

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀ MRAC CHO HỆ THỐNG WATERJET TRONG USVs CỨU HỘ

DESIGN PID AND MRAC CONTROLLER FOR WATERJET PROPULSION IN USVs RESCUE

Hồ Lê Khánh Dy¹, Nguyễn Hữu Cường Thịnh¹, Phan Hoàng Long^{1,2,3},
Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế và so sánh hai bộ điều khiển PID và MRAC điều khiển lực đẩy cho hệ thống waterjet dùng trong phương tiện cứu hộ không người lái (USVs). Hàm truyền được xác định thực nghiệm làm cơ sở thiết kế. Kết quả cho thấy PID đơn giản nhưng bị ảnh hưởng bởi nhiễu và thay đổi tham số, trong khi MRAC có khả năng thích nghi tốt hơn.

Từ khóa: PID; MRAC; Thrust controller; Waterjet propulsion.

ABSTRACT

This paper presents the design and comparison of two controllers - PID and MRAC - for thrust control in a waterjet system used in unmanned surface vehicles (USVs) for rescue missions. The system's transfer function is experimentally identified and used as the basis for controller design. Results show that while PID is simple, it is sensitive to noise and parameter variations, whereas MRAC demonstrates better adaptability.

Keywords: PID; MRAC; Thrust controller; Waterjet propulsion.

1. TỔNG QUAN

Đuối nước là một trong những nguyên nhân gây chết người hàng đầu. Theo như Tổ chức Y tế Thế giới WHO, tỉ lệ tử vong do đuối nước chiếm 7% tổng số ca tử vong trên toàn thế giới năm 2011 [1]. Tại Việt Nam, tình hình đuối nước đang ở mức báo động. Theo như thống kê của Bộ Y tế năm 2022, có gần 2000 ca tử vong

do đuối nước ở trẻ em dưới 16 tuổi [2]. Trong bối cảnh đó, việc cứu người là nhiệm vụ quan trọng và phụ thuộc rất lớn vào thời gian cứu nạn.

Các phương pháp cứu người như bơi hay dùng thuyền, thường gặp nhiều hạn chế do chậm tiếp cận nạn nhân và bị ảnh hưởng bởi thời tiết. Để khắc phục, nhiều nghiên cứu tập trung vào phát triển các thiết bị cứu người, 

trong đó có các phương tiện không người lái (USVs) được thiết kế riêng để thực hiện nhiệm vụ cứu hộ [3], [4].

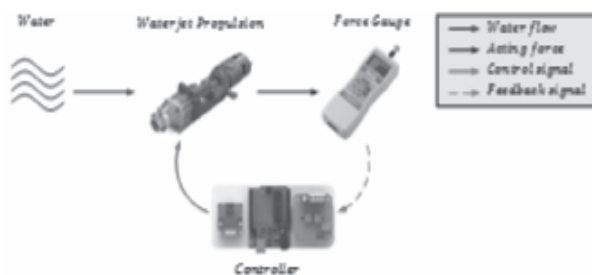
Hệ thống đẩy nước (waterjet propulsion) đã trở thành một lựa chọn lý tưởng cho các USVs cứu hộ. So với các hệ thống cánh quạt (propeller), waterjet mang lại nhiều ưu điểm nhờ vào khả năng cơ động tốt trong vùng nước nông, nhiều vật cản [5]. Điều này giúp tiếp cận nạn nhân nhanh hơn và hiệu quả trong các tình huống khẩn cấp.

Hiện nay có nhiều nghiên cứu về hệ thống waterjet, chủ yếu tập trung vào tối ưu biên dạng để tăng hiệu suất hoạt động và tối ưu thuật toán điều khiển [6], [7], [8], [9]. Tuy nhiên chưa có nhiều tài liệu nghiên cứu về điều khiển lực đẩy của hệ thống waterjet. Đây là bài toán quan trọng vì điều khiển lực đẩy có ảnh hưởng tới việc điều khiển vận tốc và hướng đi của con tàu [10].

Do đó, mục tiêu nghiên cứu của bài báo này là thiết kế bộ điều khiển lực đẩy cho hệ thống waterjet, cụ thể sẽ thiết kế và thực nghiệm bộ điều khiển PID, đồng thời sẽ kiểm chứng tính khả thi của bộ điều khiển MRAC bằng mô phỏng.

