

**NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN LƯỢNG NHIÊN LIỆU CUNG CẤP CHO
ĐỘNG CƠ XĂNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BÁM TỐI ƯU
TÍCH PHÂN LQIT TỰ CHỈNH THEO MÔ MEN**
A STUDY OF CONTROL OF FUEL CONTROL SUPPLY FOR GASOLINE
ENGINE WITH CONTROL METHOD LINEAR QUADRATIC INTEGRAL
TRACKING LQIT SELF TUNING TRACK BY TORQUE

ĐÀO QUANG KHANH¹, LƯU KIM THÀNH², TRẦN ANH DŨNG²

¹NCS Ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Điện, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: dqk21011981@gmail.com

Tóm tắt

Bài báo này mô tả phương pháp điều khiển bám tối ưu tích phân LQIT tự chỉnh bằng phương pháp nhận dạng tham số và mô hình hàm truyền hoặc mô hình trạng thái của một hệ mô hình toán phi tuyến đã biết là động cơ đốt trong bằng công cụ System Identification Toolbox. Từ tham số và mô hình nhận dạng được ta có thể xây dựng một mô hình trên máy tính nhằm phản ánh hệ thống thực từ đó tính toán trực tuyến bộ điều khiển LQIT. Việc xây dựng các bộ điều khiển có thể tiến hành nhanh chóng trên mô hình hàm truyền đạt hoặc mô hình trạng thái, giúp giảm thời gian, chi phí thiết kế và tránh hư hại đến thiết bị thực. Nghiên cứu sử dụng phần mềm Matlab/Simulink để tiến hành thu thập dữ liệu, nhận dạng và mô phỏng hệ thống. Kết quả tính toán bộ điều khiển bám tối ưu LQIT được trực tiếp điều khiển lượng nhiên liệu cung cấp theo mô men đặt đầu ra mô hình phi tuyến là động cơ đốt trong. Kết quả mô phỏng cho thấy lượng nhiên liệu đã giảm hơn so với phương pháp điều khiển kinh điển PID.

Từ khóa: Công cụ nhận dạng hệ thống, động cơ đốt trong, điều khiển bám tối ưu toàn phương tích phân, tự điều chỉnh, điều khiển tối ưu.

Abstract

This paper, the optimal method of Linear quadratic integral Tracking LQIT and Self Tuning with the parameter identification method and the transfer function model or the state model of the nonlinear mathematical model called the internal combustion engine described. with System Identification Toolbox. From the parameters and the identification model, we can build a computer model to reflect the real system to calculate the LQIT controller online. Building controllers can be implemented quickly on the communication function model or state model, which reduces design time and costs and avoids damage to real equipment. Research on using Matlab/Simulink software to conduct data collection, system identification and simulation. The calculation results of the LQIT optimal grip controller are directly controlled by the amount of fuel provided by the torque set to nonlinear model output as an internal combustion engine. Simulation results showed that the amount of fuel was reduced compared to classical PID control method.

Keywords: System Identification Toolbox, internal combustion engine, linear quadratic integral tracking, self tuning regulator, optimized control.

