



طراحی کنترل کننده پسگام مدلفزشی مرتبه کسری تطبیقی برای سیستم شناور مغناطیسی

هادی دلآوری^{1*}، حمید حیدری نژاد²

1- استادیار، مهندسی برق - کنترل، دانشگاه صنعتی همدان، همدان
 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق - کنترل، دانشگاه صنعتی همدان، همدان
 * همدان، صندوق پستی 65155، delavari@hut.ac.ir

چکیده

تکنولوژی شناور مغناطیسی بر پایه مدل دینامیکی ماگلو به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل به شدت غیرخطی و ناپایدار است و با وجود اغتشاش و نویز اندازه‌گیری کنترل سیستم شناور مغناطیسی بسیار مشکل می‌شود. در این مقاله کنترل کننده پسگام مدلفزشی مرتبه کسری تطبیقی به منظور پایدارسازی، ردیابی مناسب و مقابله با اغتشاش و نویز اندازه‌گیری برای سیستم شناور مغناطیسی پیشنهاد می‌شود. الگوریتم پسگام که یک روش مبتنی بر تئوری پایداری لیپانوف است با تئوری کنترل مدلفزشی برای ایجاد عملکرد مقاوم ترکیب می‌گردد و از حسابان مرتبه کسری در جهت افزایش درجه آزادی و همچنین مقاومت بیشتر کنترل کننده استفاده می‌شود. پایداری کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از تئوری پایداری لیپانوف و تئوری پایداری لیپانوف تعمیم یافته جدید برای سیستم‌های مرتبه کسری مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌های عددی برای درک بهتر عملکرد سیستم شناور مغناطیسی تحت کنترل کننده پیشنهادی انجام می‌شود و عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مدلفزشی ترمینال سریع تطبیقی مقایسه می‌گردد. نتایج شبیه سازی بیانگر موفقیت کنترل کننده پیشنهادی در ایجاد ردیابی مناسب و مقاومت بالا در مقابل اغتشاش و نویز می‌باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 03 بهمن 1395
 پذیرش: 28 بهمن 1395
 ارائه در سایت: 14 اسفند 1395
 کلید واژگان:
 سیستم شناور مغناطیسی (ماگلو)
 تئوری کنترل مدلفزشی
 الگوریتم پسگام
 کنترل مرتبه کسری

Adaptive fractional order Backstepping sliding mode controller design for a magnetic levitation system

Hadi Delavari^{*}, Hamid Heydarinejad

Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
 * P.O.B. 65155, Hamedan, Iran, delavari@hut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 22 January 2017
 Accepted 16 February 2017
 Available Online 04 March 2017

Keywords:

Magnetic levitation system (maglev)
 Sliding mode control theorem
 Backstepping algorithm
 Fractional order control

ABSTRACT

Magnetic levitation systems are widely used in various industries. These kinds of systems are usually open-loop unstable and are described by highly nonlinear differential equations which present additional difficulties in controlling these systems in the presence of disturbance and sensor noise. We consider the stabilization and the tracking problems of a magnetic levitation system. In this paper an adaptive fractional order Backstepping sliding mode control schemes is proposed. Backstepping algorithm is based on the Lyapunov theory. The proposed controller in this paper is designed by a combination of a Backstepping algorithm, sliding mode control and fractional calculus to make more degree of freedom and robustness. The stability of the closed loop system is investigated by using the Lyapunov stability theorem and the new extension of Lyapunov stability theorem for fractional order systems. Simulations are performed to confirm the theoretical results of the proposed controller for the magnetic levitation system. The proposed controller is able to reject the sensor noise and disturbance with a chattering free control law. Finally, the simulation results of the proposed controller are compared with the adaptive fast terminal sliding mode control.

1- مقدمه

مغناطیسی ماگلو راهگشای بسیاری از مشکلات بشر در حوزه های مختلف می‌باشد. تکنولوژی شناور مغناطیسی ماگلو در واقع یک تکنولوژی بدون اتصال است که به دلیل عدم وجود اصطکاک و افزایش بازدهی سیستم و کاهش نویز، هزینه های ننگه داری کمتری خواهد داشت. این تکنولوژی یک تکنولوژی فوق العاده کارآمد با کاربردهای بسیار گسترده در حوزه‌های مختلف از قبیل حمل و نقل سریع، مهندسی پزشکی، انرژی‌های تجدید پذیر، هوا و فضا، تجهیزات نظامی، فرآیند بررسی مدل‌های آیرودینامیک هواپیما، مهندسی برق و ساخت سیستم‌های اندازه‌گیری نانو مقیاس می‌باشد [1].

سیستم‌های شناور مغناطیسی پیشینه‌ای در حدود صد سال دارند، زمانی که دانشمندان ایده اولیه قطار مغناطیسی معلق را براساس مدل ماگلو¹ ارائه نمودند. همه توجهات بر روی قطارهای مغناطیسی متمرکز شد و ساخت قطارهای مغناطیسی سریع‌السير سبب شکوفایی این تکنولوژی شد. از آن پس همگان مزایای بسیار آن را درک کرده کردند و دیگر می‌دانستند که چگونه این تکنولوژی را در مسائل مختلف به کار گیرند. امروزه تکنولوژی شناور

¹ Maglev

Please cite this article using:

H. Delavari^{*}, H. Heydarinejad, Adaptive fractional order Backstepping sliding mode controller design for a magnetic levitation system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 187-195, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Delavari^{*}, H. Heydarinejad, Adaptive fractional order Backstepping sliding mode controller design for a magnetic levitation system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 187-195, 2017 (in Persian)

برای بررسی و بهبود عملکرد شناور مغناطیسی ماگلو اغلب از مدل دینامیکی توپ معلق که به مدل ماگلو مشهور است استفاده می‌شود. مدل دینامیکی ماگلو به صورت حلقه باز ناپایدار بوده و دارای سیستمی فوق‌العاده سریع و به شدت غیرخطی می‌باشد، از این رو استراتژی‌های مدل‌سازی و کنترل شناورهای مغناطیسی در سراسر جهان بسیار مورد توجه قرار گرفته است [2]. در سال‌های اخیر کنترل‌کننده‌های زیادی برای بهبود عملکرد سیستم شناور مغناطیسی طراحی و اجرا شده‌اند که در ادامه پیشینه روش‌های کنترلی طراحی شده برای مدل ماگلو بررسی می‌گردد.

کنترل کننده‌های تناسبی - مشتقی - انتگرالی¹ به دلیل ساختار ساده و سادگی عملکرد آن‌ها، بسیار مورد توجه تکنسین‌ها قرار گرفته‌اند اما تنظیم سنتی پارامترهای این کنترل‌کننده‌ها از نقاط ضعف آن‌ها می‌باشد، از این رو در [3] کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی برای کنترل ارتفاع در سیستم ماگلو طراحی شده و برای حل مشکل تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده از روش‌های فازی استفاده شده است [4]. کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی به همراه مشاهده‌گر حالت برای سیستم ماگلو در [5] طراحی و ارائه شده است و با استفاده از تکنیک پیشرو² پارامترهای کنترل‌کننده تنظیم شده و محدوده عملکرد پایدار سیستم توسعه داده شده است. کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی با دو درجه آزادی برای سیستم شناور مغناطیسی در [6] طراحی شده است که ابتدا مدل دینامیکی خطی‌سازی شده و سپس کنترل‌کننده به آن اعمال شده است. علت استفاده از کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی با دو درجه آزادی، کاهش بالادگی در پاسخ گذاری سیستم عنوان شده است. کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی مرتبه کسری برای پایداری‌سازی سیستم شناور مغناطیسی در [7] ارائه شده است، که مقاومت مناسب این روش در مقابل اغتشاش‌ها از مزایای این روش می‌باشد. برای کنترل مدل غیرخطی سیستم ماگلو، روش‌های خطی‌سازی مدل، خطی‌سازی فیدبک [8] و خطی‌سازی کنترل پیشرو³ [9] ارائه شده است، خطی‌سازی سیستم‌های غیرخطی حول نقطه کار سبب ایجاد مشکلاتی از جمله حذف برخی از دینامیک‌ها در مدل خطی شده و ایجاد عدم قطعیت خواهد شد. در صورتی که سیستم چندین نقطه کار داشته باشد از روش تکنیک خطی‌سازی تکه‌ای⁴ [10] استفاده می‌شود. در [2] با استفاده از ترکیب خودکاهنده‌های وابسته به حالت با متغیر برون زا⁵ و شبکه عصبی بازگشتی سیستم غیرخطی ماگلو شناسایی شده و سپس با استفاده از کنترل‌کننده مدل پیش‌بین، ارتفاع توپ معلق کنترل گردیده است. مزیت این روش در شناسایی پارامترهای سیستم، ایجاد ردیابی مناسب و مقابله با تاخیرهای به‌وجود آمده در سیستم می‌باشد. در [11] کنترل‌کننده مدل پیش‌بین غیرخطی برای سیستم شناور مغناطیسی به منظور ردیابی سریع ارتفاع مطلوب و پایداری‌سازی سیستم طراحی شده است که با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی تابع هزینه تعیین شده را حداقل می‌نماید که این روش از مقاومت خوبی برخوردار است.

