

کنترل آشوب مبتنی بر ترکیب کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند با یک سطح لغزشی جدید و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

صفا خاری^۱، زهرا رحمانی^۲، بهروز رضایی^۳، سید جلیل ساداتی^۴

^۱ دانشجوی دکترا مهندسی برق کنترل، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، s.khari@stu.nit.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، zrahmani@nit.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، brezaie@nit.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، jsadati@nit.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۳/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۴/۷/۲۶)

چکیده: در این مقاله کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند با یک سطح لغزشی جدید مبتنی بر سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، برای کنترل آشوب پیشنهاد می گردد. ابتدا برای یک کلاس از سیستم های دارای آشوب با نامعینی و اغتشاش یک کنترل کننده مبتنی بر کنترل مد لغزشی ترمینال بر اساس تئوری لیاپانوف با یک سطح لغزش جدید طراحی می گردد. سطح لغزش پیشنهاد شده در این روش، ترکیبی از سطح لغزش مد لغزشی ترمینال متداول و انتگرال تابعی غیرخطی از حالات سیستم است و هدف از انتخاب آن، داشتن سرعت پاسخ مناسب و کاهش چترینگ در کنار مقاومت در برابر اغتشاشات خارجی است. سپس با فرض این که قسمتی از دینامیک سیستم نامعلوم باشد و فقط بخشی از اطلاعات ورودی-خروجی آن در دسترس است، از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی برای تقریب دینامیک نامعلوم سیستم براساس داده های ورودی-خروجی استفاده می گردد. به منظور بهبود عملکرد روش پیشنهادی، از الگوریتم زنبور عسل جهت انتخاب ضرایب کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی استفاده می گردد. نتایج شبیه سازی نشان دهنده کارایی این کنترل کننده از لحاظ سرعت مناسب، حذف چترینگ، پاسخ گذرای مطلوب و عملکرد قابل قبول در مواجهه با عدم قطعیت های موجود در مدل سیستم می باشد.

کلمات کلیدی: آشوب، کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی، سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، الگوریتم زنبور، چترینگ

Chaos Control based on Combination of Integral Terminal Sliding Mode with a New Sliding Surface and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

Safa Khari, Zahra Rahmani, Behrooz Rezaie, Jalil Sadati

Abstract: In this paper, an intelligent integral terminal sliding mode control method with a new sliding surface is proposed based on adaptive neural-fuzzy inference. First, a terminal sliding mode controller using a novel sliding surface is designed based on Lyapunov's stability theorem for controlling a class of chaotic systems in presence of uncertainty and disturbance. The proposed sliding surface is a combination of the conventional terminal sliding surface and integral of a nonlinear function of the states of the system. The purpose of choosing this surface includes achieving appropriate response speed, removing chattering and robustness against external disturbance. Then, we assume that a nonlinear part of the system is unknown and only input-output data is available. Therefore, an adaptive neuro-fuzzy inference system is used to approximate the unknown part of the system dynamics. Finally, in order to enhance the performance of the proposed method, the honey bee algorithm is utilized for selecting the coefficients of integral terminal sliding mode controller. The simulation results show the effectiveness of the controller due to the improved speed, removed chattering, appropriate transient response and satisfactory performance in the presence of uncertainties in the system model.

Keywords: Chaos, Terminal sliding mode controller, Adaptive neuro-fuzzy inference system, Honey bee algorithm, Chattering.

۱- مقدمه

کنترل پدیده آشوب، به علت رفتار پیچیده و ناپایدار آن و کاربردهای فراوان در بسیاری از سیستم‌های صنعتی و در علوم مختلف از جمله شبکه‌های عصبی [۱]، شبکه‌های غیرخطی [۲]، لیزر [۳] و موارد بسیار دیگر، مورد توجه محققان قرار گرفته است. مفهوم آشوب یکی از مفاهیم بنیادی علم نوین است که پدیده‌ای به ظاهر تصادفی و پیچیده است که در باطن طبیعتی قطعی دارد. به عبارت دیگر از یک معادله دیفرانسیل ساده می‌توان رفتارهای بسیار پیچیده‌ای را انتظار داشت. در سالهای اخیر انواع مختلفی از سیستم‌های آشوبناک به علت اهمیت زیاد این پدیده، معرفی و بررسی شده‌اند که می‌توان به سیستم‌های آشوب لورنز^۱، چن^۲ و ... اشاره نمود [۴و۵]. معادلات دیفرانسیل مربوط به این سیستم‌ها به ظاهر ساده می‌نمایند. ولی طبق تجزیه و تحلیل مربوط به این سیستم‌ها در مراجع مربوطه، دارای رفتار آشوبی و پیچیده می‌باشند.

سیستم‌های آشوبی دارای ویژگی‌های مختلفی هستند که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آشوب حساسیت زیاد به شرایط اولیه است. در سیستم‌های آشوبناک، تفاوت بسیار کوچکی در شرایط اولیه باعث تفاوت بسیار در وضعیت آن در لحظات بعد خواهد شد. لذا کنترل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های زیادی برای کنترل پدیده آشوب معرفی گردیده است که با توجه به اهداف کنترلی مورد نظر می‌توان از آن‌ها بهره جست. روش‌هایی مانند کنترل مد لغزشی، کنترل فازی، کنترل عصبی و از جمله کنترل‌کننده‌هایی می‌باشند که کاربردهای زیادی در این حوزه دارند.

روش کنترل مد لغزشی^۳ یک روش ساده برای کنترل مقاوم سیستم‌های غیرخطی می‌باشد که روشی مناسب برای مسئله حفظ پایداری و عملکرد بکنواخت در رویارویی با عدم قطعیت در مدل‌سازی است. کنترل مد لغزشی ویژگی‌های قابل توجهی در کنترل سیستم‌ها از جمله سادگی طراحی، پیاده‌سازی آسان و کم‌هزینه و مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت غیرساختاریافته دارد [۶].

در سال‌های اخیر روش مد لغزشی به شاخه‌های زیادی تقسیم گشته است. ایده کنترل مد لغزشی با تعریف یک سطح لغزش همراه است که با کنترل مناسب بتوان سیستم را به روی آن همگرا نمود و پایداری سیستم را تضمین کرد. جهت بهبود این روش از نظر کاهش پدیده چترینگ و نیز افزایش پایداری زمان محدود، روش‌های مشابه دیگری از این شاخه پدید آمده است. از روش‌های شاخه مد لغزشی می‌توان به مد لغزشی ترمینال^۴، مد لغزشی انتگرالی^۵ و یا ترکیب‌های دیگری از این قبیل اشاره نمود که هر کدام از آن‌ها با تعریف سطح لغزشی خاص خود، کنترل سیستم را میسر می‌سازند.