1. Đặt vấn đề

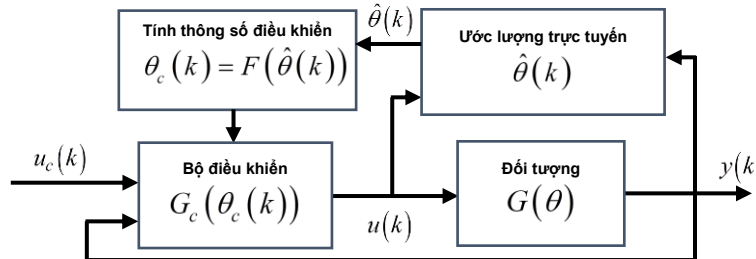
Trong bài toán điều khiển theo bám tối ưu LQIT, muốn tổng hợp được bộ điều khiển cho đối tượng hệ kín có được chất lượng như mong muốn thì trước tiên cần phải hiểu biết về đối tượng, tức là cần phải có một mô hình toán học của đối tượng. Kết quả tổng hợp bộ điều khiển phụ thuộc rất nhiều vào mô hình mô tả của đối tượng. Người ta thường sử dụng hai phương pháp mô hình hóa đối tượng: phương pháp lý thuyết và phương pháp nhận dạng [1]. Phương pháp lý thuyết là phương pháp thiết lập mô hình dựa trên các định luật có sẵn về quan hệ vật lý bên trong và quan hệ giao tiếp với môi trường bên ngoài của đối tượng. Trong điều kiện ở nước ta hiện nay, việc khảo sát những quy luật giao tiếp bên trong đối tượng cũng về mối quan hệ giữa đối tượng với môi trường bên ngoài đầy đủ của động cơ đốt trong để có thể xây dựng được một mô hình toán hoàn chỉnh là rất khó khăn. Mặt khác, khi các động cơ đốt trong hoạt động trong thời gian dài, thường xuất hiện hiện tượng lão hóa do sự chuyển động của các chi tiết cơ khí, do giãn nở vì nhiệt, do chất lượng của nhiên liệu, của chất bôi trơn, môi chất làm mát,... làm cho các thông số của động cơ bị thay đổi khi hoạt động [6]. Vì vậy, tác giả áp dụng phương pháp nhận dạng trực tuyến để hoàn thiện việc xây dựng mô hình của đối tượng trên cơ sở quan sát tín hiệu vào ra của đối tượng, tín hiệu vào ra từ hệ

thống được ghi lại và phân tích để nhận dạng mô hình hàm truyền đạt hoặc mô hình trạng thái của đối tượng từ đó tính toán bộ điều khiển bám tối ưu LQIT [1].

2. Nội dung

2.1. Nhận dạng mô hình động cơ đốt trong

Nhận dạng hệ thống là phương pháp xây dựng mô hình toán của hệ thống dựa vào dữ liệu vào/ ra quan sát được. Trong hình 1 bao gồm $u_c(k)$ là tín hiệu vào, $y(k)$ là tín hiệu ra, $\theta(k)$ tín hiệu ra của mô hình nhận dạng, $u(k)$ điều khiển [1]. Việc nhận dạng hệ thống bao gồm các bước: thí nghiệm thu thập số liệu, chọn cấu trúc mô hình, ước lượng các thông số và đánh giá mô hình [2].



Hình 1. Cấu trúc nhận dạng mô hình và điều khiển hệ thống

Khi nghiên cứu về động cơ đốt trong theo [10] xây dựng được mô hình (1) mối quan hệ giữa mô men và lượng nhiên liệu:

$$\begin{cases} \dot{m}_a = m_{\max} (1 - \cos(1.14459 \cdot \alpha - 106)) \left(1 - \exp\left(9 \left(\frac{P_m}{P_{atm}} - 1\right)\right) \right) - \frac{V_e}{4\pi V_m} \eta_{vol} \omega_e \frac{M_a P_m V_m}{R T_m} \\ \dot{m}_{fi} = \frac{\dot{m}_{fc}}{0.05 + \frac{1.5\pi m_{fc} \beta}{\omega_e m_{\max}}} - \dot{m}_{fi} \\ \dot{M}_e = C_M \frac{\frac{V_e}{4\pi V_m} \eta_{vol} \omega_e \frac{M_a P_m V_m}{R T_m} (t - \Delta t_{it})}{\omega_e (t - \Delta t_{it})} AFI(t - \Delta t_{it}) SI(t - \Delta t_{st}) - 0.1056 \omega_e - 15.1 - M_e \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

\dot{m}_a lượng không khí vào họng hút;

\dot{m}_{fi} lượng nhiên liệu phun vào buồng đốt;

\dot{M}_e mô men của động cơ;

C_M hằng số mô men của động cơ;

AFI tỷ lệ phun nhiên liệu hiệu chỉnh;

Δt_{it} hằng số thời gian trễ chu kỳ công tác;

Δt_{st} hằng số thời gian trễ lan truyền lửa trong buồng đốt;

SI góc đánh lửa điều chỉnh;

\dot{m}_{fc} lượng phun nhiên liệu hiệu chỉnh;

α góc mở ga;

β tỷ lệ nhiên liệu mong muốn;

m_{\max} lượng không khí vào khi góc mở ga là max;

V_e thể tích buồng đốt;

V_m thể tích họng hút;

P_m áp suất không khí trên họng hút;

P_{atm} áp suất không khí;

η_{vol} hiệu suất khối;

ω_e tốc độ động cơ;

R hằng số không khí.