کنترل‌کننده‌های غیرخطی می‌باشد. کنترل‌کننده‌های غیرخطی به دلیل توانایی بالا در دفع اغتشاش‌ها و مقابله با نامعینی‌های پارامتری به شدت مورد توجه قرار گرفته است. طراحی کنترل‌کننده‌های مدغزشی از دو بخش، طراحی قانون کنترل معادل⁶ پیوسته و طراحی قانون کنترل سوئیچینگ ناپیوسته تشکیل شده است. برای این‌که شرایط رسیدن به سطح لغزش و باقی ماندن بر روی آن در سیستم صدق کند می‌بایست بهره قانون کنترل سوئیچینگ بزرگتر از حد بالای نامعینی‌ها و اغتشاش‌های سیستم باشد.

الگوریتم پسگام، یک روش طراحی سیستماتیک کنترل‌کننده برای سیستم‌های غیرخطی است که بر پایه تئوری پایداری لیاپانوف ابداع شده است [15]. ایده این روش گسترش تابع لیاپانوف از یک سیستم ساده به سیستم‌هایی شامل متغیرهای حالت اضافه و به‌طور هم‌زمان طراحی کنترل پس‌خورده برای تضمین پایداری است. روش پسگام یک الگوریتم پله ای را دنبال می‌کند. یکی از مهمترین مزایای روش پسگام جلوگیری از حذف المان‌های غیرخطی کاربردی می‌باشد [16].

حسابان مرتبه کسری موضوعی با قدمت بیش از سه قرن است اما در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای در علوم مهندسی و به‌خصوص در حوزه مدل‌سازی و کنترل سیستم‌ها پیدا کرده است. اضافه شدن حسابان مرتبه کسری به کنترل‌کننده سبب افزایش مقاومت و افزایش درجه آزادی کنترل‌کننده خواهد شد.

در این مقاله در بررسی سیستم شناور مغناطیسی از مدل دینامیکی ماگلو استفاده شده است. در مدل ماگلو معادلات دینامیکی یک توپ فرو مغناطیسی که توسط یک میدان الکترومغناطیسی در هوا معلق نگه داشته شده بیان شده است. در مقاله حاضر یک کنترل‌کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی⁷ برای سیستم شناور مغناطیسی با مدل دینامیکی ماگلو طراحی خواهد شد و با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف، پایداری مدل دینامیکی ماگلو تحت کنترل‌کننده پیشنهادی بررسی خواهد شد. برخی از نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- ارائه یک سطح لغزش مرتبه کسری مناسب براساس کنترل پسگام مدلغزشی مرتبه کسری
- طراحی قوانین تطبیق برای کنترل‌کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری
- عدم محدودیت در دانستن کران بالای اغتشاش‌ها در کنترل‌کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی
- بهره‌گیری از روشی نوین در بررسی پایداری سطح لغزش مرتبه کسری

2- حسابان مرتبه کسری

محاسبات مرتبه کسری نقش بسیار مهمی در زمینه‌های گوناگون علمی دارد

⁶ Equivalent control law

⁷ Adaptive fractional order Backstepping sliding mode control (AFOSMBC)

¹ Proportional-Integral-Derivative (PID)

² feed forward technique

³ Feed forward linearization control

⁴ piecewise linearization technique

⁵ state-dependent autoregressive with exogenous variable

که p موقعیت توپ، v سرعت توپ، i جریان سیم پیچ الکترومغناطیسی، e ولتاژ اعمالی به سیم پیچ، R مقاومت معادل سیم پیچ، L اندوکتانس معادل سیم پیچ، g_c ثابت گرانشی، C ثابت نیروی مغناطیسی و m جرم توپ معلق را نشان می‌دهد. اندوکتانس L تابعی غیر خطی از موقعیت P می‌باشد و به طور تقریبی به صورت زیر است [21,14,2]:

$$L(p) = L_1 + \frac{2C}{p} \quad (9)$$

با استفاده از تغییر متغیر $u = e$, $x_3 = i$, $x_2 = v$, $x_1 = p$ می‌توان معادلات فضای حالت سیستم شناور مغناطیسی را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= g_c - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} u \end{aligned} \quad (10)$$

با استفاده از تغییر متغیرهای مناسب به صورت (11) می‌توان معادلات فوق را به فرم همراه غیرخطی و برحسب بردار حالت Z بازنویسی نمود [21,14]:

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 - x_{1d} \\ z_2 &= x_2 - x_{2d} \\ z_3 &= g_c - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ \dot{z}_3 &= 2(g_c - z_3) \left[\left(1 - \frac{2}{L(z_1 + x_{1d})} \right) \frac{z_2}{z_1 + x_{1d}} + \frac{R}{L} \right] + d \\ &\quad - \frac{2}{L(z_1 + x_{1d})} \sqrt{\frac{c}{m}} (g_c - z_3) u \\ &= f(z) + g(z)u + d \end{aligned} \quad (12)$$

که x_{1d} , x_{2d} مقادیر مطلوب موقعیت و سرعت توپ معلق و x_{3d} جریان مطلوب سیم‌پیچ می‌باشد. فرض می‌شود که $x_{2d} = 0$ و $x_{3d} = (\sqrt{g_c m / C}) x_{1d}$ و d اغتشاش وارده بر سیستم می‌باشد [21].

4- طراحی کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی

4-1- کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری

کنترل کننده مدلغزشی یک روش مناسب برای پایداری سازی و ایجاد ردیابی مناسب در سیستم‌های غیرخطی می‌باشد که به دلیل مقاومت در مقابل اغتشاش و نامعینی پارامتری به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم پسگام به طور ذاتی توانایی مقابله با اغتشاش ناسازگار⁴ را داشته و ترکیب آن با کنترل کننده مدلغزشی سبب افزایش عملکرد مقاوم کنترل کننده خواهد شد. اخیراً مطالعات زیادی پیرامون کنترل کننده‌های مرتبه کسری انجام گرفته است. از مزیت‌های کنترل کننده‌های مرتبه کسری، افزایش تعداد پارامترهای کنترل کننده و ایجاد آزادی عمل در تنظیم پارامترهای کنترل کننده می‌باشد. براساس تئوری الگوریتم پسگام [22,16] خطای ردیابی در هر یک از حالت‌های سیستم دارای یک قانون شبه کنترل تعیین شده بررسی خواهد شد. حالت‌های سیستم با قانون شبه کنترل تعیین شده بررسی خواهد شد. خطای دینامیکی موقعیت را به صورت (13) تعریف کرده و سپس الگوریتم پسگام به صورت زیر به مدل ماگلو اعمال خواهد شد:

و به خصوص در دهه اخیر کاربرد کنترل مرتبه کسری در مهندسی کنترل به عنوان یک موضوع مهم در عرصه تحقیقات بین‌المللی مطرح شده است [17]. اخیراً دانشمندان نشان داده اند که معادلات مرتبه کسری قادرند پدیده‌های گوناگون را مناسب‌تر از مرتبه صحیح آن مدل کنند و کنترل کننده‌های مرتبه کسری یک ابزار قدرتمند جهت کنترل سیستم‌های با دینامیک پیچیده می‌باشد [18]. مشتق و انتگرال مرتبه کسری دارای تعاریف مختلفی است که پرکاربردترین و مهمترین آن‌ها تعاریف گرانوالد-لتنیکوف¹، ریمن-لیویل² و کاپوتو³ می‌باشد [19]. در این مقاله برای طراحی کنترل کننده مدلغزشی مرتبه کسری از مشتق و انتگرال مرتبه کسری با تعریف کاپوتو استفاده خواهد شد. در این بخش تعاریف و خواص حسابان مرتبه کسری کاپوتو ارائه می‌شود [19].

