

DOI: 10.70993/TCDN.2026.3(27).66-74

PHÁT TRIỂN THUẬT TOÁN CẬN TỐI ƯU XÁC ĐỊNH THAM SỐ CHO CÁC BỘ ĐIỀU KHIỂN TRONG HỆ THỐNG ĐIỀU CHỈNH TỰ ĐỘNG

Hoàng Văn Va¹, Trần Đức Vinh², Trần Thiện Phước³

Ngày nhận bài: 19/01/2026; Gửi phản biện: 25/02/2026; Duyệt đăng: 05/04/2026

Tóm tắt: Trong thực tế, có nhiều thuật toán dùng để tính toán tham số của các bộ điều khiển truyền thống với các hệ tuyến tính và chỉ áp dụng cho mỗi loại đối tượng khác nhau hoặc với một vài bộ điều khiển, có chất lượng điều khiển khác nhau. Điều này gây khó khăn cho người học, nghiên cứu và ứng dụng trong thực tế. Tuy nhiên, tác giả đã phát triển thành công một trong những thuật toán có thể tính toán toàn bộ các tham số cho các bộ điều khiển truyền thống như: Bộ điều khiển P, PI, PID, PIDĐ, PD, PDD là ứng dụng tiêu chuẩn bình phương nhỏ nhất trong phương pháp cận tối ưu không tìm kiếm “BPM-xấp xỉ”. Nhưng để áp dụng thuật toán này trong thực tế chúng ta cần xác định được tham số thời gian hiệu chỉnh T_c , vùng tần số tính toán $\Delta\Omega = [\omega_1; \omega_2]$ để đạt chất lượng của hệ thống theo mong muốn và các nghiên cứu trước đây chỉ mới dừng lại ở việc tính toán cho các đối tượng có trễ (đối tượng nhiệt,...). Bước phát triển thuật toán này áp dụng tính toán các tham số cho các bộ điều khiển trong hệ thống với các đối tượng không có trễ. Đây là một kết quả có ý nghĩa rất lớn để xây dựng thuật toán này thành thuật toán xác định tham số của các bộ điều khiển áp dụng cho mọi đối tượng. Trong bài báo này, tác giả sẽ trình bày chi tiết việc ứng dụng thuật toán này đối với các bộ điều khiển khác nhau cho các kênh điều khiển đầu vào và nhiều tác động của hệ kín SISO với đối tượng không có trễ.

Từ khóa: Bộ điều khiển P, PI, PID, PD, PIDĐ, PDD; đối tượng điều khiển; hệ thống điều chỉnh tự động; tiêu chuẩn bình phương nhỏ nhất; tự động hiệu chỉnh.

Abstract: In practice, various algorithms are utilized to calculate parameters for traditional controllers in linear systems. However, these are often restricted to specific object types or limited controller configurations, resulting in varying control performance. This poses significant challenges for students, researchers, and practitioners alike. Addressing this, the author has successfully developed a unified algorithm capable of determining all parameters for conventional controllers, including P, PI, PID, PIDĐ, PD, and PDD. This approach employs the least squares criterion within a non-searching sub-optimal method known as “LSC-approximation”. To implement this algorithm in practical scenarios, it is essential to define the tuning time T_c and the calculated frequency range ($\Delta\Omega = [\omega_1; \omega_2]$) to achieve the desired system performance. Previous studies have primarily focused on systems with time delay (e.g., thermal objects). This current advancement extends the algorithm to calculate parameters for the aforementioned controllers in systems with delay-free objects (objects without delay). This represents a significant milestone in evolving the method into a universal parameter determination algorithm applicable to all object types. In this paper, the author presents a detailed application of this algorithm across various controllers for both input channels and disturbance rejection within SISO closed-loop systems involving objects without delay.

Keywords: controller P, PI, PID, PD, PIDĐ, PDD; object, automatic control system; least squares criterion; auto-tuning.