همانطور که گفته شد، مد لغزشی ترمینال روشی برای کنترل سیستم بر پایه تعریف سطح لغزش خاص خود است که در این روش برخلاف روش مد لغزشی، سطح لغزش به صورت غیرخطی و نمایی تعریف می‌شود و به همین علت، سرعت بیشتری در همگرایی حالات سیستم به روی سطح لغزش دارد [۷]. همچنین این روش خود به شاخه‌های مختلفی تقسیم‌بندی شده است که هر کدام از این شاخه‌ها با یک هدف کنترلی مشخص ارائه شده است [۸]. با گسترش روش کنترلی مد لغزشی ترمینال، زیرشاخه‌های مختلفی از آن پدید آمد که هر کدام اهداف متفاوتی را دنبال می‌کردند. برای مثال در مرجع [۹] مد لغزشی ترمینال مرتبه اول بر روی سیستم‌های غیرخطی مرتبه دوم اعمال گردید. همچنین در [۱۰] یو و مان روش مد لغزشی ترمینال را به سیستم‌های تک ورودی- تک خروجی خطی و مرتبه بالا تعمیم دادند. سپس مد لغزشی ترمینال کلی برای سیستم‌های چند ورودی- چند خروجی خطی معرفی شد. سپس یو و مان مد لغزشی ترمینال سریع^۶ را معرفی کردند که توانایی همگرایی سریع حالات را بر روی سطح لغزش داشت [۱۱، ۱۲]. در [۱۳، ۱۴] مد لغزشی ترمینال نامنفرد^۷ معرفی شد که باعث اجتناب از رخ دادن تکینی می‌شود. همچنین در سال‌های بعد مد لغزشی ترمینال با ترکیب مفاهیم قبلی بدست آمده معرفی شد که می‌توان به مد لغزشی ترمینال سریع- نامنفرد^۸ برای سیستم‌های مرتبه دوم اشاره کرد که هردو ویژگی گفته شده در این کنترل‌کننده وجود دارد [۸]. همچنین در سال‌های بعد و در [۷] روش مد لغزشی ترمینال نامنفرد با همگرایی زمان محدود برای دو کلاس از سیستم‌های غیرخطی و غیرخودگردان مرتبه بالا ارائه شد.

به عنوان جمع‌بندی مزایا و معایب روش‌های مد لغزشی ترمینال، می‌توان گفت روش‌های نامنفرد، از ویژگی همگرایی زمان محدود برخوردار نیستند و سرعت همگرایی کمی در مقایسه با روش‌های مد لغزشی ترمینال سریع دارند. همچنین روش مد لغزشی ترمینال سریع دارای یک عیب مهم می‌باشد که همان احتمال وقوع تکینی در کنترل سیستم است. همچنین روش‌های کنترل مد لغزشی ترمینال سریع-نامنفرد نیز اغلب برای سیستم‌های مرتبه دوم معرفی گردیده است و برای سیستم‌های مرتبه بالا، روش کنترلی در این شاخه معرفی نشده است. همچنین در روش ارائه شده در [۷]، علیرغم معرفی روش کنترلی نامنفرد و زمان محدود برای سیستم‌های مرتبه بالا، اثر نامعینی و اغتشاش غیرساختاریافته جمعی سازگار در نظر گرفته نشده است که در مرجع [۱۵] این مشکل نیز برطرف گردیده است. اما با وجود تمام مزایایی که روش کنترل مد لغزشی ترمینال معرفی شده در [۱۵] از آن برخوردار است، که از مهمترین آنها می‌توان به همگرایی زمان محدود، در نظر گرفتن اثر نامعینی و اغتشاش غیرساختاریافته و عمومی بودن روش برای سیستم‌های مراتب بالا اشاره نمود، از عیب‌های عمده این روش وجود پدیده چترینگ در این روش کنترلی می‌باشد که این پدیده در تمام روش‌های مد لغزشی و مد

¹ Lorenz system² Chen system³ Sliding mode control⁴ Terminal sliding mode control⁵ Integral sliding mode control⁶ Fast terminal sliding mode control⁷ Nonsingular terminal sliding mode control⁸ Nonsingular fast terminal sliding mode control

حضور عدم قطعیت‌های موجود در مدل سیستم و اغتشاشات ناگهانی است و پاسخی مناسب با نوسانات بسیار کم تولید می‌نماید. در حقیقت با طراحی این کنترل‌کننده ترکیبی هوشمند، سعی بر این است که تمام اهداف کنترلی مطلوب از جمله زمان نشست حالات سیستم، پاسخ گذرا، مسئله چترینگ و پاسخ سیستم در حضور عدم قطعیت‌های موجود، بهبود یابد. به منظور مقایسه‌ای میان روش کنترلی مطرح‌شده در این مقاله و روش‌های کنترل کلاسیک پیشین نظیر مد لغزشی ترمینال، نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعمال روش کنترلی مد لغزشی ترمینال بر روی سیستم کولت نیز آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی روش‌های کنترلی ذکرشده بر روی سیستم کولت، نشان‌دهنده کارایی و عملکرد مناسب کنترل‌کننده طراحی‌شده در این مقاله خواهد بود.

ساختار مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش ۲ سیستم تحت مطالعه توصیف می‌گردد. در بخش ۳ توضیحات مربوط به کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند پیشنهادی آورده می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد و همچنین بخش ۵ شامل نتیجه‌گیری نهایی از روش تحت مطالعه است.

۲- توصیف سیستم

سیستم کولت الکویی از یک سیستم آشوبگونه ارائه می‌دهد که در فضای حالت شامل سه معادله دیفرانسیلی غیرخطی وابسته به چهار متغیر مثبت می‌باشد که توسط کولت و آرندو^۳ معرفی شده است [۱۷]. معادله دینامیکی آرندو-کولت رابطه (۱) را در نظر بگیرید [۱۸].

$$\ddot{X} + b_3 \ddot{X} + b_2 \dot{X} + b_1 X + b_4 X^3 = 0 \quad (1)$$

بر اساس پژوهش کاملی که توسط کولت و آرندو انجام شد، این سیستم در برخی از محدوده‌های پارامتری حالات آشوبگونه از خود بروز می‌دهد [۱۷ و ۱۸]. با در نظر گرفتن مقادیر پارامترها بصورت رابطه (۲) عملکرد آشوبگونه در سیستم به‌وجود خواهد آمد که یکی از مجموعه مقادیر پارامترها به صورت زیر است:

$$b_1 = -0.8, b_2 = 1.1, b_3 = 0.45, b_4 = 1 \quad (2)$$

با توجه به رابطه (۱) و با در نظر گرفتن حالات سیستم به صورت $\dot{X} = X_1, \ddot{X} = X_2, \ddot{\ddot{X}} = X_3$ ، معادلات دینامیکی این سیستم را می‌توان به صورت رابطه (۳) و به فرم فضای حالت بازنویسی کرد. همچنین پرتره فاز سیستم در شکل ۱ آورده شده است.