تعریف 1. مشتق مرتبه کسری کاپوتو به صورت (1) ارائه شده است که در آن m عددی مثبت است [19]:

$${}_0^c D_t^\alpha x(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{m-\alpha-1} x^{(m)}(\tau) d\tau \quad (1)$$

$m-1 < \alpha < m \in \mathbb{Z}$

که ${}_0^c D_t^\alpha x(t)$ مشتق مرتبه α تابع $x(t)$ با تعریف کاپوتو در بازه زمانی 0 تا t را نشان می‌دهد [19].

تعریف 2. تابع گاما به صورت (2) تعریف می‌شود:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt \quad (2)$$

تعریف 3. انتگرال مرتبه کسری به صورت (3) بیان می‌گردد:

$$D_{0,t}^{-\alpha} x(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{\alpha-1} x(\tau) d\tau \quad (3)$$

تعریف 4. برخی از خواص مهم تعریف کاپوتو که در ادامه از آن استفاده خواهد شد عبارتند از [20]:

$${}_0^c D_t^\alpha D_{0,t}^{-\alpha} x(t) = x(t) \quad m=1 \quad (4)$$

$$D_{0,t}^{-\alpha} {}_0^c D_t^\alpha x(t) = x(t) - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{t^k}{k!} x^{(k)}(0) \quad (5)$$

$${}_0^c D_t^\alpha {}_0^c D_t^n x(t) = {}_0^c D_t^{\alpha+n} x(t) \quad n \in \mathbb{N} \quad (6)$$

$$L\{{}_0^c D_t^\alpha x(t)\} = s^\alpha X(s) - \sum_{k=0}^{m-1} s^{\alpha-k-1} x^{(k)}(0) \quad (7)$$

3- مدل دینامیکی شناور مغناطیسی

سیستم شناور مغناطیسی ماگلو که در این مقاله برای طراحی کنترل کننده پیشنهادی در نظر گرفته شده است، یک توپ فرومغناطیس معلق در هوا است که به وسیله ولتاژ سیم‌پیچ مغناطیس کننده می‌توان شدت میدان مغناطیسی و در نتیجه ارتفاع توپ را تغییر داد. در این مدل تنها حرکت عمودی در نظر گرفته شده است. مدل دینامیکی سیستم به صورت (8) می‌باشد [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= v \\ \frac{d(L(p)i)}{dt} &= -Ri + e \\ m \frac{dv}{dt} &= mg_c - C \left(\frac{i}{p} \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

¹ Grunwald-Letnikov

² Riemann-Liouville

³ Caputo

⁴ Canonical form

⁵ Mismatched disturbance

شده، به این ترتیب می‌توان ورودی سیستم u را در (25) ظاهر نمود. در تئوری کنترل مدل‌غزشی هدف، رساندن حالت‌های سیستم شناور مغناطیسی به سطح لغزش تعیین شده و باقی ماندن حالت‌های سیستم بر روی این سطح می‌باشد، بدین منظور می‌بایست عبارات $\sigma = \dot{\sigma} = 0$ شود با اعمال این شرایط به (26) قانون کنترل معادل به صورت زیر از آن استخراج خواهد شد:

$$\dot{\sigma} = k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) + g(z)u - \dot{\phi}_2 = 0 \quad (27)$$

$$u_{eq} = -(g(z))^{-1} [k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) - \dot{\phi}_2] \quad (28)$$

با اعمال معادله (28) به سیستم شناور مغناطیسی حالت‌های سیستم به سطح لغزش مرتبه کسری تعیین شده (24) همگرا شده و بر روی این سطح لغزش باقی خواهند ماند، اما در صورتی که اغتشاشی وارد سیستم شود و یا نامعینی پارامتری در سیستم به وجود آید نمی‌توان تضمین نمود که پس این شرایط (اعمال اغتشاش و نامعینی پارامتری) حالت‌های سیستم شناور مغناطیسی باز هم بر روی سطح لغزش تعیین شده همگرا شوند. برای حل این مشکل قانون کنترل سوئیچینگ به صورت (29) تعریف می‌شود:

$$u_{sw} = -(g(z))^{-1} [K_1 \sigma + K_2 \text{sign}(\sigma)] \quad (29)$$

در نتیجه برای پایداری و ایجاد ردیابی مناسب و عملکرد مقاوم در سیستم شناور مغناطیسی قانون کنترلی که حاصل جمع روابط (28) و (29) است به سیستم شناور مغناطیسی اعمال خواهد شد:

$$u = -(g(z))^{-1} [k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) - \dot{\phi}_2 + K_1 \sigma + K_2 \text{sign}(\sigma)] \quad (30)$$

تئوری کنترل مدل‌غزشی دارای پدیده نامطلوبی در قانون کنترل به نام لرزش سیگنال کنترل¹ است که این پدیده سبب ناپیوستگی در قانون کنترل خواهد شد. لرزش سیگنال کنترل به دلیل استفاده از تابع ناپیوسته sign در قانون کنترل سوئیچینگ به وجود می‌آید [23]، برای رفع این مشکل می‌توان در قانون کنترل (30) به جای تابع sign از تابعی پیوسته و هموار مانند تابع اشباع² ($\text{sat}(\sigma/\epsilon)$) استفاده نمود که سبب رفع مشکل لرزش سیگنال کنترل خواهد شد. از دیگر روش‌های رفع مشکل لرزش سیگنال کنترل می‌توان به کنترل کننده مدل‌غزشی فازی اشاره کرد که در [24] به‌طور کامل تشریح شده است.

تئوری 1. سیستم شناور مغناطیسی با رابطه (12) با اعمال کنترل کننده پسگام مدل‌غزشی مرتبه کسری با قانون کنترل (30) پایدار است و حالت‌های سیستم شناور مغناطیسی به سطح لغزش مرتبه کسری (24) همگرا خواهند شد.

اثبات: براساس تئوری کنترل مدل‌غزشی، اثبات پایداری کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف انجام خواهد شد، لذا تابع معین مثبت (31) را در نظر بگیرد:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (31)$$

مشتق (31) به صورت (32) محاسبه می‌شود:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \sigma \dot{\sigma} \quad (32)$$

جایگذاری روابط (26) و (23) در (32) نتیجه خواهد داد:

$$\dot{V}_3 = +\xi_2 \xi_3 - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 + \sigma (k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) + g(z)u - \dot{\phi}_2) \quad (33)$$

سپس قانون کنترل محاسبه شده (30) در (33) جایگذاری می‌شود:

$$\dot{V}_3 = +\xi_2 \xi_3 - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 + \sigma (k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) + g(z)u - \dot{\phi}_2) \quad (33)$$

$$\xi_1 = z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (13)$$

از (13) مشتق گرفته و با استفاده از معادلات دینامیک مدل به صورت (14) بازنویسی خواهد شد:

$$\dot{\xi}_1 = \dot{z}_1 = z_2 \quad (14)$$

قانون شبه کنترلی ϕ_1 برای حالت z_1 از مدل دینامیکی شناور مغناطیسی به صورت (15) تعیین می‌گردد:

$$\phi_1 = -\lambda_1 \xi_1 \quad (15)$$

که λ_1 یک ضریب ثابت و مثبت می‌باشد، معادله دینامیکی خطای سرعت توپ معلق به صورت (16) تعیین شده اند:

$$\xi_2 = z_2 - \phi_1 \quad (16)$$

تابع معین مثبت (17) برای بررسی پایداری حالت z_1 تحت قانون شبه کنترلی ϕ_1 به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$V_1 = \frac{1}{2} \xi_1^2 \quad (17)$$

مشتق گیری از (17) و جایگذاری (14) در آن به صورت زیر خواهد شد:

$$\dot{V}_1 = \xi_1 \dot{\xi}_1 = \xi_1 z_2 \quad (18)$$

جایگذاری روابط (15) و (16) در (18) نتیجه می‌دهد:

$$\dot{V}_1 = \xi_1 (\xi_2 + \phi_1) = \xi_1 \xi_2 - \lambda_1 \xi_1^2 \quad (19)$$