¹ Công ty Cổ phần WINTEK; Email: hoangvatdh@gmail.com

^{2,3} Trường Đại học Đại Nam; Email: vinhthd@dainam.edu.vn; phuocctt@dainam.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Trong lĩnh vực điều khiển tự động, nghiên cứu và phát triển một thuật toán tối ưu, nhằm giúp việc xác định các tham số của bộ điều khiển một cách thuận tiện đối với mọi đối tượng điều khiển luôn được các nhà nghiên cứu quan tâm và đặt lên hàng đầu. Từ đó giúp cho người dùng tối ưu về thời gian và chi phí trong việc tính toán và lựa chọn tham số cho các bộ điều khiển của từng hệ thống. Ngày nay, việc áp dụng tiêu chuẩn tích phân tuyến tính I1 không thể đạt được chất lượng điều khiển tốt bằng tiêu chuẩn bình phương nhỏ nhất I2. Nhưng việc áp dụng tiêu chuẩn I2 gặp nhiều khó khăn trong việc xác định điểm lặp lại tối ưu. Tuy nhiên, tại các kết quả nghiên cứu (Пикина & Мещерякова, 2012: 6; Пикина & Бурцева, 2014: 4; Бурцева, 2014: 156; Бурцева & Пикина, 2016: 32; Хоанг, и соавторы, 2017: 3; Кузищин, и соавторы, 2017: 4; Kuzishchin, et al., 2017a: 4; Kuzishchin, et al., 2017b: 5; Аракелян & Пикина, 2024: 408) đã giải quyết được vấn đề này khi ứng dụng phép xấp xỉ bình phương nhỏ nhất của đáp ứng tần số phức tạp của bộ điều khiển điển hình P, PI, PID, PD, PDD với đáp ứng tần số phức tạp của bộ điều khiển tối ưu tuyến tính. Hàm truyền của các bộ điều khiển tối ưu này được xác định bởi hàm truyền tối ưu của hệ thống vòng kín với đối tượng điều khiển có dạng liên kết khâu quán tính bậc nhất, bậc 2, bậc 3 và liên kết với khâu trễ, hàm truyền đạt của đối tượng này có dạng:

$$W_o(p) = \tilde{W}_o(p) e^{-p\tau} = \frac{K_o}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1)} e^{-p\tau}, \quad (1)$$

Hoặc đối tượng có dạng hàm truyền giữa khâu tích phân và khâu quán tính bậc nhất [8] và liên kết với khâu trễ, hàm truyền đạt của các đối tượng này có dạng:

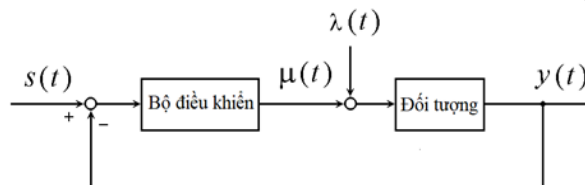
$$W_o(p) = \tilde{W}_o(p) e^{-p\tau} = \frac{K_o}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1) T p} e^{-p\tau}, \quad (2)$$

Việc áp dụng phương pháp này cần phải xác định 02 tham số quan trọng để điều chỉnh chất lượng của hệ thống điều khiển theo mục tiêu mong muốn là thời gian hiệu chỉnh T_c và vùng tần số tính toán $\Delta\Omega = [\Omega_1; \Omega_2]$, ở đây $\Omega = \omega \cdot T_{ob}$ (Хоанг В.В., Кузищин В.Ф., Мерзликина Е.И., 2017:03; Кузищин В.Ф., Мерзликина Е.И., Хоанг Ван Ва, 2017:04; V.F. Kuzishchin, E.I. Merzlikina, Hoang Van Va, 2017:04; V. F. Kuzishchin, E. I. Merzlikina and Hoang Van Va, 2017:05) nhằm đạt được chất lượng hệ thống theo yêu cầu. Tác giả gọi đây là phương pháp “BPM-xấp xỉ”.

Với mục tiêu tạo ra một công cụ tính toán tham số cho các bộ điều khiển P, PI, PID, PIDD, PD, PDD với mọi đối tượng điển hình trong các hệ thống điều khiển. Tác giả nghiên cứu phát triển thuật toán này, áp dụng thêm cho các đối tượng không có khâu trễ.

Trong bài viết này, tác giả xem xét hệ kín điều chỉnh tự động như hình 1, mô hình đối tượng điều khiển có dạng (3).