2. PHƯƠNG ÁN

1) Tổng quan về hệ thống



Hình 1. Cấu trúc mạch của hệ thống waterjet

Hình 1 mô tả tổng quan hệ thống đo lực đẩy của waterjet. Trong hệ thống này, nước được hút vào bên trong waterjet và sau đó phun ra phía sau với vận tốc cao. Phản lực từ dòng nước này tạo lực đẩy lên thân tàu, giúp tàu di chuyển về phía trước. Đồng thời, lực đẩy này tác động lên máy đo lực được đặt phía trước, cho phép đo lường chính xác lực đẩy do waterjet tạo ra.

2) Phương pháp

Nghiên cứu này sử dụng bộ PID nhằm kiểm soát lực đẩy trong quá trình vận hành. Quá trình thiết kế PID chỉ yêu cầu ba tham số cơ bản: P, I, D giúp việc thiết kế dễ dàng, tiết kiệm thời gian và nguồn lực cũng như dễ dàng áp dụng cho nhiều loại hệ thống [11].

Bộ điều khiển thích nghi theo mô hình tham chiếu (MRAC) cũng được sử dụng do phù hợp với các hệ phi tuyến nhờ khả năng điều chỉnh các tham số điều khiển để phù hợp với môi trường hoạt động theo thời gian thực [12].

Nghiên cứu này sẽ sử dụng mô hình tham chiếu được suy ra từ thực nghiệm PID thay vì tối ưu từ ban đầu nhằm giảm độ khó bài nghiên cứu, giúp đơn giản hóa quy trình thiết kế và tạo được cơ sở để so sánh công bằng giữa PID và MRAC.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

1) Bộ điều khiển PID

Để đánh giá thiết kế, lấy yêu cầu bộ điều khiển PID: $OS \leq 10\%$, $t_s \leq 5s$, và $e_{ss} \leq 5\%$. Hàm truyền của hệ thống waterjet được tìm ra bằng data thực nghiệm với input là 100PWM, output là lực đẩy và đồng thời sử dụng lệnh System Identification trong Matlab. Dưới đây là hàm truyền của hệ thống:

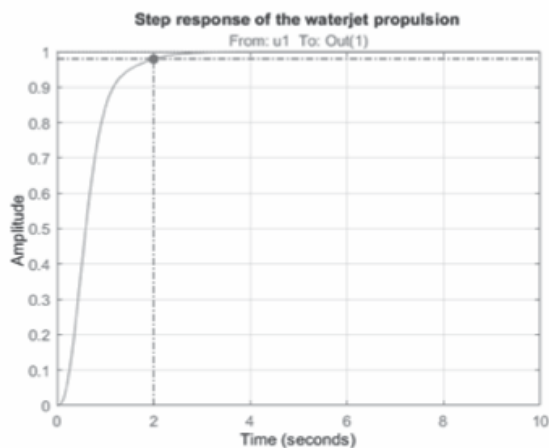
$$(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{0.0003268}{s^2 + 0.08204s + 0.003911} \quad (1)$$

Với: $Q(s)$ – Lực đẩy của waterjet; $U(s)$ – Xung (PWM) cấp vào driver.

Hệ số PID sau khi tuning, sử dụng PID tuner trong Matlab:

Bảng 1. Hệ số I

K_i	12.5
Settling time	2.01s
Overshoot	0%
Steady state error	0.001%



Hình 2. Đồ thị mô phỏng đáp ứng của bộ điều khiển

2) Bộ điều khiển MRAC

Bộ điều khiển MRAC giúp hệ waterjet bám sát đầu ra tham chiếu mong muốn trong điều kiện có nhiễu hoặc biến động tham số. Bộ MRAC lấy mô hình tham chiếu lý tưởng (Model Reference) và các luật thích nghi (Adaptive law) để điều chỉnh liên tục tham số

điều khiển, giảm thiểu sai số giữa hệ thống thực tế và mô hình tham chiếu.

* Mô hình tham chiếu (reference model)

Mô hình động lực học tham chiếu được suy ra từ (1):

$$\ddot{x}_{ref} + 0.08204\dot{x}_{ref} + 0.003911x_{ref} = 0.0003268u \quad (2)$$

Với: $\ddot{x}_{ref}$, $\dot{x}_{ref}$, và x_{ref} - Gia tốc, vận tốc, và chuyển vị của khối nước trong waterjet; m_{ref} - Hệ số quán tính tham chiếu; c_{ref} - Hệ số cản tham chiếu; k_{ref} - Hệ số độ cứng tham chiếu; và f_{ref} - Hệ số giữa tín hiệu PWM và lực đẩy.