مشتق تابع معین مثبت (\dot{V}_1)، نیمه معین منفی بوده و در نتیجه حالت z_2 تحت قانون شبه کنترلی (15) پایدار است. فرآیند فوق بر حالت‌های z_2 و z_3 نیز اعمال خواهد شد. قانون شبه کنترلی برای حالت z_2 به صورت (20) تعیین می‌شود:

$$\phi_2 = \dot{\phi}_1 - \lambda_2 \xi_2 - \xi_1 \quad (20)$$

براساس الگوریتم پسگام خطای دینامیکی ξ_3 به صورت (21) تعریف می‌شود:

$$\xi_3 = z_3 - \phi_2 \quad (21)$$

با تعیین تابع معین مثبت V_2 ، پایداری حالت z_2 از معادله دینامیکی سیستم شناور مغناطیسی (12) و با توجه به قانون شبه کنترلی (20)، به صورت زیر بررسی خواهد شد:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \xi_2^2 \quad (22)$$

با مشتق گیری از رابطه (22) و سپس جایگذاری روابط (19)، (20) و (21) در آن نتیجه می‌دهد:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \xi_2 \dot{\xi}_2 = (\xi_1 \xi_2 - \lambda_1 \xi_1^2) + \xi_2 (\dot{z}_2 - \dot{\phi}_1) \\ &= (\xi_1 \xi_2 - \lambda_1 \xi_1^2) + \xi_2 (\xi_3 + \phi_2 - \dot{\phi}_1) \\ &= (\xi_1 \xi_2 - \lambda_1 \xi_1^2) + \xi_2 (\xi_3 - \lambda_2 \xi_2 - \xi_1) \\ &= +\xi_2 \xi_3 - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 \end{aligned} \quad (23)$$

مشتق تابع معین مثبت (\dot{V}_2)، نیمه معین منفی بوده و در نتیجه حالت z_2 تحت قانون شبه کنترلی (20) پایدار است. براساس تئوری کنترل مدل‌غزشی برای محاسبه قانون کنترل معادل می‌بایست سطح لغزشی مناسب انتخاب شود، در این راستا برای محاسبه قانون کنترل معادل مناسب، که سبب پایداری سیستم شناور مغناطیسی شود، یک سطح لغزش مرتبه کسری به صورت (24) پیشنهاد می‌شود:

$$\sigma = k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + \xi_3 \quad (24)$$

برای محاسبه قانون کنترل معادل، از (24) مشتق گرفته، سپس مشتق (21) در (24) جایگذاری خواهد شد:

$$\dot{\sigma} = k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + \dot{\xi}_3 \quad (25)$$

$$\dot{\sigma} = k_1 {}_0^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + \dot{z}_3 - \dot{\phi}_2 \quad (26)$$

معادله دینامیکی سیستم شناور مغناطیسی (12) در (25) جایگذاری

¹ Chattering

² Saturation function

با استفاده از تئوری لیاپانوف تعمیم یافته جدید برای سیستم‌های مرتبه کسری اثبات خواهد شد که سطح لغزش مرتبه کسری (39) به صفر همگرا می‌شود، به صورت زیر:

$$k_1 {}^c D_t^\alpha \delta D_t^{-\alpha} \xi_3 + {}^c D_t^\alpha \xi_3 = 0, \quad {}^c D_t^\alpha \xi_3 = -k_1 \xi_3 \quad (40)$$

تابع معین مثبت (41) برای اثبات پایداری معادله دینامیکی مرتبه کسری خطای ξ_3 در (40) به صورت (41) تعیین شده است:

$$V = \frac{1}{2} \xi_3^2 \quad (41)$$

از رابطه (41) مشتق مرتبه کسری گرفته و به صورت زیر (40) در آن جایگذاری خواهد شد:

$${}^c D_t^\alpha V = \frac{1}{2} {}^c D_t^\alpha \xi_3^2 \leq \xi_3 {}^c D_t^\alpha \xi_3 = -k_1 \xi_3^2 \quad (42)$$

براساس مسائل مطرح شده در پایداری لیاپانوف تعمیم یافته جدید، مشتق مرتبه کسری تابع کاندید لیاپانوف ${}^c D_t^\alpha V$ از یک عبارت منفی $(-k_1 \xi_3^2)$ کوچکتر است، در نتیجه سطح لغزش مرتبه کسری (24) دامنه محدود داشته و در نهایت به طور مجانبی به صفر همگرا خواهد شد.

2-2- قوانین کنترل تطبیقی

کنترل کننده مدلغزشی با مشخص بودن حد بالای اغتشاش‌های خارجی در مقابل آن‌ها عملکرد مناسبی خواهد داشت و این در حالی است که اگر اطلاعات دقیقی از حد بالای اغتشاش‌های خارجی وجود نداشته باشد نمی‌توان انتظار عملکرد صحیحی از کنترل مدلغزشی داشت [27][22]. از این رو با استفاده از قواعد کنترل تطبیقی می‌توان مشکل فوق را بر طرف نمود. بر این اساس ضرایب قانون کنترل سوئیچینگ (29) با استفاده از قوانین تطبیقی مناسب به صورت تطبیقی در طول عملکرد سیستم شناور مغناطیسی محاسبه خواهند شد. قانون کنترل تطبیقی را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$u = -(g(z))^{-1} [k_1 {}^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) - \dot{\phi}_2 + \tilde{K}_1 \sigma + \tilde{K}_2 \text{sign}(\sigma)] \quad (43)$$

تئوری 3. قانون کنترل (43) و قوانین تطبیق (44) و (45) را در نظر بگیرید، سیستم شناور مغناطیسی با سطح لغزش (24) و قوانین تطبیق مطرح شده و قانون کنترل طراحی شده با استفاده از روش کنترل پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی پایدار بوده و تمامی حالت‌های کنترل کننده به سطح لغزش تعیین شده همگرا خواهند شد.

$$\tilde{K}_1 = \gamma_1 \sigma^2 \quad (44)$$

$$\tilde{K}_2 = \gamma_2 |\sigma| \quad (45)$$

اثبات: تابع معین مثبت (46) براساس تئوری کنترل پسگام مدلغزشی برای اثبات پایداری سیستم با قانون کنترل (43) را در نظر بگیرید:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} \sigma^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{K}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{K}_2^2 \quad (46)$$

که $\tilde{K}_2 = \tilde{K}_2 - K_2$ و $\tilde{K}_1 = \tilde{K}_1 - K_1$ خطای تخمین ضرایب قانون کنترل می‌باشند. مشتق تابع معین مثبت (46) به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \sigma \dot{\sigma} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{K}_1 \dot{\tilde{K}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{K}_2 \dot{\tilde{K}}_2 \quad (47)$$

روابط (23) و (27) در (47) جایگذاری خواهد شد:

$$\dot{V}_3 = +\sigma (k_1 {}^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) + g(z)u - \dot{\phi}_2) - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 + \frac{1}{\gamma_1} (\tilde{K}_1 - K_1) \dot{\tilde{K}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} (\tilde{K}_2 - K_2) \dot{\tilde{K}}_2 + \xi_2 \dot{\xi}_3 \quad (48)$$

جایگذاری قانون کنترل (43) و قوانین تطبیق (44) و (45) در (48) نتیجه می‌دهد:

$$-\dot{\phi}_2 + g(z) \left[-(g(z))^{-1} (k_1 {}^c D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) - \dot{\phi}_2 + K_1 \sigma + K_2 \text{sign}(\sigma)) \right] \quad (34)$$

رابطه (34) ساده سازی شده و به صورت (35) بازنویسی می‌شود:

$$\dot{V}_3 = +\xi_2 \dot{\xi}_3 - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 - K_1 \sigma^2 - K_2 |\sigma| \quad (35)$$

براساس تئوری پایداری لیاپانوف برای اثبات پایداری یک سیستم می‌بایست مشتق تابع معین مثبت تعیین شده، معین منفی باشد، تمامی عبارات موجود در (35) دارای علامت قطعی هستند و تنها عبارت $\xi_2 \dot{\xi}_3$ علامت دقیق و مشخصی ندارد، در ادامه با استفاده از قواعد ماتریس‌های معین مثبت نشان داده خواهد شد که (35) همواره معین منفی بوده و سیستم پایدار مجانبی است، با جایگذاری سطح لغزش پیشنهادی (24) در (35) معادله فوق را می‌توان به صورت (36) بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & +\xi_2 \dot{\xi}_3 - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 - K_1 (k_1 {}^c D_t^{-\alpha} \xi_3 + \xi_3)^2 \\ & - K_2 |\sigma| = +\xi_2 \dot{\xi}_3 - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 - K_1 \xi_3^2 \\ & - K_1 (k_1 {}^c D_t^{-\alpha} \xi_3)^2 - 2K_1 k_1 \xi_3 {}^c D_t^{-\alpha} \xi_3 - K_2 |\sigma| \\ = & -E^T Q E - K_1 (k_3 {}^c D_t^{-\alpha} \xi_3)^2 - 2K_1 k_1 \xi_3 {}^c D_t^{-\alpha} \xi_3 \\ & - K_2 |\sigma| \end{aligned} \quad (36)$$

