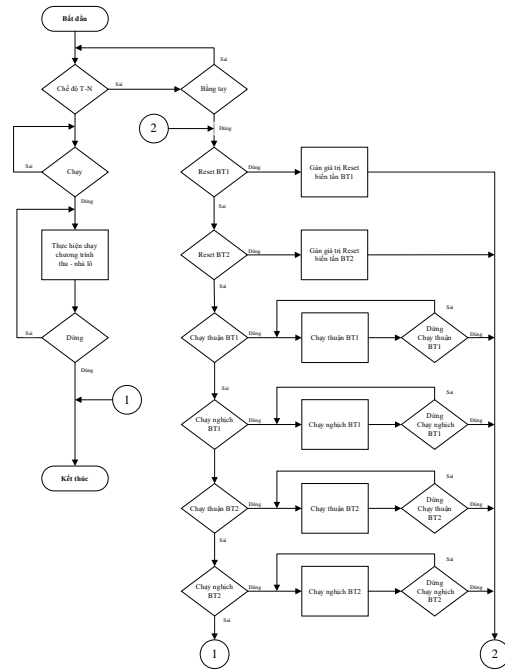
**Hình 6. Hình ảnh phần điện của mô hình**



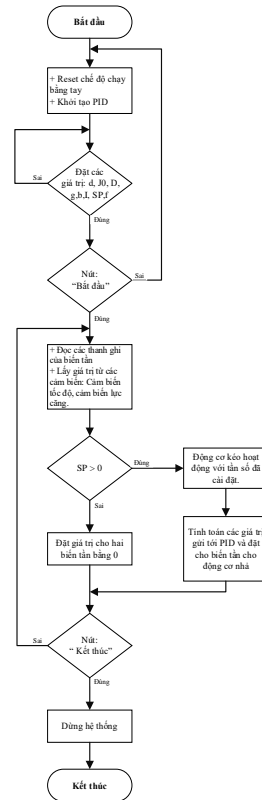
**Hình 7. Hình ảnh cuộn lô mô phỏng cho mô hình**

cuộn lô có kích thước đường kính 45cm, Động cơ truyền động tới cuộn kéo và cuộn nhả thông qua hộp số với tỷ số truyền  $i=35$ ; động cơ 1,5kW; điện áp 220V.

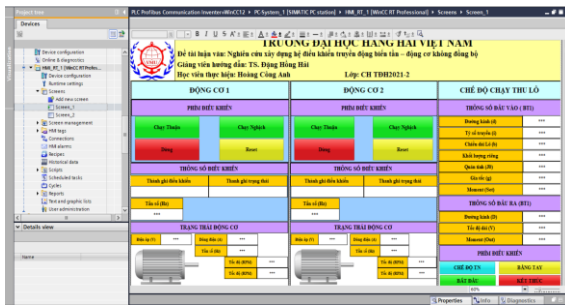
Lưu đồ thuật giải của mô hình như Hình 8, Hình 9.



**Hình 8. Lưu đồ thuật giải 1**



**Hình 9. Chương trình con chế độ kéo - nhả**



Hình 10. Màn hình giám sát trên WinCC

Chế độ Kéo Nhà (Hình 9): Được thực hiện bằng cách cài đặt các thông số cho chương trình chạy sau khi lựa chọn chế độ T-N. Sau đó, nhấn phím "Bắt đầu" để khởi động quá trình, trong đó một động cơ chạy kéo và một động cơ chạy nhà. Động cơ chạy nhà được điều khiển thông qua bộ điều khiển PID [9, 10, 11] áp dụng phương pháp điều khiển moment. Với các thông số PID ta tìm được thông qua mô phỏng và dò trên phần mềm lập trình là  $K_p=1,0$ ;  $K_I=0,1$ ;  $K_D=2$ .

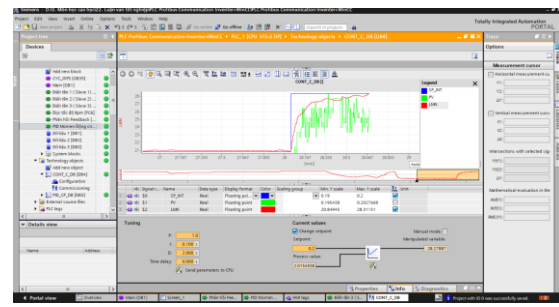
Chế độ chạy bằng tay (Hình 8): Bắt đầu bằng việc kiểm tra điều kiện "Reset" truyền thông trên ba biến tần. Tiếp theo, cài đặt thông số tần số cho từng biến tần, và để thực hiện chạy, nhấn vào nút điều hướng của biến tần tương ứng. Để dừng, chỉ cần nhấn nút dừng trên màn hình giám sát (xem chi tiết ở Hình 10).