* Mô hình thực tế (actual model)

Mô hình hệ thống thực tế có dạng động lực học:

$$(m_{ref} + rdm)\ddot{x} + (c_{ref} + rdm)\dot{x} + (k_{ref} + rdm)x = u \quad (3)$$

Với: $\ddot{x}$ - Gia tốc của lực đẩy thực tế; $\dot{x}$ - Vận tốc của lực đẩy thực tế; x - Lực đẩy thực tế; rdm - Biến số ngẫu nhiên (-1, +1).

Sai số giữa hệ thống thực tế và mô hình tham chiếu:

$$e = x - x_{ref} \quad (4)$$

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_{ref} \quad (5)$$

Với: e , $\dot{e}$ - Sai số và đạo hàm sai số.



* Bề mặt trượt

Bề mặt trượt được định nghĩa:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (6)$$

* Luật điều khiển

Luật điều khiển MRAC được thiết kế để giảm thiểu sai số e và bề mặt trượt s , đảm bảo đầu ra hệ thống thực tế bám theo mô hình tham chiếu:

$$\hat{m} = -\gamma_m s \ddot{x}_{ref} \quad (7)$$

$$\hat{c} = -\gamma_c s \dot{x}_{ref} \quad (8)$$

$$\hat{k} = -\gamma_k s x_{ref} \quad (9)$$

Với: $\hat{m}$ – Ước lượng khối lượng quán tính; $\hat{c}$ – Lực cản ước lượng; $\hat{k}$ – Độ cứng ước lượng; và $\gamma_m, \gamma_c, \gamma_k$ – Các hệ số tương ứng với m, c , và k .

* Phương trình tín hiệu điều khiển

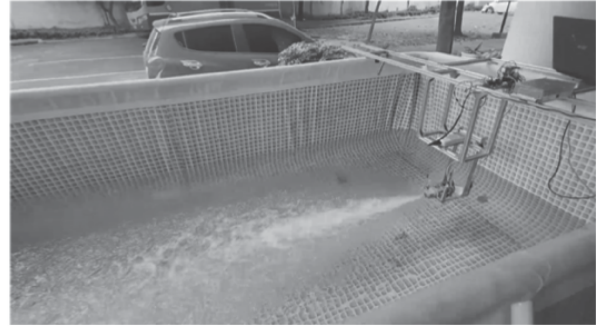
$$u(t) = \hat{m}[\ddot{x}_{ref}(t) - 2\lambda\dot{e}(t) - \lambda^2 e(t)] \quad (10)$$

$$s + \hat{c}\dot{x}_{ref}(t) + \hat{k}x_{ref}(t) \quad (11)$$

4. KẾT QUẢ

1) Thực nghiệm bộ điều khiển PID

Thực nghiệm bộ điều khiển PID được thực hiện ở trên hồ bơi di động với kích thước $4 \times 2 \times 1$ (m).

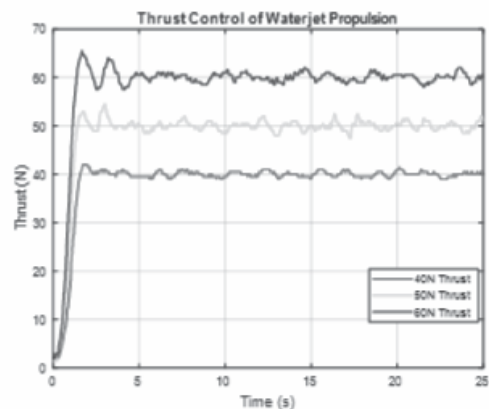


Hình 3. Thực nghiệm đo lực đẩy của hệ thống waterjet

Waterjet được sử dụng đường kính đầu phun (Nozzle) 30mm, động cơ DC 775 công suất 0.15kW, tốc độ định danh 12000RPM. Động cơ đạt gần tốc độ định danh và lực đẩy tối đa xấp xỉ 78N. Do đó, nghiên cứu này sẽ thực nghiệm với ba mức lực 40N, 50N và 60N, mỗi mức 25s, nghỉ 5' để mặt nước ổn định trước khi tiếp tục. Bảng 2 và Hình 4 mô tả mối quan hệ giữa lực đẩy và thời gian trong thực nghiệm.