که $E = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3]$ و E برای این که مشتق تابع کاندید لیاپانوف (36) معین منفی باشد می‌بایست ماتریس Q معین مثبت باشد. در ادامه نشان داده می‌شود که ماتریس Q تحت شرایطی معین مثبت است. ماتریس Q به صورت (37) تعیین شده است:

$$Q = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & -0.5 \\ 0 & -0.5 & K_1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

برای آن که ماتریس Q معین مثبت باشد می‌بایست تمامی کهدهای اصلی مقدم¹ ماتریس Q مثبت باشند، تمامی کهدهای اصلی مقدم ماتریس Q به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \lambda_1 > 0, \quad \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{vmatrix} = \lambda_1 \lambda_2 > 0, \\ |Q| = \lambda_1 \begin{vmatrix} \lambda_2 & -0.5 \\ -0.5 & K_1 \end{vmatrix} = \lambda_1 \left(\lambda_2 K_1 - \frac{1}{4} \right) > 0 \end{aligned} \quad (38)$$

سرانجام در صورتی که ضریب λ_1 ، λ_2 و K_1 در شرایط (38) صدق کند ماتریس Q معین مثبت بوده و عبارت $-E^T Q E$ در مشتق تابع کاندید لیاپانوف (36) معین منفی خواهد شد. براساس لم موجود در [25]، عبارت $K_1 < 0$ و $-2K_1 k_1 \xi_3 {}^c D_t^{-\alpha} \xi_3 < 0$ در (36) معین منفی بوده و ضرایب k_1 و K_1 بزرگتر از صفر تعیین شده است. با توجه به تئوری پایداری لیاپانوف، سیستم شناور مغناطیسی با کنترل کننده پیشنهادی پایدار خواهد بود. تئوری 1 نشان داد که حالت‌های سیستم شناور مغناطیسی به سطح لغزش مرتبه کسری (24) همگرا خواهند شد و این در حالی است که همگرایی سطح لغزش مرتبه کسری (24) به صفر بررسی نشده است. در تئوری 2 همگرایی سطح لغزش مرتبه کسری به صفر بررسی خواهد شد. در بررسی پایداری سطح لغزش پیشنهادی (24) از تئوری پایداری لیاپانوف تعمیم یافته جدید و لم‌های ارائه شده در [26] استفاده خواهد شد.

تئوری 2. سطح لغزش مرتبه کسری (24) تعیین شده در طراحی کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری برای پایداری سیستم شناور مغناطیسی پایدار بوده و به $\sigma = 0$ همگرا خواهد شد.

اثبات: سطح لغزش مرتبه کسری را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\sigma(t) = k_1 {}^c D_t^{-\alpha} \xi_3 + \xi_3 = 0 \quad (39)$$

براساس خاصیت (4) در تعریف 4، از (39) مشتق مرتبه کسری گرفته و

¹ Leading principal minors

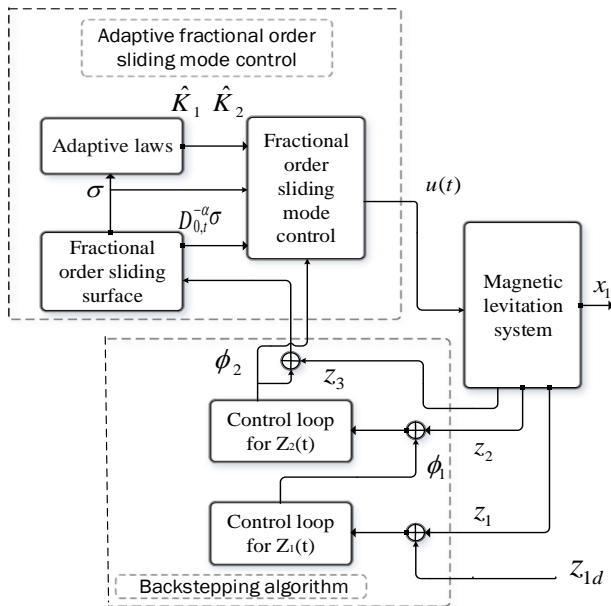


Fig. 1 Block diagram of proposed adaptive fractional order Backstepping sliding mode control

شکل 1 بلوک دیاگرام رویکرد کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی

جدول 1 پارامترهای مدل دینامیکی شناور مغناطیسی [14]

Table 1 Magnetic levitation system parameters in simulation [14]

واحد	مقدار	پارامتر
ms ⁻²	9.81	g_c
Ω	28.7	R
F	1.41×10^{-4}	C
H	0.65	L
g	12	m
m	0.033	$x_1(0)$
m/s	0	$x_2(0)$
A	0.6818	$x_3(0)$

جدول 2 پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی

Table 2 Proposed controller parameters

مقدار	پارامتر
23	λ_1
20	λ_2
53	γ_1
80	γ_2
0	$\hat{K}_1(0)$
0	$\hat{K}_2(0)$
0.1	k_1
0.6	α

مقایسه خواهد شد.

در بخش دوم عملکرد مقاوم کنترل کننده پیشنهادی در مقابل نویز اندازه گیری و اغتشاش خارجی اعمال شده به سیستم ارزیابی خواهد گردید. "شکل 2" نشان دهنده تغییرات ارتفاع توپ شناور مغناطیسی است که به منظور بررسی دقیق نحوه همگرایی ارتفاع توپ معلق به ارتفاع مطلوب، ارتفاع مطلوب توپ معلق به صورت متغیر با زمان در نظر گرفته شده است به نحوی که در زمانهای 15، 25 و 35 (ثانیه) تغییراتی در ارتفاع مطلوب توپ معلق ایجاد شده است نحوه تغییرات (افزایش و کاهش) ارتفاع مطلوب به گونه‌ای است که می‌تواند معیار مناسبی برای سنجش عملکرد ردیابی کنترل کننده باشد که همان‌طور که مشهود است کنترل کننده‌های AFTSMC و AFOBSMC سیستم شناور مغناطیسی را پایدار نموده و

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & \sigma(k_{10} D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) - \dot{\phi}_2 + g(z)(-g(z))^{-1} \\ & \times [k_{10} D_t^{1-\alpha} \xi_3 + f(z) - \dot{\phi}_2 + \hat{K}_1 \sigma + \hat{K}_2 \text{sign}(\sigma)]) \\ & + \frac{1}{\gamma_1} (\hat{K}_1 - K_1) \gamma_1 \sigma^2 + \frac{1}{\gamma_2} (\hat{K}_2 - K_2) \gamma_2 |\sigma| + \xi_2 \xi_3 \\ & - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 \end{aligned} \quad (49)$$

ساده‌سازی و حذف عبارات مشابه در (49) به (50) منتج خواهد شد:

$$\dot{V}_3 = -\hat{K}_1 \sigma^2 - \hat{K}_2 |\sigma| + (\hat{K}_1 - K_1) \sigma^2 + (\hat{K}_2 - K_2) |\sigma| + \xi_2 \xi_3 - \lambda_1 \xi_1^2 - \lambda_2 \xi_2^2 \quad (50)$$

$$\dot{V}_3 = -E^T Q E - K_2 |\sigma| \leq 0 \quad (51)$$

با توجه به مطالب مطرح شده پیرامون علامت رابطه (36) مشتق تابع کاندید لیاپانوف (51) تحت شرایط (38) معین منفی است و در نتیجه سیستم شناور مغناطیسی پایدار بوده و حالت‌های آن با اعمال کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی به سطح لغزش (24) همگرا می‌شود. "شکل 1" بلوک دیاگرام کلی کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی را نشان می‌دهد، که معرف ارتفاع مطلوب توپ شناور مغناطیسی می‌باشد و در واقع ورودی سیستم شناور مغناطیسی می‌باشد، براساس روند طراحی انجام شده در بخش 4 در ابتدا الگوریتم پسگام به سیستم شناور مغناطیسی اعمال شده است و در ادامه از خطای دینامیکی ξ_3 که توسط الگوریتم پسگام به دست آمده است سطح لغزش مرتبه کسری طراحی می‌شود. در طراحی کنترل کننده مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی از قانون شبه کنترلی ϕ_2 استفاده شده و در نهایت با استفاده از قوانین کنترل مدلغزشی مرتبه کسری سیگنال کنترل $u(t)$ محاسبه گردیده است.