Hình 1. Mô hình hệ kín điều chỉnh tự động



Hàm truyền của các đối tượng điều khiển đang xét được biểu diễn dưới dạng sau:

$$W_o(p) = \frac{K_o}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1)} e^{-p\tau}, \quad (3)$$

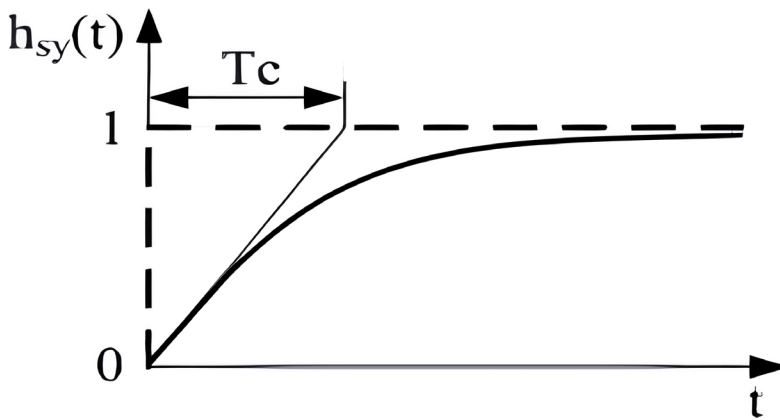
Để đánh giá chất lượng của hệ thống, chúng ta sẽ xem xét hai đối tượng dạng (1). Xem xét cả hai nguyên tắc điều khiển: sai lệch đầu vào $s(t)$ và nhiễu loạn $\Lambda(t)$. Trong bài viết này, tác giả tập trung xác định tham số cho các bộ điều khiển cận tối ưu theo kênh điều khiển sai lệch đầu vào $s(t)$.

2. Kết quả nghiên cứu

2.1. Xác định bộ điều khiển cận tối ưu cho hệ thống

Nếu tác động vào đầu vào của bộ điều khiển ở hệ thống như Hình 1 một tác động, thì giá trị tối ưu của tiêu chuẩn bình phương nhỏ nhất I_2 sẽ đạt được tức thì tại điểm ban đầu 0 và đáp ứng tức thời của hệ thống lý tưởng có dạng như hình 1 sẽ là đường nét đứt ở hình 2 với . Tuy nhiên, trong thực tế điều đó là không thể, vì còn phụ thuộc vào hệ thống cơ khí, ma sát, tác động của yếu tố môi trường,... do đó, đáp ứng của hệ thống ở kênh này phải có dạng như ở đường nét liền ở Hình 2.

Hình 2. Đặc tính của hệ thống cận tối ưu đối với thay đổi đầu vào



Hàm truyền của hệ thống cận tối ưu lúc này sẽ có dạng:

$$W_{sy}^{\text{subopt}}(p) = \frac{W_p^{\text{subopt}}(p) \cdot W_o(p)}{1 + W_p^{\text{subopt}}(p) \cdot W_o(p)} = \frac{1}{T_c \cdot s + 1}, \quad (4)$$

Từ đó ta có được hàm truyền đạt cận tối ưu của bộ điều khiển có dạng:

$$W_p^{\text{subopt}}(p) = \frac{1}{W_o(p) \cdot T_c \cdot s}, \quad (5)$$

2.2. Phát triển công thức tính toán tham số Bộ điều khiển

Để tính toán tham số hiệu chỉnh, nhóm tác giả đã đưa ra được bộ công thức để tính toán và ứng dụng cho các phần mềm tính toán như: Matlab, mathcad, hoặc các ngôn ngữ lập trình khác trong các bộ điều khiển công nghiệp. Điều này đã giải quyết được hạn chế trong việc sử dụng hàm Minerr (hàm giảm thiểu sai số nhỏ nhất) (Пикина & Мещерякова, 2012: 06; Бурцева, 2014: 156; Пикина & Бурцева, 2014: 4; Бурцева & Пикина, 2016: 32) khi ứng dụng trong các bộ điều khiển. Các công thức được thể hiện trong (6-10).

$$c_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N \operatorname{Re}(W_{sub}(\omega_m)), \quad (6)$$

$$c_{21} = \frac{\omega_2^3 - \omega_1^3}{3}, \quad (7)$$

$$c_{24} = \frac{1}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_2}, \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{c_{21} \cdot c_{22} - (\omega_2 - \omega_1) \cdot c_{23}}{(\omega_2 - \omega_1)^2 - c_{21} \cdot c_{24}}, \quad (9)$$

$$c_3 = \left(\frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \right) \cdot (c_{22} + c_2 \cdot c_{24}), \quad (10)$$

Trong đó, $c_{22} = \Delta\omega \cdot \sum_{m=1}^N \frac{\operatorname{Im}(W_{sub}(\omega_m))}{\omega_m}$; $c_{23} = \Delta\omega \cdot \sum_{m=1}^N \omega_m \cdot \operatorname{Im}(W_{sub}(\omega_m))$; $N = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta\omega}$

Trong các công thức đã cho, ω_1 và ω_2 lần lượt là điểm bắt đầu và kết thúc của dải tần số xấp xỉ. Công thức (6-10) được sử dụng để tính toán các tham số của thuật toán điều khiển tuyến tính điển hình. Ở bài viết này, nhóm tác giả xem xét việc tính toán các tham số của các bộ điều khiển PI và PID.