Phương trình (1) là hệ phương trình phi tuyến của động cơ đốt trong với biến 3 trạng thái là $[m_a, m_{fi}, T_i]$ với các tham số α, β, SI , thể hiện mối quan hệ giữa nhiên liệu vào buồng đốt với mô men trên trục động cơ, vì vậy ta chọn bậc mô hình nhận dạng là bậc 3. Trong phương trình (1) việc điều khiển mô men của động cơ đốt trong phụ thuộc vào các tín hiệu đầu vào: α, β, SI [10]. Theo [7], [8], [9] ta chỉ có thể điều khiển mô men của động cơ đốt trong bằng điều khiển trực tiếp góc mở

ga α . Để chuẩn bị cho việc nhận dạng ta tiến hành thực nghiệm thu thập tín hiệu đầu vào ra cho bộ nhận dạng với input = α , output = \dot{M}_e . Từ (1) ta thấy khi nhận dạng động cơ đốt trong, đối tượng có dạng bậc 3 với hàm truyền rời rạc có các thông số cần nhận dạng b1, b2, b3 và a1, a2, a3:

$$G(z) = \frac{b_1 z^2 + b_2 z + b_3}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3} \quad (2)$$

- Xây dựng công thức ước lượng bình phương tối thiểu [2]:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}} \Rightarrow (1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3})Y(z) = (b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3})U(z)$$

$$\Rightarrow y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - a_3 y(k-3) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + b_3 u(k-3)$$

Vector hồi quy:

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad -y(k-3) \quad u(k-1) \quad u(k-2) \quad u(k-3)]^T$$

$$\text{Vector tham số: } \theta(k) = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3]^T$$

Suy ra bộ dữ liệu tham số của động cơ đốt trong có dạng [2], [4]: $y(k) = \varphi^T(k)\theta(k)$ (3)

$$\text{Theo chuẩn bình phương tối thiểu [2]: } V_N = \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^N \varepsilon^2(k, \theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^N [y(k) - \varphi^T(k)\theta]^2$$

Do V_N là hàm toàn phương nên bộ ước lượng tham số $\hat{\theta}$ là hàm cực tiểu là nghiệm của phương trình:

$$\left. \frac{\partial V_N}{\partial \theta} \right|_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \Rightarrow \sum_{k=k_0}^N \varphi(k) [y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}] = 0 \Rightarrow \hat{\theta}(k) = \left[\sum_{k=k_0}^N \varphi(k)\varphi^T(k) \right]^{-1} \sum_{k=k_0}^N \varphi(k)y(k) \quad (4)$$

- Xây dựng bộ ước lượng bình phương tối thiểu thời gian thực: Giả sử đến thời điểm k, ta thu thập được k mẫu dữ liệu. Chỉ tiêu ước lượng bình phương tối thiểu có trọng số ở thời điểm k là [2], [4]:

$$V_N = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^k \varepsilon^2(l, \theta) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^k [y(l) - \varphi^T(l)\theta]^2 \quad (5)$$

$$\text{Bộ ước lượng thông số tại thời điểm k: } \hat{\theta}(k) = \left[\sum_{l=1}^k \lambda^{k-l} \varphi(l)\varphi^T(l) \right]^{-1} \sum_{l=1}^k \lambda^{k-l} \varphi(l)y(l) \quad (6)$$

$$\text{Đặt: } \bar{R}(k) = \sum_{l=1}^k \lambda^{k-l} \varphi(l)\varphi^T(l), f(k) = \sum_{l=1}^k \lambda^{k-l} \varphi(l)y(l) \Rightarrow \hat{\theta}(k) = [\bar{R}(k)]^{-1} f(k) \quad (7)$$