Bảng 2. Đáp ứng hệ thống PID cho các mức lực đẩy khác nhau

	40N	50N	60N
Settling time, s	1.46	3.11	3.46
Overshoot, %	5	9	9.17
Steady-State Error, %	0.1	2	0.83

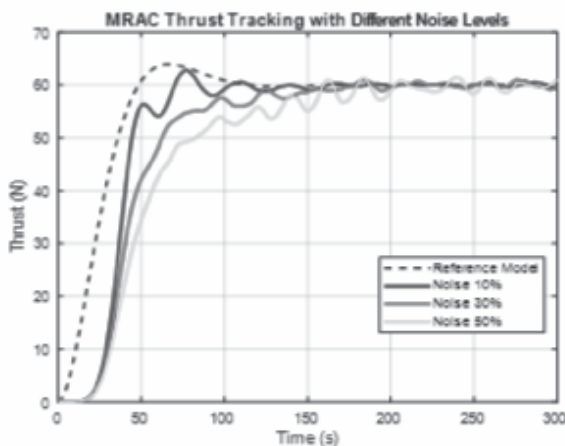


Hình 4. Đồ thị PID giữa lực đẩy và thời gian

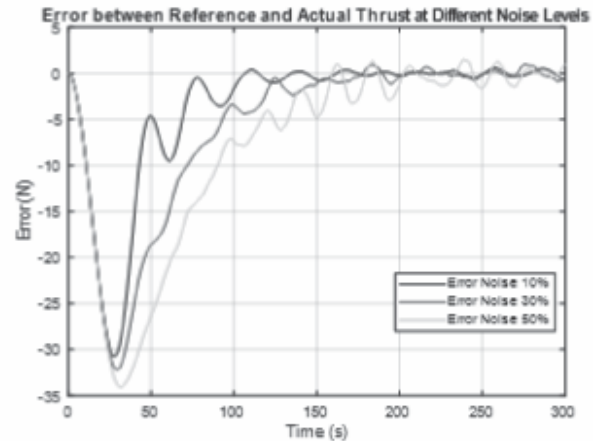
Bộ PID chỉ sử dụng hệ số K_I để hạn chế vọt lố trong lý thuyết nhưng thực nghiệm vẫn ghi nhận vọt lố ở mức từ 8.75% đến 9.17% do có sóng dội lại, tác động vào máy đo lực. Dù vậy, PID vẫn đáp ứng tốt các mục tiêu thiết kế, với thời gian ổn định dưới 5s, độ vọt lố dưới 10%, và sai số trạng thái ổn định nhỏ hơn 5%.

2) Mô phỏng bộ điều khiển MRAC

Tuy PID hiệu quả trong điều kiện môi trường ổn định nhưng hạn chế khi động học hệ thống hoặc điều kiện môi trường thay đổi. Do đó, phương pháp điều khiển MRAC được đề xuất nhờ khả năng tự điều chỉnh tham số để bám sát tham chiếu và thích nghi tốt hơn trong các điều kiện thay đổi. Bảng 3 mô tả đáp ứng và đồ thị mô phỏng của MRAC với mức lực 60N và được mô phỏng với 3 mức nhiễu: 10%, 30%, 50%.



Hình 5. Đồ thị MRAC giữa lực đẩy và thời gian với mức nhiễu 10%, 30%, 50%



Hình 6. Đồ thị sai số của lực đẩy giữa mô hình tham chiếu và mô hình thực tế

Bảng 3. Đáp ứng hệ thống MRAC cho các mức lực đẩy khác nhau

Noise	10%	30%	50%
Settling time, s	125.62	150.44	270.92
Overshoot, %	4.68	1.64	2.46
Steady-State Error, %	1.2	0.83	1.59

MRAC bám sát tham chiếu (Model Reference) rất tốt, với sai số ổn định xấp xỉ 1.6% và độ vọt lố nhỏ, dao động từ 1.64% đến 4.68% so với PID ở các trường hợp nhiễu 10%, 30% và 50%. Tuy nhiên, thời gian ổn định của MRAC lại rất lâu (~270s) so với PID (1-3s), điều này cho thấy mô hình tham chiếu được thiết kế chưa phù hợp. Các tham số m_{ref} , c_{ref} , k_{ref} khiến tín hiệu tham chiếu đáp ứng chậm, ảnh hưởng tới hệ thống. Do đó cần phải tối ưu mô hình tham chiếu để tối ưu hóa việc thích nghi theo mức lực đẩy để rút ngắn thời gian đáp ứng và nâng cao hiệu suất toàn hệ thống.