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ \dot{X}_3 &= -b_1 X_1 - b_2 X_2 - b_3 X_3 - b_4 X_1^3 \end{aligned} \quad (3)$$

لغزشی ترمینال نیز دیده می‌شود و ناشی از وجود قسمت ناپیوسته در کنترل سیستم و سوئیچینگ‌های فرکانس بالای سیگنال کنترل می‌باشد که رفع این پدیده در سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۶]. بنابراین با به کارگیری روش‌های مد لغزشی ترمینال و با استفاده از ویژگی‌های مثبتی که در این روش‌ها وجود دارد در کنار رفع عیب مهم آن که همان پدیده چترینگ است، می‌توان سیستم کنترلی مناسبی را در اختیار گرفت.

در این مقاله به منظور کنترل پایداری مطلوب حالات سیستم، در حضور عواملی همچون عدم قطعیت غیرساختاریافته، اغتشاش خارجی و همچنین کاهش پدیده چترینگ در کنار برخورداری از سرعت پاسخ مناسب، کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند^۱ طراحی می‌شود که سطح لغزش آن در این روش برای اولین بار در این مقاله پیشنهاد گردیده است. ابتدا به منظور پایداری سیستم، بر اساس تئوری لیاپانوف یک کنترل‌کننده مبتنی بر کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی پیشنهاد می‌گردد که سطح لغزش پیشنهادشده در این روش، ترکیبی از سطح لغزش مد لغزشی ترمینال و انتگرال تابعی غیرخطی از حالات سیستم در نظر گرفته می‌شود که برای اولین بار در این مقاله پیشنهاد شده است و هدف از انتخاب آن، داشتن سرعت پاسخ مناسب، کاهش چترینگ در کنار مقاومت در برابر اغتشاشات خارجی است. به علاوه به منظور بهبود در حالتی که بخشی از دینامیک سیستم نامعلوم است و فقط به اطلاعات ورودی-خروجی آن دسترسی داریم، این کنترل‌کننده با سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی^۲ (ANFIS) برای اولین بار در این مقاله ترکیب می‌گردد. سیستم استنتاج شبکه فازی-عصبی تطبیقی به منظور تقریب بخشی از دینامیک سیستم که نامعلوم است، به کار برده می‌شود و با تقریب آن، کنترل‌کننده مناسب جهت پایداری در سیستم آشوب کولت که می‌تواند بیانگر یک کلاس خاص از سیستم‌های غیرخطی و در عین حال دارای آشوب باشد، ارائه می‌گردد. به منظور بهبود عملکرد کنترلی و صرفه جویی در زمان طراحی، از الگوریتم زنبور عسل جهت انتخاب ضرایب کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی استفاده خواهد شد. در این الگوریتم امکان جستجوی سراسری در هر تکرار وجود دارد و این مزیت باعث می‌شود که علاوه بر نقاط بهینه که در هر تکرار بدست می‌آید، الگوریتم به طور مجدد نقاط جدیدی در کل فضای جستجو را تولید نماید و همواره در کل فضا به دنبال پاسخ مطلوب باشد. بنابراین امکان گرفتن شدن آن در حداقل‌های محلی بسیار کم می‌باشد که از نقاط قوت این الگوریتم می‌باشد.

از مزایای این روش می‌توان به سرعت بالای همگرایی و پاسخ بدون چترینگ آن اشاره نمود که به علت انتخاب سطح لغزش جدید میسر گردیده است. همچنین به علت اعمال شبکه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی به منظور تقریب دینامیک نامعلوم، روش پیشنهادی قادر به پایداری در

¹ Intelligent integral terminal sliding mode control

² Adaptive neuro-fuzzy inference system

³ Arneodo and Coullet

که در آن:

$$\underline{X} = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T \quad b(\underline{X}) = [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$f(\underline{X}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.8 & -1.1 & -0.45 \end{bmatrix} \underline{X} \quad (۸)$$

۳- کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند

روش کنترل مد لغزشی ترمینال روشی قوی از لحاظ مطلوب بودن زمان نشست، پاسخ مناسب به عدم قطعیت و اغتشاش خارجی و سادگی طراحی و اجرا در سیستم است. اما مشکل عمده آن مسئله چترینگ می-باشد که در سیستم‌های کنترلی ویژگی نامطلوبی است و باید برای کاهش اثرات آن روشی مناسب به کار گرفته شود. به علاوه این روش کنترلی، به مدل نسبتاً دقیق از سیستم نیاز دارد، در واقع و در مواردی که سیستم مورد مطالعه دارای دینامیک نامعلوم است، می‌باشد باید از سیستمی جهت تقریب بخش نامعلوم استفاده شود. در این بخش، ابتدا درباره روش مد لغزشی ترمینال بطور مختصر توضیح داده می‌شود. سپس به بررسی روش مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند پرداخته می‌شود.

در روش مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند ارائه شده، یک رابطه جدید برای سطح لغزش پیشنهاد شده است که ترکیبی از سطح لغزش مد لغزشی ترمینال و انتگرال تابعی غیرخطی از حالات سیستم است که پارامترهای این رابطه با الگوریتم ژنور محاسبه می‌شود. به منظور حفظ تمام اهداف کنترلی ذکر شده مانند زمان نشست مطلوب حالات و حذف چترینگ در کنار بهبود پاسخ گذرای سیستم و پاسخ مناسب در حضور نامعنی‌های موجود در سیستم، ایده ترکیب کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی مطرح می‌گردد. سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی با هدف تقریب بخش نامعلوم سیستم و حذف برخی از ترم‌های نامعلوم سیستم در مشتق تابع لیاپانوف و غلبه بر نامعنی و اغتشاش طراحی خواهد شد. همچنین دینامیک باقی‌مانده توسط کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی همگرا به نقطه تعادل می‌گردد. شکل ۲ دیاگرام بلوکی مربوط به این کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۱-۳ کنترل مد لغزشی ترمینال

در سال‌های اخیر انواع مختلفی از روش‌های کنترل مد لغزشی معرفی شده است که هر کدام مزیت‌هایی نسبت به دیگر روش‌ها دارند. در مقاله [۱۵] برای کنترل آشوب از روشی مبتنی بر کنترل مد لغزشی ترمینال برای کلاسی از سیستم‌های غیرخطی مرتبه سه نامتغیر با زمان در حضور نامعنی و اغتشاش خارجی بهره برده شده است. در این روش سطح لغزش، تابعی نامی از حالت‌های سیستم می‌باشد که توان‌ها کسری و صورت و مخرج کسرها اعدادی فرد می‌باشند. در روش ارائه-

مولفه‌های بردار حالت سیستم، $\underline{X} = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T$ می-باشند. نقاط تعادل سیستم توصیف شده، به صورت $[0 \ 0 \ 0]^T$ و $\pm \sqrt{-\frac{b_1}{b_4}} [X_{1e} \ 0 \ 0]^T$ و یا در حالت کلی $[X_{1e} \ 0 \ 0]^T$ است.