5- نتایج و شبیه‌سازی

در این بخش کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی طراحی شده برای سیستم شناور مغناطیسی با مدل ماگلو در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی بیانگر عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله می‌باشد. نتایج کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع تطبیقی [14] مقایسه خواهد شد. روابط سطح لغزش و قانون کنترل، کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع تطبیقی در (52)، (53) و (54) براساس مقاله [14] ارائه شده است، جزئیات روند طراحی کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع تطبیقی را می‌توان در [14] مشاهده نمود. سطح لغزش کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع تطبیقی براساس [14] به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\sigma = \dot{S} + k_1 S^a + k_2 S \quad (52)$$

که متغیر S به‌صورت زیر تعیین شده است:

$$S = z_2 + \lambda_1 z_1 + \lambda_2 \int z_1 dt \quad (53)$$

$$u = -\frac{1}{g(z)} (f(z) + \lambda_1 z_3 + \lambda_2 z_2 + k_1 \frac{a}{b} S^{a-1} \dot{S} + k_2 \dot{S} + \dot{\mu} \sigma + \hat{\lambda} \text{sign}(\sigma)) \quad (54)$$

که در آن λ_1 ، λ_2 و k_1 و k_2 ثابت‌های مثبت می‌باشد، و a و b اعدادی مثبت و فرد می‌باشند. پارامترهای مدل دینامیکی شناور مغناطیسی که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته، در جدول 1 ارائه گردیده و پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی نیز در جدول 2 ارائه شده است. پارامترهای کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع تطبیقی در جدول 3 ارائه شده است. فرآیند شبیه‌سازی در دو بخش صورت گرفته است که در بخش اول پایدارسازی و ردیابی کنترل کننده پیشنهادی بررسی شده و با کنترل کننده AFTSMC

¹ Matlab software

² Adaptive fast terminal sliding mode control (AFTSMC)

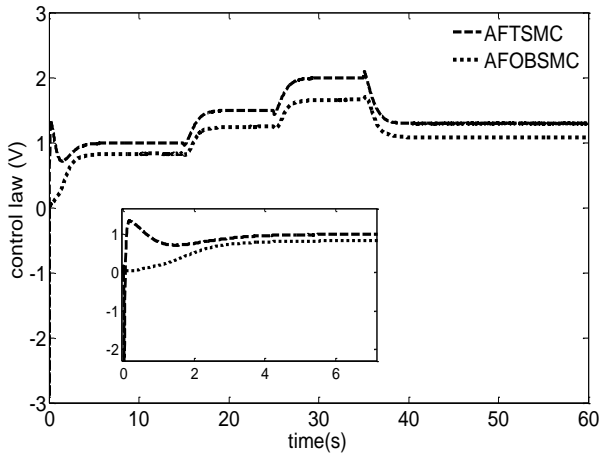


Fig. 3 Control law (coil voltage) in the magnetic levitation system with AFOBSMC and AFTSMC controllers

شکل 3 قانون کنترل (ولتاژ اعمال شده به سیم پیچ) در کنترل کننده AFOBSMC و AFTSMC

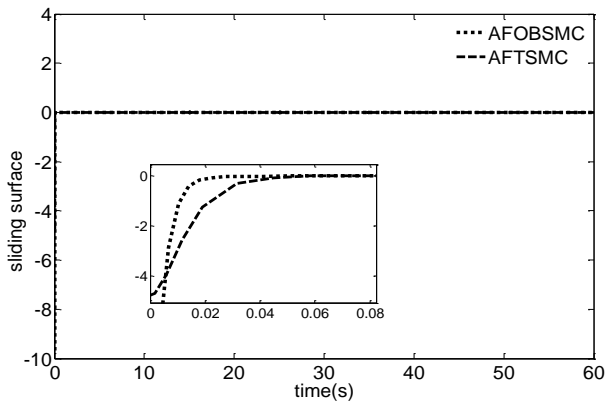


Fig. 4 Sliding surface (σ) for AFOBSMC and AFTSMC controllers

شکل 4 همگرایی سطوح لغزش تعیین شده در کنترل کننده AFOBSMC و AFTSMC

همگرا خواهد شد. "شکل 5" نمودار قوانین تطبیق تعیین شده در (44) و (45) را تبیین می‌نماید. با توجه به این شکل، قوانین تطبیق در همگرایی سریع خروجی سیستم تاثیر بسزایی داشته و در ردیابی آن نیز اثرگذار است به نحوی که در زمان تغییر ارتفاع مطلوب توپ شناور مغناطیسی، قوانین کنترل واکنش مناسبی را نشان داده و سبب همگرایی سریع تر خروجی سیستم شده اند.

5-1- ارزیابی عملکرد مقاوم در مقابل نویز و اغتشاش

کنترل کننده مدلغزشی به طور ذاتی در مقابل اغتشاش خارجی عملکرد مقاوم مناسبی را دارد که با ترکیب آن با الگوریتم پسگام و حسابان مرتبه کسری این ویژگی افزایش می یابد، که در ادامه نتایج شبیه سازی‌ها به وضوح این موضوع را نشان می‌دهد. برای ارزیابی عملکرد مقاوم کنترل کننده پیشنهادی، در ابتدا یک نویز اندازه‌گیری با میانگین صفر و واریانس 1 به سیستم اعمال شده است که نتایج نشان می‌دهد کنترل کننده پیشنهادی به خوبی توانسته در حضور نویز عملکرد مناسب سیستم را حفظ کند. با توجه به رابطه (12) یک اغتشاش d به مدت سه ثانیه و در ثانیه‌ی 45 به سیستم اعمال می‌شود که کنترل کننده پیشنهادی به خوبی آن را دفع می‌نماید. "شکل 6 (a) و (b)" نمودار تغییرات ارتفاع توپ شناور مغناطیسی با کنترل کننده‌های

ردیابی ارتفاع مطلوب توپ به خوبی انجام شده است. کنترل کننده پیشنهادی AFOBSMC سریعتر از کنترل کننده AFTSMC توپ معلق را به ارتفاع مطلوب رسانده است.

"شکل 3" قانون کنترل طراحی شده با استفاده از کنترل کننده پسگام مدلغزشی مرتبه کسری تطبیقی را نشان می‌دهد که با استفاده از رابطه (43) ایجاد شده است، قانون کنترل در سیستم شناور مغناطیسی در واقع ولتاژ اعمال شده به سیم پیچ ایجاد کننده میدان مغناطیسی می‌باشد همان طور که در شکل مشخص است کنترل کننده‌های AFOBSMC و AFTSMC دارای قانون کنترل هموار¹ هستند و اثری از پدیده لرزش سیگنال کنترل در قانون کنترل مشاهده نمی‌شود در "شکل 3" قانون کنترل ایجاد شده توسط کنترل کننده AFOBSMC دامنه کمتری نسبت به کنترل کننده AFTSMC داشته و به گونه ای با دامنه کمتری از ولتاژ اعمال شده به سیم پیچ (انرژی مصرفی کمتر) توانسته ردیابی سریعتری را ایجاد کند، در بخش بزرگنمایی شده مشخص است که کنترل کننده AFTSMC یک جهش ناگهانی داشته و این در حالی است که کنترل کننده AFOBSMC بدون جهش در لحظات اولیه سیستم شناور مغناطیسی را کنترل می نماید.