Đối với bộ điều khiển P có hàm truyền:

$$W_p(s) = K_p \quad (11)$$

Các tham số của bộ điều khiển P được tính theo:

$$K_p = c_1; \quad (12)$$

Đối với bộ điều khiển PI có hàm truyền:

$$W_{pi}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right), \quad (13)$$

Các tham số của bộ điều khiển PI được tính theo:

$$K_p = c_1; \quad T_i = \frac{c_1}{c_2} \quad (14)$$

Đối với bộ điều khiển PID có hàm truyền:

$$W_{pid}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right), \quad (15)$$

Các tham số của bộ điều khiển PID được tính theo:

$$K_p = c_1; \quad T_i = \frac{c_1}{c_2}; \quad T_d = \frac{c_3}{c_1}. \quad (16)$$

Đối với bộ điều khiển PD có hàm truyền:

$$W_{pd}(s) = K_p \cdot (1 + T_d \cdot s), \quad (17)$$

Các tham số của bộ điều khiển PD được tính theo:

$$K_p = c_1; T_d = \frac{c_3}{c_1}. \quad (18)$$

Đối với bộ điều khiển PDD có hàm truyền:

$$W_{pdd}(s) = K_p \cdot (1 + T_d \cdot s + T_d \cdot s), \quad (19)$$

Các tham số của bộ điều khiển PDD được tính theo:

$$K_p = c_1; T_d = \frac{c_3}{c_1}. \quad (20)$$

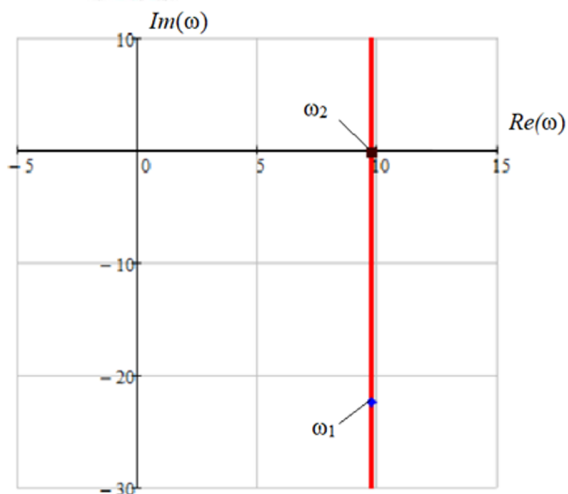
2.3. Xem xét chất lượng hệ thống

Để đánh giá chất lượng của hệ thống, xem xét sự hoạt động của các bộ điều khiển, nhóm tác giả nghiên cứu đối với hệ thống ở Hình 1 với mô hình của đối tượng có dạng bậc 2 của (3), với các tham số như sau: $K = 1$; $T_1 = 65.53$ (s); $T_2 = 31.11$ (s)

$$W_{ob1}(s) = \frac{K_{ob}}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)}, \quad (21)$$

Và với bộ điều khiển cận tối ưu có dạng (5), bằng phương pháp “BPM-xấp xỉ” với sự hiệu chỉnh tham số làm mềm T_c theo chất lượng điều khiển mong muốn, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đặt mục tiêu chất lượng hệ thống phải đạt được là đặc tính quá độ của hệ thống theo kênh điều khiển đầu vào phải đạt được độ lớt vô không quá 5%, nhằm mục đích cho thấy sự linh hoạt khi điều chỉnh tham số T_c trong quá trình hiệu chỉnh phù hợp với mục tiêu điều khiển. Chọn vùng tần số tính toán $\Delta\Omega$ được hiển thị trong Hình 3: $\Delta\Omega = [0.0043 \div 0.021]$.