Bộ dữ liệu nhận dạng (7) không áp dụng thời gian thực vì khi thời gian hệ thống hoạt động càng dài, số mẫu dữ liệu sẽ tăng lên, dẫn đến tăng thời gian tính toán và vượt khả năng tính toán của bộ nhận dạng. Vì vậy, ta phải sử dụng phương pháp đệ quy, thuật toán ước lượng đệ quy được xác định [2], [4]:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \bar{R}^{-1}(k)\varphi(k)\varepsilon(k) \quad (8)$$

Trong đó: $\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)$, $\bar{R}(k) = \lambda\bar{R}(k-1) + \varphi(k)\varphi^T(k)$, λ là hệ số quên, thông thường $\lambda = 0.98 \div 0.995$, Ta đặt:

$$P(k) = \bar{R}^{-1}(k) \Rightarrow P(k) = \frac{1}{\lambda} \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \right]$$

$$\Rightarrow L(k) = \bar{R}^{-1}(k)\varphi(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (9)$$

$$\text{Thuật toán ước lượng đệ quy: } \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + L(k)\varepsilon(k) \quad (10)$$

Như vậy, để ước lượng tham số trực tuyến cho động cơ đốt trong ta cho chạy thuật toán (10) tại thời điểm k ta được bộ tham số cho động cơ đốt trong [3], [4], [5], [6]:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + L(k)\varepsilon(k) = [\hat{a}_1 \quad \hat{a}_2 \quad \hat{a}_3 \quad \hat{b}_1 \quad \hat{b}_2 \quad \hat{b}_3]^T \quad (11)$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển bám tối ưu LQIT tự chỉnh

Trong cấu trúc Hình 2, tín hiệu bám sai lệch được xác định:

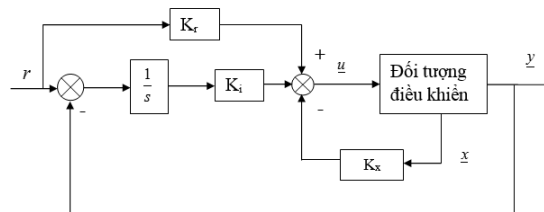
$$\dot{w} = r(t) - y(t) = r(t) - Cx(t), \text{ Trong đó: } r(t) \text{ tín hiệu đặt, } y(t) \text{ tín hiệu ra.}$$

Đặt hai biến trung gian $\hat{x} = [\tilde{x} \quad w]^T$, Khi đó phương trình trạng thái có dạng [9]:

$$\dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{u} \quad (12)$$

Với: $\hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}$.

$$\text{Hàm mục tiêu điều khiển được xác định: } J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \hat{x}^T Q \hat{x} + \tilde{u}^T R \tilde{u} \quad (13)$$



Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển bám tối ưu tích phân LQIT

Nếu hệ thống được mô tả như trên là điều khiển được, có thể tìm được bộ điều chỉnh trạng thái chọn sao cho \tilde{u} là hàm của trạng thái \hat{x} có thể đo được [9]:

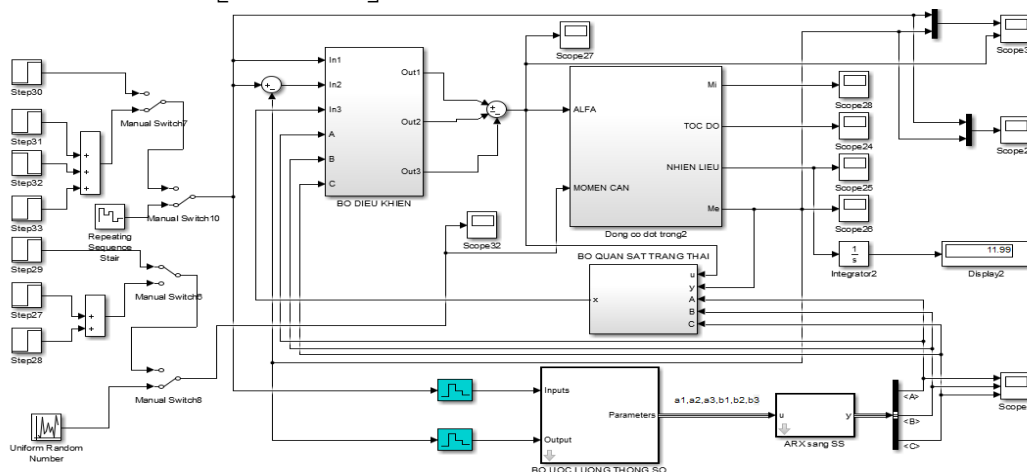
$$\tilde{u}(t) = -K\hat{x}(t) \quad (14)$$