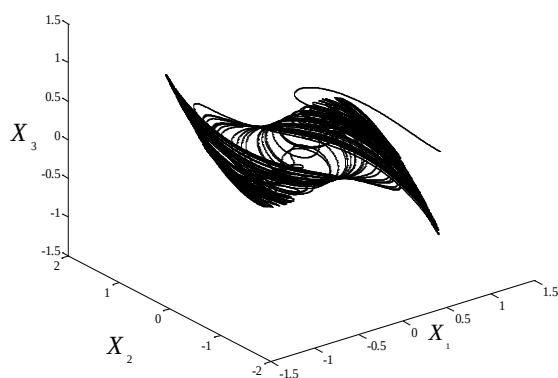
با تشکیل ماتریس ژاکوبین سیستم بصورت

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -b_1 - 3b_4 X_{1e}^2 & -b_2 & -b_3 \end{bmatrix}$$

معادله (۲)، معادله مشخصه سیستم را به صورت رابطه (۴) است.

$$\lambda^3 + 0.45\lambda^2 + 1.1\lambda - 0.8 + 3X_{1e}^2 = 0 \quad (۴)$$

با تشکیل جدول راث هرویتس می‌توان مشاهده کرد که نقطه تعادل صفر سیستم ناپایدار است. با اضافه شدن سیگنال کنترل جهت کنترل آشوب و پایداری سازی سیستم، به سومین جمله معادلات حالت سیستم و همچنین با در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای رابطه (۲)، سیستم بدست خواهد آمد.



شکل ۱: پرتو فاز سیستم آشوبناک کولت

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ \dot{X}_3 &= 0.8X_1 - 1.1X_2 - 0.45X_3 - X_1^3 + u(t) \end{aligned} \quad (۵)$$

به منظور طراحی کنترل‌کننده، سیگنال کنترل $u(t)$ ، به شکل معادله (۶) در نظر گرفته می‌شود. این انتخاب باعث جدا شدن بخش خطی و غیرخطی سیستم کولت می‌شود.

$$\begin{aligned} u(t) &= u_1(t) + u_2(t) \\ u_1(t) &= X_1^3 \end{aligned} \quad (۶)$$

بنابراین سیستم می‌تواند به صورت رابطه (۷) بازنویسی شود.

$$\dot{\underline{X}} = f(\underline{X}) + b(\underline{X})(u_2(t)) \quad (۷)$$

برای سیستم (۹) و $n=3$ ، می‌توان توابع $h(\underline{X})$ و $S(\underline{X})$ را به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) در نظر گرفت.

$$h(X_1, X_2) = -aX_1^{q_1} - bX_2^{q_2} \quad (14)$$

$$S(\underline{X}) = X_3^3 + aX_1^{q_1} + bX_2^{q_2} \quad (15)$$

p_i و q_i اعدادی مثبت و فرد می‌باشند و $p_i < q_i$. همچنین a, b ثابت‌های حقیقی هستند.

در صورتی که قانون کنترل بصورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته شود، سیستم در برابر نامعینی و اغتشاشات وارده پایدار مقاوم خواهد بود [۱۵].

۲-۳ کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند

طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی شامل دو گام اساسی شامل انتخاب سطح لغزش مناسب و تعریف قانون کنترل است. سطح لغزش پیشنهادی در این روش که انتخاب جدیدی نیز می‌باشد، برای سیستم رابطه (۱۶)، به صورت رابطه (۱۷) معرفی می‌گردد.

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ \dot{X}_3 &= f_3(\underline{X}) + u_{ITSM}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

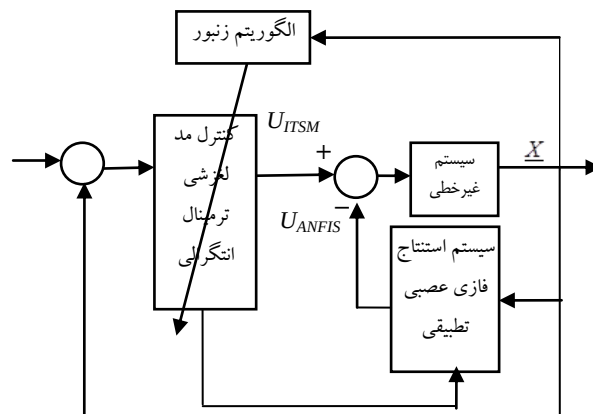
$$S(t) = X_3(t) + aX_1^{q_1} + bX_2^{q_2} + \int (c_1X_1 + c_2X_1^\beta) dt \quad (17)$$

در رابطه (۱۶)، $f_3(\underline{X})$ تابعی نامعلوم می‌باشد. در رابطه (۱۷) توان‌های p_1, q_1, p_2, q_2 اعداد مثبت فرد باشند و $p_1 < q_1, p_2 < q_2$ می‌باشند. همچنین ضرایب a, b, c_1, c_2, β پارامترهای طراحی می‌باشند که به کمک الگوریتم زنیور تعیین می‌گردند.

سطح لغزش معرفی شده رابطه (۱۷)، ترکیبی از سطح لغزش کنترل مد لغزشی ترمینال بحث شده در بخش قبل و انتگرال تابعی از حالات سیستم در نظر گرفته شده است که در آن $1 < \beta < 2$ در نظر گرفته شده است. قانون کنترل این روش، ترکیبی از قانون کنترل ناشی از ANFIS و کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی خواهد بود که از تابع لیپانوف سیستم بدست می‌آید.

با در نظر گرفتن سطح لغزش رابطه (۱۷)، مشتق آن بصورت رابطه (۱۸) می‌باشد.

شده در [۱۵]، برای سیستم غیرخطی رابطه (۹)، سطح لغزش مطابق معادله (۱۰) تعریف می‌شود.



شکل ۲: دیاگرام بلوکی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= f_1(\underline{X}) \\ &\vdots \\ \dot{X}_{n-1} &= f_{n-1}(\underline{X}) \\ \dot{X}_n &= f_n(\underline{X}) + d(t) + \Delta f + u \end{aligned} \quad (9)$$

$$|d(t)| \leq \gamma, |\Delta f| \leq \alpha$$

$$S(\underline{X}) = X_n - h(X_1, \dots, X_{n-1}) \quad X(0) = 0 \quad (10)$$

که $h(X_1, \dots, X_{n-1})$ تابعی پیوسته است که شرط نامساوی (۱۱) را برآورده می‌سازد.

$$|h(X_1, \dots, X_{n-1})| < K_0 + L_0 \sum_{i=1}^{n-1} |X_i| \quad (11)$$

که در آن K_0, L_0 ثابت‌های مثبت هستند.