5. KẾT LUẬN

Bài nghiên cứu này đề xuất phương pháp sử dụng bộ PID để điều khiển lực đẩy cho

hệ waterjet, đồng thời kiểm chứng bộ MRAC qua mô phỏng.

Bộ điều khiển PID đạt được các mục tiêu đã đề ra nhưng bị nhiễu do sóng va vào thành bể và dội lại trong lúc thực nghiệm. Vì vậy, cần sử dụng bể bơi triệt sóng để giảm nhiễu.

Bộ điều khiển MRAC cho thấy khả năng bám mô hình tham chiếu tốt với các sai số thấp. Tuy nhiên, thời gian xác lập rất lâu do chưa tối ưu được mô hình tham chiếu. Vì vậy, nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung tối ưu mô hình tham chiếu và thực nghiệm bộ MRAC để đánh giá hiệu quả thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **08/7/2025**

Ngày phản biện: **23/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. World Health Organization: WHO, “Drowning”, Accessed: Nov. 07, 2024. [Online] Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drowning>
- [2]. Bộ Y tế - Phòng chống tai nạn thương tích, “Đuối nước khiến gần 2.000 trẻ em Việt Nam dưới 16 tuổi tử vong mỗi năm”. Accessed: Nov. 07, 2024. [Online] Available: https://moh.gov.vn/web/phong-chong-tai-nan-thuong-tich/tin-noi-bat/-/asset_publisher/iinMRn208ZoI/content/-uoi-nuoc-khien-gan-2-000-tre-em-viet-nam-duoi-16-tuoi-tu-vong-moi-nam?inheritRedirect=false
- [3]. C. Seguin, G. Blaquière, A. Loundou, P. Michelet, and T. Markarian, “Unmanned aerial vehicles (drones) to prevent drowning”. *Resuscitation*, vol. 127, pp. 63-67, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.resuscitation.2018.04.005.
- [4]. D. Yang, Y. Cao, Y. Feng, X. Lai, and Z. Pan, “Drowning Detection Algorithm for Intelligent Lifebuoy”. In: *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems, ICUS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 512-519. doi: 10.1109/ICUS52573.2021.9641291.
- [5]. K. Alexander, “Waterjet versus Propeller Engine Matching Characteristics”. *Naval Engineers Journal*, vol. 107, no. 3, pp. 129-139, 1995, doi: 10.1111/j.1559-3584.1995.tb03041.x.
- [6]. Y. sheng Yang, Y. chun Xie, and S. lin Nie, “Nozzle optimization for water jet propulsion with a positive displacement pump”. *China Ocean Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 409-419, 2014, doi: 10.1007/s13344-014-0033-4.
- [7]. W. Jiao, L. Cheng, D. Zhang, B. Zhang, Y. Su, and C. Wang, “Optimal Design of Inlet Passage for Waterjet Propulsion System Based on Flow and Geometric Parameters”. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/2320981.
- [8]. C. Wang et al., “Numerical simulation on hydraulic characteristics of nozzle in waterjet propulsion system”. *Processes*, vol. 7, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.3390/PR7120915.
- [9]. E.K. Loghis and N. I. Xiros, “Development of Discrete-Time Waterjet Control Systems Used in Surface Vehicle Thrust Vectoring”. *J Mar Sci Eng*, vol. 10, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/jmse10121844.
- [10]. “Numerical analysis of a waterjet propulsion system”, 2006, doi: 10.6100/IR614907.
- [11]. R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, “A review of PID control, tuning methods and applications”. *Int J Dyn Control*, vol. 9, no. 2, pp. 818-827, Jun. 2021, doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.
- [12]. J. Chen, J. Wang, and W. Wang, “Robust adaptive control for nonlinear aircraft system with uncertainties”. *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/app10124270.