Trong đó: $K = R^{-1}\hat{B}^T P = [K_x \quad K_i]$ (15)

p là nghiệm của phương trình Riccati: $P.\hat{A} + \hat{A}^T.P - P.\hat{B}.R^{-1}.\hat{B}^T.P + Q = 0$

$$\begin{aligned} u(t) &= -K_x \tilde{x} - K_w w + \bar{u} = -K_x (x - \bar{x}) - K_w w + \bar{u} = -K_x x + [K_x A^{-1} B - I](CA^{-1} B)^{-1} r - K_i w \\ &= -K_x x + [K_x A^{-1} B - I](CA^{-1} B)^{-1} r - K_i w = -K_x x + K_r r - K_i w \end{aligned} \quad (16)$$

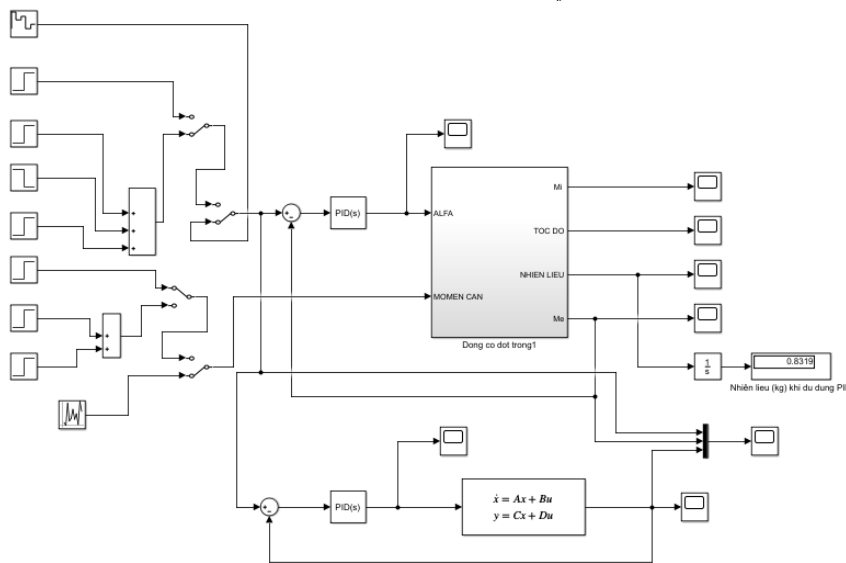
Với $K_r = [K_x A^{-1} B - I](CA^{-1} B)^{-1}$ (17)



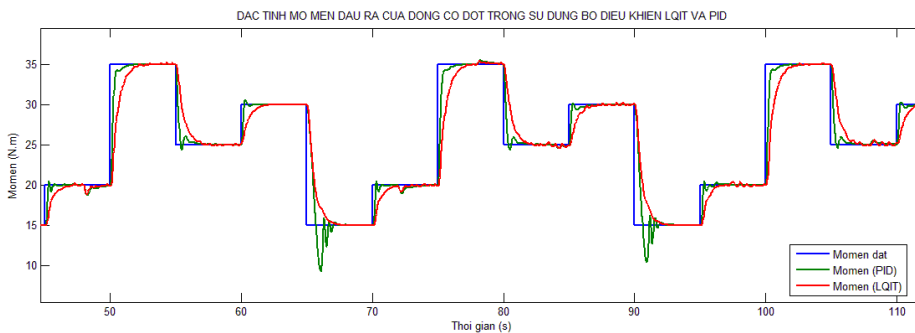
Hình 3. Sơ đồ mô phỏng sử dụng bộ điều khiển bám tối ưu LQIT tự chỉnh cho động cơ đốt trong