Hình 3. Vùng tần số lựa chọn để tính toán

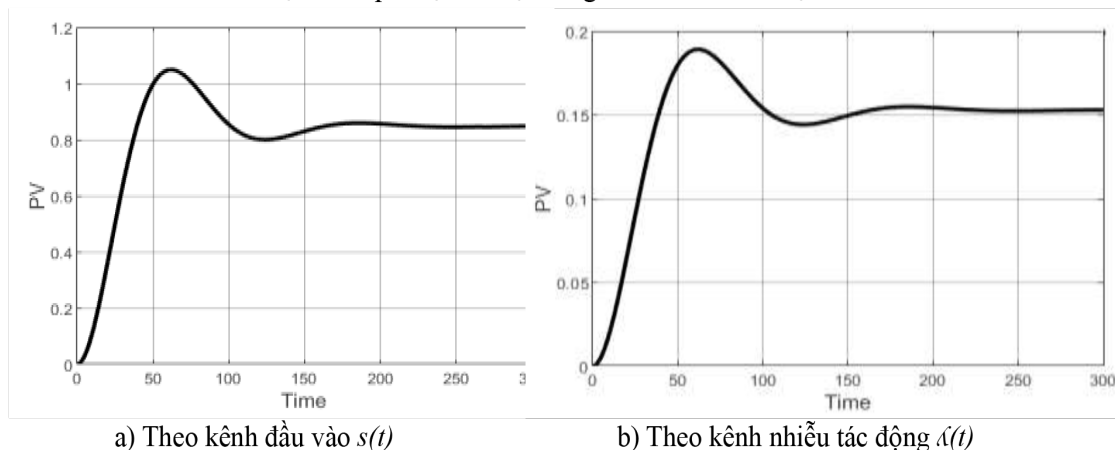


Như vậy, chúng ta xác định được tham số của các bộ điều khiển, tương ứng với tham số T_c cho các bộ điều khiển và chất lượng thống như sau:

- Với hệ thống bộ điều khiển P ta được:

Với sự giúp đỡ của thuật toán không tìm kiếm, có thể dễ dàng xác định được tham số của Bộ điều khiển P với tham số $K_p = 5.5$ với $T_c = 17.6$ (s). Từ đó, nhóm tác giả xác định được đặc tính của hệ thống điều chỉnh và chất lượng của hệ thống như Hình 4.

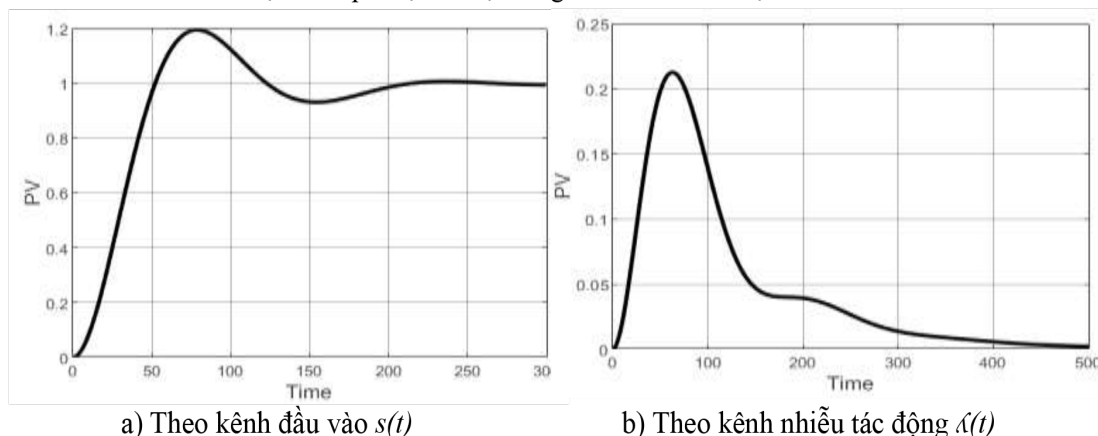
Hình 4. Đặc tính quá độ của hệ thống điều chỉnh với Bộ điều khiển P



- Với hệ thống bộ điều khiển PI ta được:

Với sự giúp đỡ của thuật toán không tìm kiếm, có thể dễ dàng xác định được tham số của Bộ điều khiển PI với tham số $K_p = 3.91$, $T_i = 95.72$ (s) với $T_c = 25$ (s). Từ đó, nhóm tác giả xác định được đặc tính của hệ thống điều chỉnh và chất lượng của hệ thống như Hình 5.