"شکل 4" نمودار تغییرات سطح لغزش مرتبه کسری تعیین شده (24) را نشان می‌دهد و همان طور که در تئوری 2 پایداری سطح لغزش مرتبه کسری به صورت تحلیلی بررسی شد در شبیه‌سازی‌ها نیز مشاهده می شود که سطح لغزش مرتبه کسری تعیین شده در زمان بسیار کوتاهی به صفر همگرا می‌شود در نتیجه تضمین می‌کند که خطای دینامیکی ξ_3 نیز به صفر

جدول 3 پارامترهای کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع تطبیقی

Table 3 AFTSMC controller parameters

پارامتر	مقدار
λ_1	32
λ_2	21
k_1	15
k_2	12
$\hat{\mu}(0)$	0
$\hat{\lambda}(0)$	0
a	5
b	7

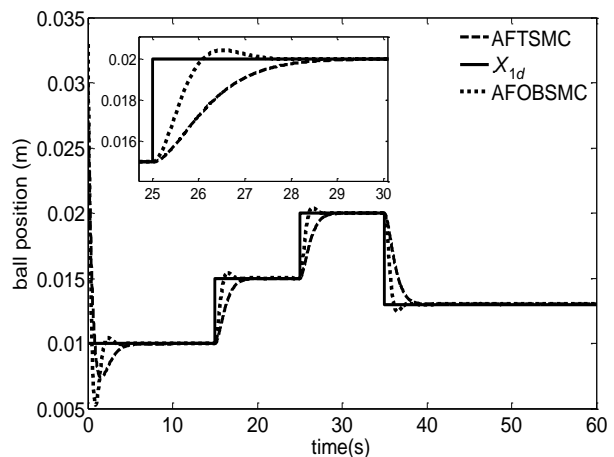


Fig. 2 Ball position in the magnetic levitation system with AFOBSMC and AFTSMC controllers

شکل 2 ارتفاع توپ شناور مغناطیسی با اعمال کنترل کننده های AFOBSMC و AFTSMC

¹ Smooth control law

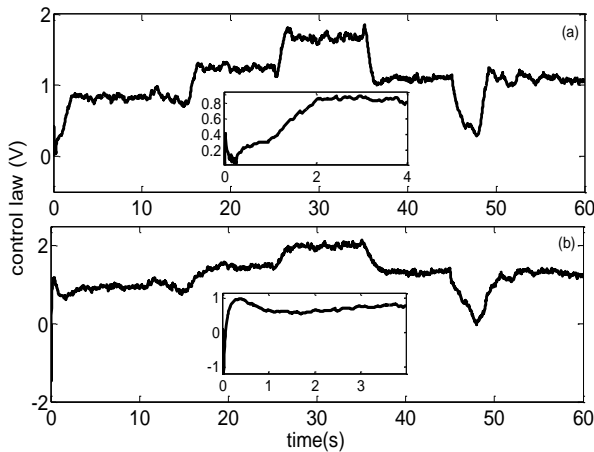


Fig. 7 Control law (coil voltage) in the magnetic levitation system with AFOBSMC (a) and AFTSMC (b) controllers under external disturbance and noise

شکل 7 قانون کنترل (ولتاژ اعمال شده به سیم پیچ) در کنترل کننده تحت نویز و اغتشاش خارجی (a) AFOBSMC و (b) AFTSMC

معلق در حضور نویز و اغتشاش انجام داده است.

برای مقایسه عملکرد مقاوم کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده ATFSMC از معیار انتگرال قدرمطلق خطا¹ استفاده شده است که در آن ارتفاع مطلوب توپ شناور مغناطیسی می‌باشد. معیار مذکور برای هر دو کنترل کننده در جدول 4 محاسبه شده است، با توجه به نتایج ارائه شده در جدول 4 کنترل کننده مدل‌غزشی تطبیقی با ترکیب الگوریتم پسگام و حسابان مرتبه کسری توانسته عملکرد مقاوم تری در ردیابی ارتفاع مطلوب توپ شناور مغناطیسی، دفع اغتشاش و دفع نویز ارائه دهد.

$$IAE = \int_0^T |x_1 - x_{1d}| dt \quad (55)$$

6- جمع بندی و نتیجه گیری

تکنولوژی شناورهای مغناطیسی ماگلو، یک تکنولوژی پرکاربرد و تاثیر گذار در صنایع مختلف می‌باشد که در آینده کاربردهای آن بسیار گسترده تر

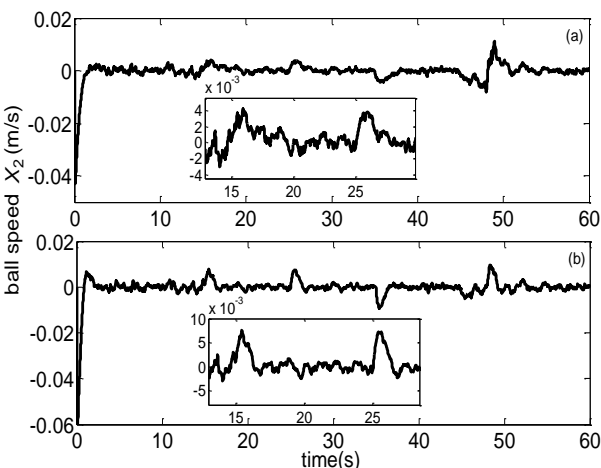


Fig. 8 Ball velocity (state variable x_2) in the magnetic levitation system with AFOBSMC (a) and AFTSMC (b) controllers under external disturbance and noise

شکل 8 سرعت توپ شناور مغناطیسی (متغیر حالت x_2) با کنترل کننده های (a) AFOBSMC و (b) AFTSMC تحت اغتشاش خارجی و نویز

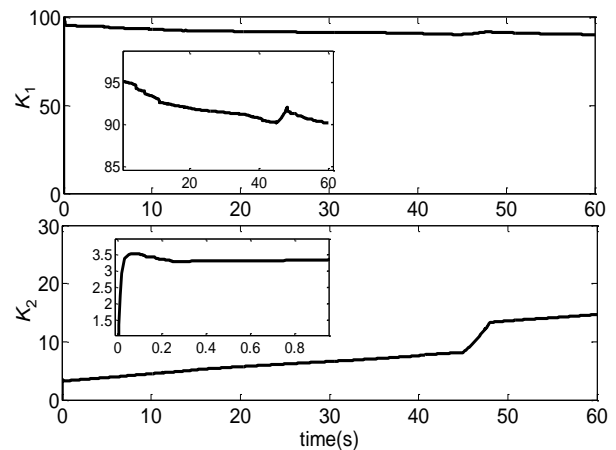


Fig.5 Adaptive gain for AFOBSMC controller

شکل 5 قوانین تطبیق در کنترل کننده AFOBSMC

AFTSMC و AFOBSMC را نشان می‌دهد که همان‌طور که مشهود است هر دو کنترل کننده توانسته‌اند به خوبی سیستم را در حضور نویز و اغتشاش پایدار نگه‌داشته و ردیابی مناسبی را ایجاد کنند. همان‌طور که مشهود است در ثانیه 45 که یک اغتشاش به سیستم وارد می‌شود، کنترل کننده AFOBSMC توانسته با سرعت بیشتری آن اغتشاش را دفع نماید و عملکرد مقاوم تری را نشان می‌دهد. "شکل 7 (a) و (b)" به ترتیب قانون کنترل اعمال شده به سیستم شناور مغناطیسی با کنترل کننده‌های AFOBSMC و AFTSMC را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشهود است، کنترل کننده AFOBSMC با دامنه ولتاژ اعمال شده به سیم‌پیچ بهینه‌تر سیستم شناور مغناطیسی را پایدار کرده (در بخش بزرگنمایی شده به وضوح این موضوع مشخص است) و عملکرد مقاوم مناسب تری را ارائه داده است، با اعمال اغتشاش d به سیستم شناور مغناطیسی قانون کنترل با عملکرد مناسب و به موقع آن را دفع می‌نماید. "شکل 8 (a) و (b)" تغییرات متغیر حالت x_2 از مدل دینامیک شناور مغناطیسی تحت کنترل کننده AFOBSMC و AFTSMC را در حضور نویز و اغتشاش نشان می‌دهد، سرعت توپ معلق با ثابت شدن میزان جابه‌جایی (موقعیت) توپ به صفر همگرا می‌شود و در زمانی که تغییراتی در ارتفاع مطلوب توپ ایجاد می‌شود باعث تغییر در سرعت توپ می‌گردد. کنترل کننده پیشنهادی عملکرد مناسبی در تثبیت سرعت توپ