طبق این روابط، سیستم (۹) طبق قانون کنترل تعریف شده در رابطه (۱۲)، در زمانی محدود به سطح لغزش رابطه (۱۰) خواهد رسید.

$$u(t) = -f_n(\underline{X}) + v(t) \quad (12)$$

که در آن:

$$v(t) = -K_{TSM} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} |f_i(\underline{X})| \right) \text{sgn}(S) \quad (13)$$

$$K > \max \{L_0, 1\} \quad S \neq 0$$

$$u_{ANFIS} = -\hat{f} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، همان سیگنال تخمین زده شده به طور آنلاین در سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی می باشد. حال با استفاده از روابط (۱۸) تا (۲۲) رابطه (۲۳) بدست می آید.

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{q_1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{q_2} X_3 \\ &+ c_1 X_1 + c_2 X_1^\beta + u_{IITSMC} = f + u_{IITSMC} \\ &= f + u_{ANFIS} + u_{ITSM} = f - \hat{f} + u_{ITSM} \\ &= e + u_{ITSM} \end{aligned} \quad (23)$$

بنابراین با توجه به روابط (۲۰) و (۲۳) می توان رابطه (۲۴) را نتیجه گرفت.

$$\dot{S}(t) \leq \varepsilon + u_{ITSM} \quad (24)$$

حال دینامیک باقی مانده در کنترل کننده ترکیبی هوشمند، باید توسط سیگنال کنترل مد لغزشی ترمینال پایدار گردد. اگر u_{ITSM} به صورت رابطه (۲۵) در نظر گرفته شود، همگرایی سیستم به روی سطح لغزش $S(t) = 0$ همان طور که در قضیه (۱) آورده می شود، تضمین خواهد شد.

$$u_{ITSM} = -K_{ITSM} \operatorname{sgn}(s) \quad K_{ITSM} > 0 \quad (25)$$

بنابراین سیگنال کنترل کلی برای رساندن سیستم به روی سطح لغزش و نگهداشتن آن بر روی آن به صورت رابطه (۲۶) بدست خواهد آمد.

$$u_{IITSMC} = u_{ANFIS} + u_{ITSM} = -\hat{f} - K_{ITSM} \operatorname{sgn}(S) \quad (26)$$

اثبات پایداری مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند

بر اساس قضیه ۱ که در زیر آورده شده است، نشان داده ایم که سیگنال کنترل (۲۵) قابلیت رساندن مسیرهای سیستم های آشوبگونه، رابطه (۱۶)، را به سطح لغزش $S(X(t)) = 0$ ، رابطه (۱۷)، دارد. **قضیه ۱-** در صورتی که معادلات سیستم به صورت رابطه (۱۶)، قانون کنترل مطابق با رابطه (۲۵)، سطح لغزش ترمینال انتگرالی بر اساس رابطه (۱۷) و خطای تقریب به صورت رابطه (۲۰) باشد، مسیرهای سیستم آشوبگونه به سطح لغزش ترمینال که به صورت رابطه (۲۷) مشخص شده است، همگرا می شوند.

$$S(X(t)) = 0 \quad (27)$$

$$\dot{S}(t) = f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{q_1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{q_2} X_3 \quad (18)$$

$$+ c_1 X_1 + c_2 X_1^\beta + u_{IITSMC}(t)$$

که در آن سیگنال کنترل $u_{IITSMC}(t)$ ، مجموع سیگنال ناشی از ANFIS و کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی می باشد که به صورت رابطه (۱۹) نشان داده شده است.

$$u_{IITSMC} = u_{ANFIS} + u_{ITSM} \quad (19)$$

بنا بر خاصیت تقریب گر بودن عمومی سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی [۱۹]، این سیستم قادر به تخمین یک تابع پیوسته دلخواه $\hat{f}$ تعریف شده بر روی یک مجموعه فشرد، با دقت مطلوب می باشد که $\hat{f}$ تقریب دینامیک نامعلوم فرض می شود. درحقیقت این مطلب نشان دهنده این است که با انتخاب تعداد کافی توابع عضویت برای فضای ورودی، حدی بر روی خطای تخمین e ، توسط سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی وجود خواهد داشت که این حد با نماد $\varepsilon \rightarrow 0$ تعریف می شود [۲۰]. بطوریکه:

$$|e| = |f - \hat{f}| \leq \varepsilon \quad (20)$$

طبق ویژگی های سیستم که در این مقاله در نظر گرفته شده است، $f_3(\underline{X})$ نامعلوم است. در طراحی کنترل کننده اگر تابع f که باید تقریب زده شود، به صورت رابطه (۲۱) در نظر گرفته شود.

$$\begin{aligned} f &= f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{q_1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{q_2} X_3 \\ &+ c_1 X_1 + c_2 X_1^\beta \end{aligned} \quad (21)$$

اگر سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی تابع رابطه (۲۱) را تخمین بزند و u_{ANFIS} ، سیگنال کنترلی در نظر گرفته شود که منفی این تابع تقریب زده شده را به سیستم اعمال نماید، می توان دینامیک باقی مانده را هم با استفاده از u_{ITSM} پایدار نمود. در حقیقت مجموعه ای از ورودی و خروجی ها برای تابع نامعلوم سیستم وجود دارد که سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، ابتدا با این مجموعه ورودی-خروجی ها آموزش داده می شود. آموزش اولیه برای جلوگیری از افزایش زمان تخمین و زمان همگرایی حالات در سیستم حلقه بسته کنترلی انجام می شود. سپس شبکه آموزش داده شده در سیستم حلقه بسته کنترلی قرار می گیرد و هم زمان کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی، وزنه های آن به روز می شود. بنابراین u_{ANFIS} سیگنال تخمین زده شده ای است که توسط سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی به طور آنلاین تخمین زده می شود.

$$\dot{V} = \dot{S}S \leq S[\varepsilon - K_{ITSM} \operatorname{sgn}(S)] \quad (35)$$

به دلیل آن که $S \cdot \operatorname{sgn}(S) = |S|$ است، بنابراین می توان به رابطه (۳۶) دست یافت.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq S[-K_{ITSM} \operatorname{sgn}(S) + \varepsilon] = -K_{ITSM} |S| \\ + \varepsilon S &\leq -K_{ITSM} |S| + |\varepsilon| |S| \\ &\leq |S| [-K_{ITSM} + |\varepsilon|] \end{aligned} \quad (36)$$

با انتگرال گیری از دو طرف رابطه (۳۶) از زمان صفر تا T داریم:

$$V(T) - V(0) \leq [-K_{ITSM} + |\varepsilon|] \int_0^T |S| dt \quad (37)$$

با توجه به اینکه $V(T) > 0$ است، به کمک رابطه (۳۷) با سوپریم گرفتن از دو طرف آن و با همگرایی $T \rightarrow \infty$ ، همچنین با فرض $K_{ITSM} > |\varepsilon|$ می توان به رابطه (۳۸) رسید.

$$\begin{aligned} \limsup_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^T |S| dt \right) \\ \leq \left[\frac{1}{K_{ITSM} - |\varepsilon|} \right] V(0) \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

طرف راست ناتساوی رابطه (۳۸) به صفر همگرا می شود. بنابراین طرف چپ آن نیز به صفر متمایل خواهد شد. بنابراین مطابق با رابطه (۳۸) به طور مستقیم $S \xrightarrow{T \rightarrow \infty} 0$ نتیجه می شود. بنابراین مسیرهای سیستم آشوبگونه به سطح لغزش $S(t) = 0$ همگرا خواهند شد.