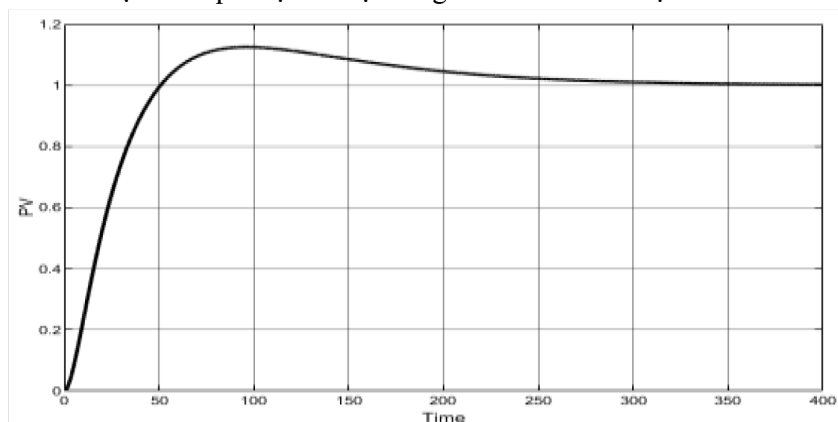
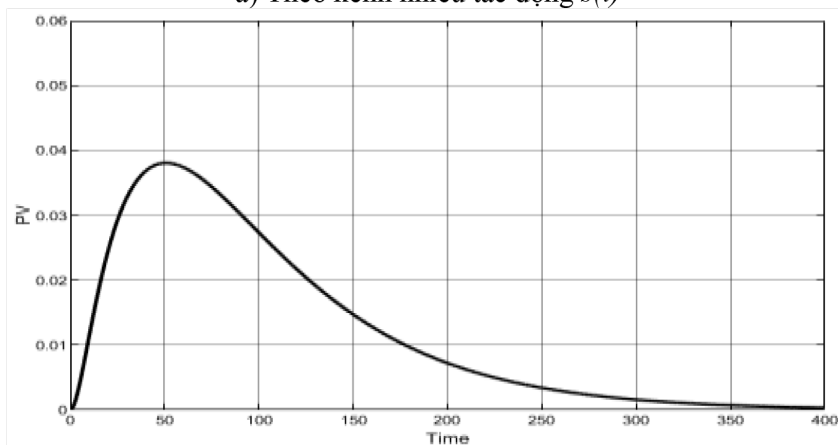
Hình 5. Đặc tính quá độ của hệ thống điều chỉnh với Bộ điều khiển PI



- Với hệ thống bộ điều khiển PID ta được:

Với sự giúp đỡ của thuật toán không tìm kiếm, có thể dễ dàng xác định được tham số của Bộ điều khiển PI với tham số $K_p = 19.53$, $T_i = 97.16$ (s), $T_d = 21.78$ (s) với $T_c = 5$ (s). Từ đó, nhóm tác giả xác định được đặc tính của hệ thống điều chỉnh và chất lượng của hệ thống như Hình 6.

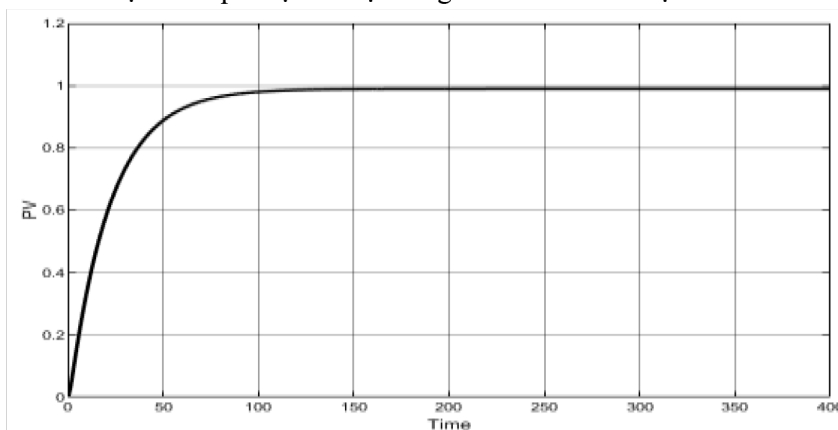
Hình 6. Đặc tính quá độ của hệ thống điều chỉnh với Bộ điều khiển PID