Sau quá trình chạy thử nghiệm trên mô hình vật lý ta thu được: (Hình 11)  $SP\_INT$  là giá trị đặt moment,  $PV$  là giá trị hiện tại đo được,  $LMN$  là đường tín hiệu đầu ra điều khiển của bộ điều khiển PID dưới dạng phần trăm. Nhìn vào đường đặc tính đường  $LMN$  thể hiện được hệ thống đáp ứng nhanh và tương đối ổn định khi thay đổi giá trị  $SP\_INT$  từ 0 - 0,2 (N.m). Đường đặc tính  $PV$  cho ra giá trị dao động quanh giá trị đặt 0,2N.m dải giá trị dao động nằm trong khoảng 0,19438 - 0,2027669 nhưng dao động không đáng kể, do một số nhiễu là sai số của cảm biến và cơ cấu cơ khí. Với thông số PID:  $K_p=1,0$ ;  $K_I=0,1$ ;  $K_D=2$ .

Giá trị thu được dao động 0,01N.m tương đương 0,05% so với giá trị đặt. Như vậy có thể thấy rằng cấu trúc điều khiển đưa ra có thể đáp ứng được cho hệ thống rút sợi thép.

### 5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất cấu trúc điều khiển lực căng, và tác giả đã kiểm chứng lý thuyết thông qua việc xây dựng mô hình vật lý. Kết quả thu được hoàn toàn có thể đáp ứng cho bài toán rút sợi thép. Trong thời gian tới, tác giả sẽ tiếp tục tối ưu hóa để ứng dụng cấu trúc này trong sản xuất công nghiệp.



Hình 11. Biểu đồ PID thực tế với Moment  $SP=0,2N.m$

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Sakamoto, T., & Fujino, Y. (1995), *Modelling and analysis of a web tension control system*, In 1995 Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol.1, pp.358-362.
- [2] Phương, N. N. B., Anh, P. T. T., & Hùng, Đ. V. (2016), *Mô hình toán cho bài toán điều độ sản xuất dùng cho hệ thống đẩy/kéo và hỗn hợp*, Tạp chí Khoa học Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh - Kinh tế và Quản trị kinh doanh, Số 11 (01), tr.218-229.
- [3] Tong, T. L., Nguyen, T. T., Minh, D. D., Nguyen, D. H., & Nguyen, T. L. (2021), *Điều khiển lực căng kết hợp bù thành phần mô men quán tính bất định sử dụng neural RBF cho hệ cuộn lại nhiều phân đoạn*, Measurement, Control, and Automation, Vol.2(1).
- [4] Hiếu, P. Đ. (2022). *Điều khiển lực căng trong hệ thống vận chuyển liệu dạng băng*, NXB Bách khoa, Hà Nội.
- [5] Hoàng Công Anh (2023), *Nghiên cứu xây dựng hệ điều khiển truyền động biến tần - động cơ không đồng bộ*, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.
- [6] Nguyễn Phùng Quang (2016), *Điều khiển vector truyền động điện xoay chiều ba pha*, NXB Bách khoa, Hà Nội.
- [7] Bùi Quốc Khánh (2020), *Điều khiển truyền động điện trong công nghiệp*, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [8] Knittel, D., Laroche, E., Gigan, D., & Koç, H. (2003), *Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom*  $H/sub/splinf/in/$  controllers, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.39(1), pp.113-120.
- [9] Li, Q., Bai, J., Fan, Y., & Zhang, Z. (2016), *Study of wire tension control system based on closed loop PID control in HS-WEDM*, The International

Journal of Advanced Manufacturing Technology,  
Vol.82, pp.1089-1097.

- [10] Hiền, N. T. T. (2017). *Nghiên cứu ứng dụng phương pháp điều khiển PID thích nghi điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều có momen quán tính thay đổi*, TNU Journal of Science and Technology, Số.173(13), Tr.165-170.
- [11] Meng, F., Liu, S., & Liu, K. (2020), *Design of an optimal fractional order PID for constant tension control system*, IEEE Access, Vol.8, pp.58933-58939.

Ngày nhận bài:	09/04/2024
Ngày nhận bản sửa:	18/04/2024
Ngày duyệt đăng:	22/04/2024