ساختار و آموزش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

روابط سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در مراجع مختلفی مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۹، ۲۲، ۲۱]. این سیستم استنتاج فازی-عصبی دارای پنج لایه است و در این مقاله دارای سه ورودی که همان حالات سیستم می باشند، است. ابتدا فرض می کنیم که قوانین به صورت رابطه (۳۹) باشند:

$$\begin{aligned} \text{Rule}(i): \text{if } X_1 \text{ is } A_i \text{ and } X_2 \text{ is } B_i \\ \text{and } X_3 \text{ is } C_i \text{ then } f_i = p_i X_1 \\ + q_i X_2 + r_i X_3 + s_i \end{aligned} \quad (39)$$

و برای غیر فازی ساز از غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده نماییم، خروجی لایه ها به صورت زیر خواهد بود:

لایه اول: در این لایه ورودی ها از توابع عضویت عبور می کنند. اگر برای هریک از سه ورودی، پنج تابع عضویت در نظر گرفته شود، روابط مربوط به خروجیهای متناظر با ورودی X_1 بصورت رابطه (۴۰)

اثبات قضیه ۱- به منظور اثبات پایداری سیستم (۱۶) با قانون کنترل (۲۵)، از تئوری پایداری لیپانوف استفاده می گردد. برای این منظور تابع لیپانوف رابطه (۲۸) که یک تابع مثبت معین است، در نظر گرفته می شود.

$$V = \frac{1}{2} S^2 > 0 \quad (28)$$

با محاسبه مشتق این تابع لیپانوف نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\dot{V} = \dot{S}S = S \left[f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1-1}{q_1}} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2-1}{q_2}} X_3 + c_1 X_1 + c_2 X_1^\beta + u_{ITSMC} \right] \quad (29)$$

که در آن سیگنال کنترل مجموع سیگنال کنترل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی و کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی می باشد که به صورت رابطه (۳۰) نشان داده شده است.

$$u_{ITSMC} = u_{ANFIS} + u_{ITSM} \quad (30)$$

سیگنال u_{ANFIS} بخش تقریب زده شده ای است که توسط سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی به طور آنلاین تقریب زده می شود.

$$\begin{aligned} f = f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1-1}{q_1}} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2-1}{q_2}} X_3 \\ + c_1 X_1 + c_2 X_1^\beta \end{aligned} \quad (31)$$

$$u_{ANFIS} = -\hat{f} \quad (32)$$

که در رابطه (۳۲)، $\hat{f}$ همان سیگنال تخمین زده شده در سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی است.

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1-1}{q_1}} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2-1}{q_2}} X_3 \\ &+ c_1 X_1 + c_2 X_1^\beta + u_{ITSMC} \\ &= \hat{f} + u_{ITSMC} = \hat{f} + u_{ANFIS} + u_{ITSM} \\ &= \hat{f} - \hat{f} + u_{ITSM} \end{aligned} \quad (33)$$

بنابراین با استفاده از رابطه (۲۰) خواهیم داشت:

$$\dot{S}(t) = \hat{f} - \hat{f} + u_{ITSM} \leq |\hat{f} - \hat{f}| + u_{ITSM} \leq \varepsilon + u_{ITSM} \quad (34)$$

بنابراین مشتق تابع لیپانوف به صورت رابطه (۳۵) بدست می آید.

$$\frac{\partial E_k}{\partial c_i} = \frac{\partial E_k}{\partial o_{5,i}} \frac{\partial o_{5,i}}{\partial o_{4,i}} \frac{\partial o_{4,i}}{\partial o_{3,i}} \frac{\partial o_{3,i}}{\partial o_{2,i}} \frac{\partial o_{2,i}}{\partial o_{1,i}} \frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} \quad (47)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \frac{\partial o_{5,i}}{\partial o_{4,i}} &= 1 \\ \frac{\partial o_{4,i}}{\partial o_{3,i}} &= f_i \end{aligned} \quad (48)$$

برای مشتق لایه سوم به دوم اگر نود مقابل قانون متناظر را در نظر بگیریم به صورت رابطه (۴۹) است:

$$\frac{\partial o_{3,i}}{\partial o_{2,i}} = \frac{\partial}{\partial w_i} \left(\frac{w_i}{\sum_{j=1}^{125} w_j} \right) = \frac{\sum_{j=1}^{125} w_j - w_i}{\left(\sum_{j=1}^{125} w_j \right)^2} \quad (49)$$

برای نودهای غیر متناظر به صورت رابطه (۵۰) است:

$$\frac{\partial o_{3,i}}{\partial o_{2,i}} = \frac{\partial}{\partial w_i} \left(\frac{w_j}{\sum_{j=1}^{125} w_j} \right) = \frac{-w_j}{\left(\sum_{j=1}^{125} w_j \right)^2} \quad (50)$$

مشتق لایه دوم نسبت به لایه اول به صورت رابطه (۵۱) است:

$$\frac{\partial o_{2,i}}{\partial o_{1,i}} = \frac{\partial}{\partial A_m} \prod_{A_j \in R(A_m)} A_j = \prod_{A_j \in R(A_m), A_j \neq A_m} A_j \quad (51)$$

که در فرمول بالا $A_j \in R(A_m)$ مشخص کننده مجموعه‌های فازی است که بخش مقدمه قانونی را تشکیل می‌دهد که شامل مجموعه فازی A_m است. در نتیجه مشتق مجموع مربعات خطا نسبت به پارامترهای اولیه برای نودهای متناظر لایه سوم به دوم به صورت رابطه (۵۲) می‌باشد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial c_i} &= -(y_i - o_i) f_i \frac{\sum_{j=1}^{125} w_j - w_i}{\left(\sum_{j=1}^{125} w_j \right)^2} \prod_{A_j \in R(A_m), A_j \neq A_m} A_j \\ &\cdot \frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} \end{aligned} \quad (52)$$

برای نودهای غیر متناظر لایه سوم نسبت به دوم بصورت رابطه

(۵۳) می‌باشد:

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = -(y_i - o_i) f_i \frac{-w_j}{\left(\sum_{j=1}^{125} w_j \right)^2} \prod_{A_j \in R(A_m), A_j \neq A_m} A_j \cdot \frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} \quad (53)$$

حال باید مشتق لایه اول به پارامترهای اولیه محاسبه گردد:

می‌باشد که برای بقیه ورودیها با توابع عضویت $B_i(X_2), C_i(X_3)$ نیز به همین شکل می‌باشد.

$$o_{1,i} = \mu A_i(X_1) = \exp(-(X_1 - c_i) / \sigma_i)^2, \quad i = 1, \dots, 5 \quad (40)$$

که $\{c_i, \sigma_i\}$ مجموعه پارامترها هستند. پارامترهای این لایه به پارامترهای اولیه معروف هستند.