Hình 3 biểu diễn cấu trúc mô phỏng bằng Simulink khi cài đặt thuật toán điều khiển bám tối ưu LQIT tự chỉnh, trong mô hình mô phỏng, tác giả sử dụng thuật toán nhân dạng thông số bằng phương pháp đệ quy, tìm ra được bộ thông số $\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1 \quad \hat{a}_2 \quad \hat{a}_3 \quad \hat{b}_1 \quad \hat{b}_2 \quad \hat{b}_3]^T$ của mô hình nhận dạng ARX, chuyển thành dạng phương trình trạng thái với các ma trận A, B, C, từ đó tiến hành tính toán trực tuyến các ma trận điều khiển Kx, Ki, Kr, và ma trận L của bộ quan sát trạng thái.

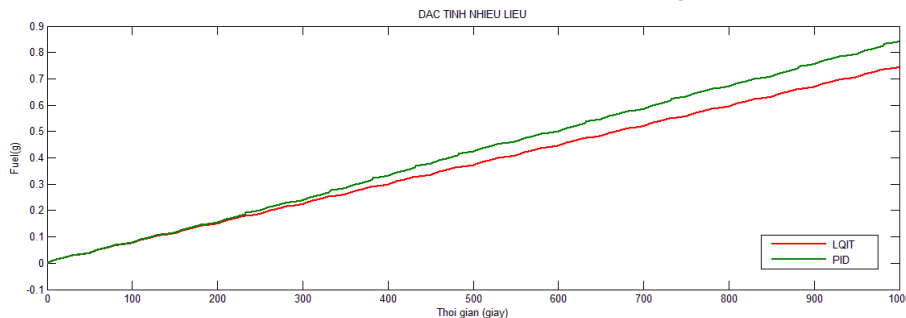
Khi cài đặt bộ điều khiển theo sơ đồ cấu trúc trong Hình 3, với các thông số của động cơ trong Bảng 1 ta thu được kết quả mô phỏng Hình 5, Hình 6. Kết quả mô phỏng này sử dụng điều khiển bám tối ưu LQIT tự chỉnh (các thông số của bộ điều khiển LQIT lúc đầu là: $K_i = -10$, $K_x = [1720 \ 399,6 \ 41,7]$, $K_r = 5,6$) khi đối tượng có các tham số β, SI của động cơ thay đổi được so sánh với kết quả với đối tượng là động cơ đốt trong khi sử dụng bộ điều khiển PID (thông số của bộ PID được tính theo phương pháp Ziegler - Nichols thứ nhất: $K_p = 0,031$, $K_i = 0,041$, $K_d = 0,002$ trong Hình 4). Sơ đồ mô phỏng sử dụng bộ PID và LQIT được mô phỏng đồng thời, lượng nhiên liệu đo được dùng để so sánh được tính toán theo phương trình vi phân của \dot{m}_{fi} trong hệ (1).



Hình 4. Sơ đồ mô phỏng sử dụng bộ điều khiển PID cho động cơ đốt trong



Hình 5. Đặc tính mô men trên trục của động cơ đốt trong khi sử dụng bộ điều khiển PID và bộ điều khiển LQIT tự chỉnh, với mô men cân bằng 5 N.m



Hình 6. Đặc tính nhiên liệu tiêu thụ khi sử dụng bộ điều khiển PID và LQIT tự chỉnh, với mô men cản 5 N.m
Bảng 1. Thông số đã được khảo sát thực nghiệm của động cơ 4 xi lanh 2.7L

m_{max}	0,1843kg/s	Nhiên liệu khi ga mở lớn nhất	Δt_{it}	5,48/ ω (s)	Thời gian trễ phun nhiên liệu
V_m	0,0038m ³	Thể tích ống nạp	Δt_{st}	1,3/ ω (s)	Thời gian trễ đánh lửa
V_e	0,0027m ³	Thể tích xi lanh	T_M	300degK	Nhiệt độ ống nạp
J_e	0,1454kgm ²	Mô men quán tính	M_a	28,84g/mole	Trong lượng riêng của không khí
C_M	498.636kg/s	Hằng số mô men	R	8.314,3J/mole	Hằng số không khí