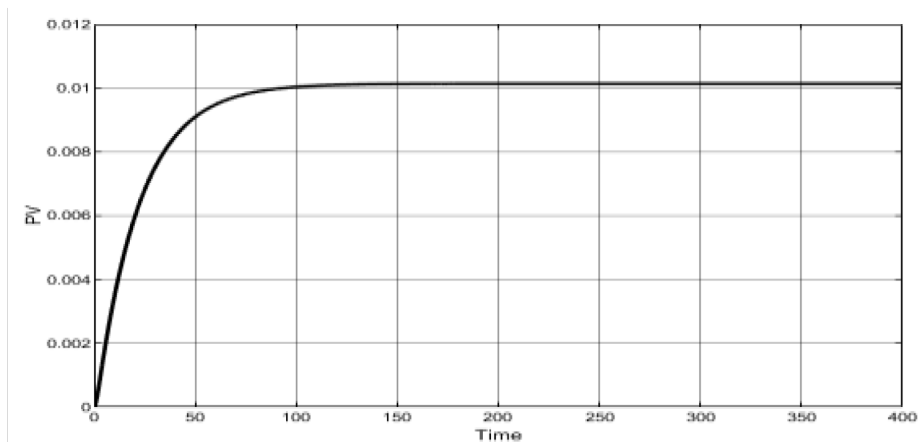
a) Theo kênh nhiễu tác động $s(t)$ b) Theo kênh nhiễu tác động $\delta(t)$

- Với hệ thống bộ điều khiển PD ta được:

Với sự giúp đỡ của thuật toán không tìm kiếm, có thể dễ dàng xác định được tham số của Bộ điều khiển PI với tham số $K_p = 97.64$, $T_d = 21.78$ (s) với $T_c = 1$ (s). Từ đó, nhóm tác giả xác định được đặc tính của hệ thống điều chỉnh và chất lượng của hệ thống như Hình 7.

Hình 7. Đặc tính quá độ của hệ thống điều chỉnh với Bộ điều khiển PD

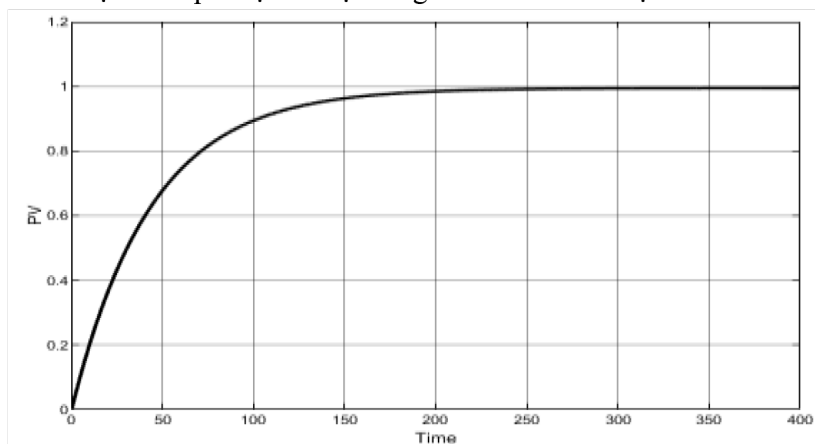
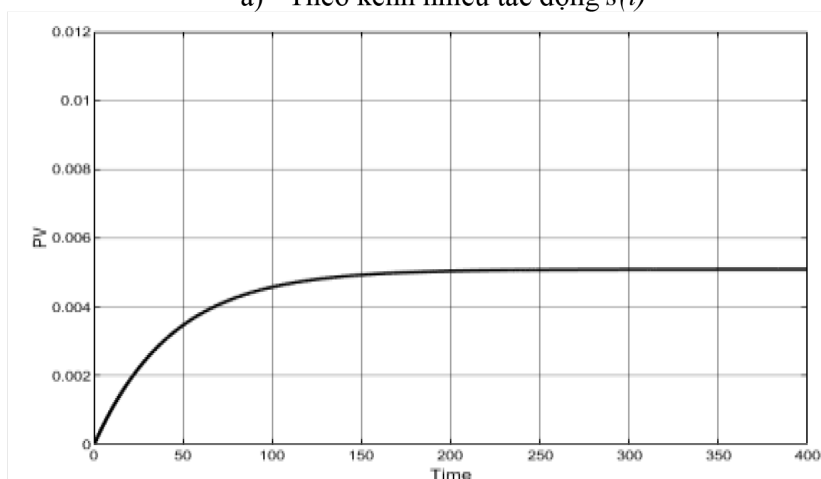
a) Theo kênh nhiễu tác động $s(t)$

b) Theo kênh nhiễu tác động $\lambda(t)$

- Với hệ thống bộ điều khiển PDD ta được:

Với sự giúp đỡ của thuật toán không tìm kiếm, có thể dễ dàng xác định được tham số của Bộ điều khiển PI với tham số $K_p = 3.91$, $T_d = 95.72$ (s), $T_i = 95.72$ (s) với $T_c = 25$ (s). Từ đó, nhóm tác giả xác định được đặc tính của hệ thống điều chỉnh và chất lượng của hệ thống như Hình 8.