لایه دوم: خروجی این لایه ضرب سیگنال‌های ورودی است که در واقع معادل قسمت اگر قوانین هستند. برای سیستمی با ۳ ورودی و ۵ تابع عضویت برای هر کدام از آنها، ۱۲۵ قانون خواهیم داشت:

$$o_{2,i} = w_i = \mu A_i(X_1) \mu B_i(X_2) \mu C_i(X_3); \quad i = 1, \dots, 125 \quad (41)$$

لایه سوم: خروجی این لایه نرمالیزه شده لایه قبلی است:

$$o_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{125} w_i}; \quad i = 1, \dots, 125 \quad (42)$$

لایه چهارم:

$$o_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i X_1 + q_i X_2 + r_i X_3 + s_i); \quad i = 1, \dots, 125 \quad (43)$$

پارامترهای این لایه، پارامترهای تالی نام دارند.

لایه پنجم: خروجی این لایه، خروجی کلی سیستم است:

$$o_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i; \quad i = 1, \dots, 125 \quad (44)$$

آموزش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، به منظور تخمین آنلاین دینامیک نامعلوم سیستم، از طریق روش آموزش ترکیبی صورت می‌گیرد. در این روش از ترکیب روش‌های گرادیان نزولی و حداقل مربعات خطای بازگشتی، به ترتیب برای تنظیم پارامترهای اولیه و تالی استفاده می‌شود و رابطه بروزرسانی پارامترها استخراج می‌گردد [۲۲].

گرادیان نزولی: در روش آموزش ترکیبی، از گرادیان نزولی برای تنظیم پارامترهای اولیه استفاده می‌شود. در این روش با در نظر گرفتن تابع تعلق گوسین رابطه (۴۵)، معیار کارایی بصورت رابطه (۴۶) می‌باشد:

$$\mu A_i(x) = \exp(-(x - c_i) / \sigma_i)^2 \quad (45)$$

$$E_k = \frac{1}{2} (y_k - o_k)^2 \quad (46)$$

رابطه تنظیم پارامتر برای پارامتر اولیه c_i به صورت رابطه (۴۷) است. همچنین برای پارامتر اولیه σ_i نیز بطور مشابه بدست می‌آید.

$$\theta = A^{-1}Y \quad (60)$$

در حالت کلی داده‌ها ممکن است با نویز همراه باشند یا مدل ممکن است نتواند به طور دقیق خروجی را معین کند. بنابراین رابطه (۶۱) را می‌توان در نظر گرفت.

$$A\theta + e = Y \quad (61)$$

در این حالت ما به دنبال یافتن $\theta = \hat{\theta}$ هستیم که مجموع مربعات خطا را می‌نیمد:

$$E(\theta) = \sum_{i=1}^m (y_i - a_i^T \theta)^2 = e^T e = (y - A\theta)^T (y - A\theta) \quad (62)$$

اگر AA^T معکوس پذیر باشد، آنگاه:

$$\hat{\theta} = (AA^T)^{-1} A^T y \quad (63)$$

روش دیگری نیز برای محاسبه پارامترها وجود دارد که یک روش بازگشتی است (RLSE) این روش به دو دلیل به وجود آمده است. ۱. گاهی ممکن است که ماتریس AA^T معکوس پذیر نباشد. ۲. فرض کنید θ محاسبه گردیده است. اگر یک جفت داده ورودی خروجی جدید به سیستم اضافه شود، در روش قبل باید کل پارامترها محاسبه شوند، ولی در این روش فقط مقدار پارامتر جدید به دست می‌آید.

بنابراین فرمول‌های بازگشتی در روش مربعات خطای بازگشتی بصورت رابطه (۶۴) می‌باشند.

$$S_{k+1} = S_k - \frac{S_k a_{k+1}^T a_{k+1}^T S_k}{1 + a_{k+1}^T S_k a_{k+1}} \quad (64)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + S_{k+1} a_{k+1} (y_{k+1} - a_{k+1}^T \theta_k)$$

$$k = 0, 1, \dots, m-1$$

برای شرایط اولیه $\theta_0 = 0$ و $S_0 = \gamma I$ در نظر گرفته می‌شود که I ماتریس همانی به ابعاد $m \times m$ است و γ یک عدد صحیح بزرگ است. همچنین a_{k+1} ، سطرهای ماتریس A در لحظه $k+1$ می‌باشد.

۳-۳ الگوریتم زنبور

الگوریتم زنبور یک الگوریتم بهینه سازی بر اساس هوش جمعی و رفتار هوشمندانه جمعیت زنبور عسل است و در واقع در این روش، جمعیت زنبورهای عسل به دنبال بهترین پاسخ ممکن در فضای حل مسئله، بر مبنای تابع هزینه تعریف شده می‌باشند [۲۴، ۲۳]. زنبورهای کاوشگر که در فضای حل مسئله با احتمال یکنواخت، پراکنده می‌شوند، یک حل بهینه را از طریق تابع هزینه ارزیابی می‌کند.

$$\frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} = \frac{\partial}{\partial c_i} [\exp[-\frac{x-c_i}{\sigma_i}]] \quad (54)$$

$$= 2 \frac{[x-c_i]}{\sigma_i^2} \exp[-\frac{x-c_i}{\sigma_i}]$$

$$\frac{\partial o_{1,i}}{\partial \sigma_i} = \frac{\partial}{\partial \sigma_i} [\exp[-\frac{x-c_i}{\sigma_i}]] \quad (55)$$

$$= 2 \frac{[x-c_i]^2}{\sigma_i^3} \exp[-\frac{x-c_i}{\sigma_i}]$$

بنابراین طبق روابط (۵۲) تا (۵۵)، رابطه بروزرسانی پارامترهای اولیه استخراج می‌گردد.