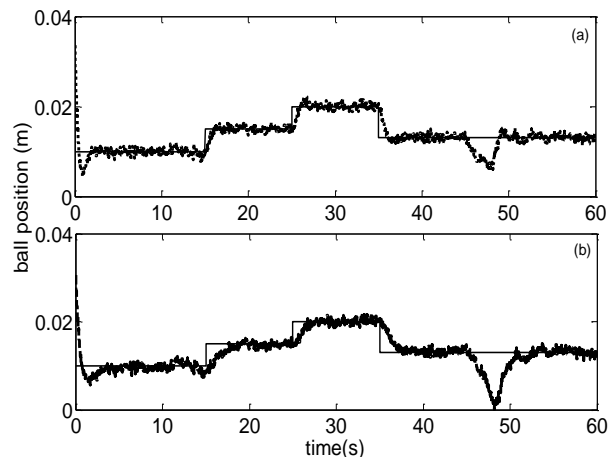


Fig. 6 Ball position in the magnetic levitation system with AFOBSMC (a) and AFTSMC (b) controllers under external disturbance and noise

شکل 6 ارتفاع توپ شناور مغناطیسی با کنترل کننده (a) AFOBSMC و (b) AFTSMC در حضور نویز و اغتشاش

¹ Integral absolute error

- [9] R. Morales, H. Sira-Ramirez, Trajectory tracking for the magnetic ball levitation system via exact feedforward linearisation and GPI control, *International Journal of Control*, Vol. 3, No. 6, pp. 1155-1166, 2010.
- [10] Ulbig, S. Olaru, D. Dumur, P. Boucher, Explicit nonlinear predictive control for a magnetic levitation system, *Asian Journal of Control*, Vol. 2, No. 3, pp. 434-442, 2010.
- [11] T. Bächle, S. Hentzelt, K. Graichen, Nonlinear model predictive control of a magnetic levitation system, *Control Engineering Practice*, Vol. 21, No. 9, pp. 1250-1258, 2013.
- [12] Y. Eroglu, Gunyaz Ablay, Cascade sliding mode-based robust tracking control of a magnetic levitation system, *Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 230, No. 8, pp. 1-10, 2016.
- [13] D. Ginoia, C. M. Gutte, P. Shendge, S. Phadke, State-and-disturbance-observer-based sliding mode control of magnetic levitation systems, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 38, No. 6, pp. 1-13, 2016.
- [14] N. Boonsatit, C. Pukdeboon, Adaptive Fast Terminal Sliding Mode Control of Magnetic Levitation System, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Vol. 27, No. 4, pp. 359-367, 2016.
- [15] Parsa, A. Kalhor, M. A. Amiri Atashgah, Backstepping control performance enhancement using close loop identification for quadrotor trajectory tracking, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 224-234, 2016. (in persian فارسی).
- [16] M. Navabi, S. Soleymanpour, Standard and Robust Backstepping Control of a Spacecraft with Inertial Uncertainty (revision), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 112-124, 2015. (in persian فارسی).
- [17] Fayazi, H. Ahmadi Noubari, H. Fatehi Marj, Synchronization of Chaotic Fractional-Order Genesio Tesi-Coulet Systems via Fractional-Order Adaptive Controller, *Journal of control*, Vol. 5, No. 4, pp.1-11, 2012. (in persian فارسی).
- [18] M. P. Aghababa, Synchronization and stabilization of fractional second-order nonlinear complex systems, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 80, No. 4, pp. 1731-1744, 2015.
- [19] Podlubny, *Fractional differential equations*, pp 78-82, California: Academic Press, 1999.
- [20] C. Li, W. Deng, Remarks on fractional derivatives, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 187, No. 2, pp. 777-784, 2007.
- [21] M. Aliasghary, M. Teshnehlab, A. Jalilvand, M. Aliyari Shoorehdeli, M.A. Nekoui, Hybrid Control of Magnetic Levitation System Based-on New Intelligent Sliding Mode Control, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, No. 14, pp. 2561-2568, 2008.
- [22] F. Yousefi, Kh. Alipour, B. Tarvirdizadeh, A. Hadi, Control of knee rehabilitation robot based on combination of backstepping and admittance algorithms, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 135-143, 2016. (in persian فارسی).
- [23] S. Mobayen, An adaptive chattering-free PID sliding mode control based on dynamic sliding manifolds for a class of uncertain nonlinear systems, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 82, No. 1, pp. 53-60, 2015.
- [24] S. Shakki, M. R. Zakerzadeh, Modeling and control of a shape memory alloy actuator using fuzzy sliding mode controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 353-360, 2016. (in persian فارسی).
- [25] M. Mohadeszadeh, H. Delavari, Synchronization of uncertain fractional-order hyper-chaotic systems via a novel adaptive interval type-2 fuzzy active sliding mode controller, *International Journal of Dynamics and Control*, Vol. 3, pp. 1-10, 2015.
- [26] N. Aguila-Camacho, M. A. Duarte-Mermoud, J. A. Gallegos, Lyapunov functions for fractional order systems, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, Vol. 19, No. 6, pp. 2951-2957, 2014.
- [27] Mottaehedi, A. Akbarzadeh Kalat, Adaptive robust sliding mode control of quadrotor in the presence of wind/disturbance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 95-102, 2016. (in persian فارسی).

جدول 4 مقایسه معیار عملکرد کنترل کننده AFTSMC و AFOBSMC

Table 4 Comparison between AFOBSMC and AFTSMC controllers

AFTSMC	AFOBSMC	کنترل کننده
3.391×10^{-2}	1.993×10^{-2}	IAE بدون اعمال اغتشاش و نویز
9.981×10^{-2}	3.164×10^{-2}	IAE در حضور اغتشاش و نویز

خواهد شد. مدل دینامیکی ماگلو یک مدل غیرخطی و ناپایدار است و در مقاله حاضر با بهره‌گیری از تئوری کنترل مدل‌غزشی، الگوریتم پسگام و حسابان مرتبه کسری یک روش مقاوم برای پایدارسازی سیستم شناور مغناطیسی ارائه شد و برای مقابله با اغتشاش‌ها با حد بالای نامشخص از کنترل تطبیقی استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مدل‌غزشی ترمینال سریع تطبیقی مقایسه شد. هم در مباحث تئوری و هم در شبیه‌سازی‌ها نیز به وضوح نشان داده شد که ترکیب الگوریتم پسگام و تئوری کنترل مدل‌غزشی تطبیقی با حسابان مرتبه کسری سبب افزایش عملکرد مقاوم کنترل کننده خواهد شد. به دلیل استفاده از الگوریتم پسگام و توابع هموار در قانون کنترل، در نتایج شبیه‌سازی اثری از پدیده لرزش سیگنال کنترل دیده نمی‌شود. برای بررسی عملکرد مقاوم کنترل کننده پیشنهادی اغتشاش و نویز به سیستم شناور مغناطیسی اضافه شد، که با توجه به نتایج شبیه‌سازی کنترل کننده پیشنهادی عملکرد مناسبی در مقابله با نویز و اغتشاش ارائه داد.

7- مراجع

- [1] H. Yaghoubi, The most important maglev applications, *Journal of Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-19, 2013.
- [2] Y. Qin, H. Peng, W. Ruan, J. Wu, J. Gao, A modeling and control approach to magnetic levitation system based on state-dependent ARX model, *Journal of Process Control*, Vol. 24, No. 1, pp. 93-112, 2014.
- [3] C. M. Lin, M. H. Lin, C. W. Chen, SoPC-based adaptive PID control system design for magnetic levitation system, *IEEE Systems Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 278-287, 2011.
- [4] F. Abdel-Hady, S. Abuelenin, Design and simulation of a fuzzy-supervised PID controller for a magnetic levitation system, *Studies in Informatics and Control*, Vol. 17, No. 3, pp. 315-328, 2008.
- [5] J. Baranowski, P. Piatek, Observer-based feedback for the magnetic levitation system, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 4, No. 4, pp. 422-435, 2012.
- [6] Ghosh, T. Rakesh Krishnan, P. Tejaswly, A. Mandal, J. K. Pradhan, S. Ranasingh, Design and implementation of a 2-DOF PID compensation for magnetic levitation systems, *ISA Transactions*, Vol. 53, No. 4, pp. 1216-1222, 2014.
- [7] I. Muresan, C. Ionescu, S. Folea, R. De Keyser, Fractional order control of unstable processes: the magnetic levitation study case, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 80, No. 4, pp. 1761-1772, 2015.
- [8] L.H.S. Torres, L. Schnitman, C.A.V.V. Junior, J.A.M. Felipe de Souza, Feedback linearization and model reference adaptive control of a magnetic levitation system, *Studies in Informatics and Control*, Vol. 21, No. 1, pp. 67-74, 2012.