Nhận xét, đánh giá các kết quả mô phỏng: Dựa trên kết quả mô phỏng với thời gian mô phỏng là 1000 giây cho thấy khi dùng bộ điều khiển bám tối ưu điều khiển đối tượng là động cơ đốt trong sử dụng thuật toán LQIT tự chỉnh cho thấy đáp ứng đầu ra của mô men trên trục của động cơ đốt trong bám theo mô men đặt và có đặc tính động tốt hơn khi sử dụng bộ điều khiển PID. Ngay khi thay đổi mô men cản ngẫu nhiên trong khoảng 5 N.m (làm nhiễu hệ thống) với chu kỳ thay đổi là 6 giây, mô men đầu ra vẫn bám chính xác theo tín hiệu đặt. Lượng nhiên liệu tiêu thụ tức thời của động cơ khi sử dụng bộ điều khiển PID là 0,843 kg, khi sử dụng bộ điều khiển LQIT là 0,742 kg. Như vậy, khi sử dụng bộ điều khiển bám tối ưu LQIT tự chỉnh thì lượng nhiên liệu tiêu thụ tiết kiệm hơn khi sử dụng bộ PID là 10%.

3. Kết luận

Muốn thiết kế hệ thống điều khiển có chất lượng tốt cần phải biết mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Nhận dạng hệ thống là phương pháp rút ra mô hình toán học của hệ thống dựa vào dữ liệu vào - ra quan sát được. Đến nay các phương pháp nhận dạng mô hình tuyến tính từ mô hình phi tuyến đã phát triển khá hoàn chỉnh, phương pháp nhận dạng mô hình tuyến tính từ mô hình phi tuyến giúp người thiết kế có thể bỏ qua bước tuyến tính hóa mô hình phi tuyến, từ đó việc tính toán bộ điều khiển nhanh chóng hơn. Trong bài báo này, đầu ra là momen, đầu vào là góc mở ga alpha của mô hình phi tuyến của động cơ đốt trong với các tham số bất định của mô hình phi tuyến được xét đến, nhận dạng và tìm ra mô hình hàm truyền đạt và mô hình của hệ thống đó giúp cho việc tính toán trực tuyến bộ điều khiển bám tối ưu LQIT cho mô men động cơ đốt trong.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Doãn Phước, *Nhận dạng hệ thống điều khiển*, NXB KHKT Hà Nội, 2005.
- [2] Huỳnh Thái Hoàng, *Mô hình hóa và nhận dạng hệ thống*, NXB ĐHBK TPHCM, 2012.
- [3] Nguyễn Chí Ngôn, Nguyễn Minh Hải, *Nhận dạng hệ điều khiển mực chất lỏng*, Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, 2013.
- [4] Lennart Ljung, *System Identification Toolbox User's Guide*, MathWorks, 2015.
- [5] Jeremiah P. Anderson, *State space modeling, system identification and control of a 4th order rotational mechanical system*, University of California, Los Angeles, 2002.
- [6] Neda Nickmehr, *System identification of an Engine load setup using grey box model*, Linköping University, Linköping, Sweden, 2015.
- [7] Andreas Bergstrom, *Torque Modeling and Control of a Variable Compression Engine*, Linköping University, Linköping, Sweden, 2003.
- [8] Aris Triwiyatno, Mohammad Nuh, Ari Santoso, and I Nyoman Sutantra, *Engine Torque Control of Spark Ignition Engine Using Robust Fuzzy Logic Control*, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 2011.
- [9] Munan Hong, Tielong Shen, Minggao Ouyang, Junichi Kako, *Optimal Speed Tracking Control for Torque-Based Engine Management Systems*, Department of Mechanical Engineering, Sophia University, Japan Toyota Motor Corporation, Shizuoka, Japan, 2008.
- [10] Divya K. Pai*, Sheryl Grace Colaco, *Sliding Mode Idle Speed Control of IC Engine*, Electrical and Electronics Department, St Joseph Engineering College, Mangaluru, India, 2017.

Ngày nhận bài: 24/12/2018
 Ngày nhận bản sửa: 09/01/2019
 Ngày duyệt đăng: 15/01/2019