Hình 8. Đặc tính quá độ của hệ thống điều chỉnh với Bộ điều khiển PDD

a) Theo kênh nhiễu tác động $s(t)$ b) Theo kênh nhiễu tác động $\lambda(t)$

Như vậy, bằng phương pháp “BPM-xấp xỉ”, chúng ta dễ dàng xác định được các tham số của các bộ điều trong hệ thống điều chỉnh tự động.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp “BPM-xấp xỉ” cho phép xác định được các tham số của các bộ điều khiển không chỉ trong hệ thống tự động điều chỉnh với đối tượng có mô hình toán học dạng hàm truyền đạt có khâu trễ, mà còn áp dụng được cho các mô hình của đối tượng không có khâu trễ.

Kết quả cho thấy phương pháp này có thể được áp dụng để xác định các tham số của các bộ điều khiển P, PI, PID, PD, PDD, PIDD cho mọi đối tượng.

Phương pháp này được phát triển và dễ dàng áp dụng trong phần mềm Matlab/Simulink, các dòng PLC công nghiệp. Giúp sinh viên, nhà nghiên cứu và người sử dụng có thể dễ dàng sử dụng và tính toán tham số của các bộ điều khiển.

Tác giả phát triển phương pháp này theo dạng hàm toán học từ (1) đến (20), giúp người dùng dễ dàng sử dụng và lập trình trong các bộ điều khiển công nghiệp như PLC.

Phương pháp này sẽ ứng dụng tốt trong học phần Cơ sở điều khiển tự động và Điều khiển tự động nâng cao. Giúp sinh viên và giảng viên dễ dàng nghiên cứu, xác định tham số của các bộ điều khiển với mọi đối tượng điều khiển.

Ngoài ra, tùy theo yêu cầu về chất lượng hệ thống. Việc sử dụng phương pháp này cho phép người dùng dễ dàng thay đổi chất lượng hệ thống theo yêu cầu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Бурцева Ю. С. (2014). Беспоисковый метод расчета настроек регуляторов на минимум квадратичного критерия. Диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук. М.: МЭИ(ТУ). Стр. 156.
2. Пикина Г.А., Мещерякова Ю.С. (2012). “Беспоисковый метод расчета настроек ПИД-регуляторов на минимум квадратичного критерия”. Теплоэнергетика. №10. С. 58-64.
3. Пикина Г.А., Бурцева Ю.С. (2016). “Беспоисковая настройка линейных регуляторов на минимум квадратичного критерия”. Теплоэнергетика. №3. С. 23-27.
4. Бурцева Ю.С., Пикина Г.А. (2016). Универсальный метод настройки линейных регуляторов. М.: Издательство МЭИ, 32 с.
5. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. (2003). Оптимизация и оптимальное управление. М.: Издательство МЭИ, 2003.
6. Хоанг В.В., Кузищин В.Ф., Мерзликina Е.И. (2017). “Настройка АСР с ПИ-регулятором и интегрирующим объектом путём МНК-приближения к субоптимальному регулятору”. Материалы докладов XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». г. Том 2., г. Казань. Стр. 315-318.
7. Кузищин В.Ф., Мерзликina Е.И., Хоанг Ван Ва. (2017). “Применение метода настройки с приближением к субоптимальному регулятору для объектов третьего порядка”. XXX Международная научная конференция. Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 30. Сборник трудов том 7. Стр. 3-7.
8. V.F. Kuzishchin, E.I. Merzlikina, Hoang Van Va. (2017). “PD and PDD algorithms with integrating object: Tuning on the basis of approach to suboptimal algorithm”. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076155. Pages 1-5.
9. V. F. Kuzishchin, E. I. Merzlikina and Hoang Van Va. (2017). “Application of the tuning algorithm with the least squares approximation to the suboptimal control algorithm for integrating objects”. The International Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering" (PTPPE-2017). Moscow, Russian Federation. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012281. Pages 1-6.