حدافل مربعات خطا: در روش آموزش ترکیبی، برای بروزرسانی پارامترهای تالی در رابطه (۳۹)، از حدافل مربعات خطای بازگشتی استفاده می‌شود. در حالت کلی خروجی یک مدل خطی به صورت رابطه (۵۶) می‌باشد:

$$y = \theta_1 f_1(u) + \theta_2 f_2(u) + \dots + \theta_n f_n(u) \quad (56)$$

که u بردار ورودی است و f ها توابع شناخته شده هستند و θ ها پارامترهای نامعلوم هستند که باید تقریب زده شوند. برای شناسایی پارامترها نیاز به داده های آموزشی داریم که به صورت رابطه (۵۷) بیان می‌شوند.

$$\{(u_i; y_i)\}, i = 1, \dots, m \quad (57)$$

با جایگزینی زوج های ورودی و خروجی در معادله اصلی به m معادله خطی به صورت رابطه (۵۸) می‌سیم.

$$y_1 = \theta_1 f_1(u_1) + \theta_2 f_2(u_1) + \dots + \theta_n f_n(u_1)$$

$$y_2 = \theta_1 f_1(u_2) + \theta_2 f_2(u_2) + \dots + \theta_n f_n(u_2)$$

$$\vdots$$

$$y_m = \theta_1 f_1(u_m) + \theta_2 f_2(u_m) + \dots + \theta_n f_n(u_m) \quad (58)$$

که در فرم ماتریسی به صورت $A\theta = Y$ می‌باشد که در آن ماتریس A به فرم رابطه (۵۹) است:

$$A = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \dots & f_n(u_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(u_m) & \dots & f_n(u_m) \end{bmatrix} \quad (59)$$

θ یک بردار $n \times 1$ و Y بردار خروجی $m \times 1$ است. حال در این حالت بردار θ به صورت رابطه (۶۰) قابل محاسبه است.

$$\Delta f = 2 \sin(\pi x_1) \sin(\pi x_2) \sin(\pi x_3) \quad (65)$$

$$|d(t)| \leq 0.6, \quad |\Delta f| \leq 2$$

مقادیر مربوط به توانهای سطح لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند در کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی بصورت زیر انتخاب گردیده است.

$$p_1 = 5, q_1 = 7, p_2 = 3, q_2 = 7 \quad (66)$$

به منظور انتخاب ضرایب مد لغزشی ترمینال انتگرالی از الگوریتم زنبور استفاده شده است که پارامترهای مربوط به تابع هزینه الگوریتم زنبور عسل، بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$a_1 = 0.3, a_2 = 2, a_3 = 2, a_4 = 2 \quad (67)$$

پارامترهای کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند که توسط الگوریتم زنبور عسل بدست آمده اند بصورت زیر بدست آمده است. این پارامترها با الگوریتم زنبور در شرایط بدون نامعینی و اغتشاش بدست آمده اند.

$$a = 4.5379, b = 3.8963, K_{ITSM} = 144.4525, \quad (68)$$

$$c_1 = 0.1020, c_2 = -0.7325, \beta = 1.30$$

همچنین فرض گردیده است که مجموعه داده هایی از تابع رابطه (۲۱) در اختیار است که با آنها سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی آموزش داده می شود. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، کنترل کننده هوشمند در حضور اغتشاش خارجی بخوبی سیستم را پایدار نموده است. سرعت پاسخ مناسب است و چترینگ بطور کامل حذف گردیده است. همچنین پاسخ گذرا مناسب می باشد. در حقیقت این کنترل کننده قادر به کنترل مناسب سیستم در حضور نامعینی های موجود در سیستم و نامعلوم بودن دینامیک سیستم می باشد. همچنین در شکل ۴ کنترل کننده هوشمند در حضور نامعینی نیز بخوبی سیستم را کنترل نموده است و دارای سرعت پاسخ مناسب و بدون چترینگ می باشد.

سطح لغزش در نظر گرفته شده در این روش برای داشتن پاسخی مناسب بدون چترینگ، ترکیبی از روش های انتگرالی و مد لغزشی ترمینال می باشد و به منظور مقایسه ای بین روش مد لغزشی ترمینال و روش کنترلی این مقاله، نتایج شبیه سازی برای کنترل مد لغزشی ترمینال نیز انجام شده است. نتایج مربوط به کنترل مد لغزشی ترمینال، مطابق آنچه در [۱۵] مطرح گردیده و در [۲۵] بر روی سیستم کولت با وجود نامعینی و اغتشاش خارجی انجام شده است، در شکل ۵ آورده شده است. مقادیر توانهای سطح لغزش بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$p_1 = 5, q_1 = 7, p_2 = 3, q_2 = 7 \quad (69)$$

مکان های مشاهده شده توسط زنبورهای کاوشگر، طبق تابع هزینه درجه بندی می شوند و مکان برتر با مقدار حداقل هزینه یا بالاترین برازندگی، برای جستجوی محلی انتخاب می شود. برای هریک از مکان های انتخاب شده، زنبورهای کارگر به طور تصادفی در همسایگی مکان هایی با رتبه بالا، قرار می گیرند. سپس زنبورهای اضافی به طور تصادفی و به عنوان زنبورهای پیشاهنگ برای یافتن گلزارهای جدید، در فضای کلی حل مسئله پراکنده می شوند. در آخر هر تکرار از برنامه، جمعیت جدید کلونی زنبور از دو گروه تشکیل می شوند. اولین گروه شامل زنبور پیشاهنگ که به عنوان مراکز و نماینده هر گلزار و نشان دهنده نتایج جستجوی محلی الگوریتم می باشند. دومین گروه، زنبور پیشاهنگ می باشند که به صورت تصادفی در فضای حل مسئله تولید می شوند و نمایانگر جستجوی سراسری هستند.

تابع هزینه

تابع هزینه مجموع وزن دار میانگین نمایی حالات سیستم و میانگین نمایی سیگنال کنترل، با وزن های مشخص و به منظور پایداری سازی حالات سیستم به سمت نقطه تعادل در نظر گرفته شده است. وزن های مربوط به جملات تابع هزینه طوری در نظر گرفته می شود که در کنار پایداری سازی حالات در کمترین زمان ممکن، تلاش کنترلی قابل قبول، با نقطه شروع مناسب در کنار جلوگیری از افزایش زیاد چترینگ بدست آید. در رابطه (۶۵) تابع هزینه ای که برای مسئله مور نظر در این مقاله استفاده شده است، آورده شده است.

$$J = a_1 \sqrt{\int_0^{t_f} \frac{1}{t_f} u^2} + a_2 \sqrt{\int_0^{t_f} \frac{1}{t_f} x_1^2} \quad (65)$$

$$+ a_3 \sqrt{\int_0^{t_f} \frac{1}{t_f} x_2^2} + a_4 \sqrt{\int_0^{t_f} \frac{1}{t_f} x_3^2}$$

در رابطه فوق، a_1, a_2, a_3, a_4 اعدادی اسکالر هستند و پارامترهای مربوط به الگوریتم زنبور هستند.

۴- نتایج شبیه سازی

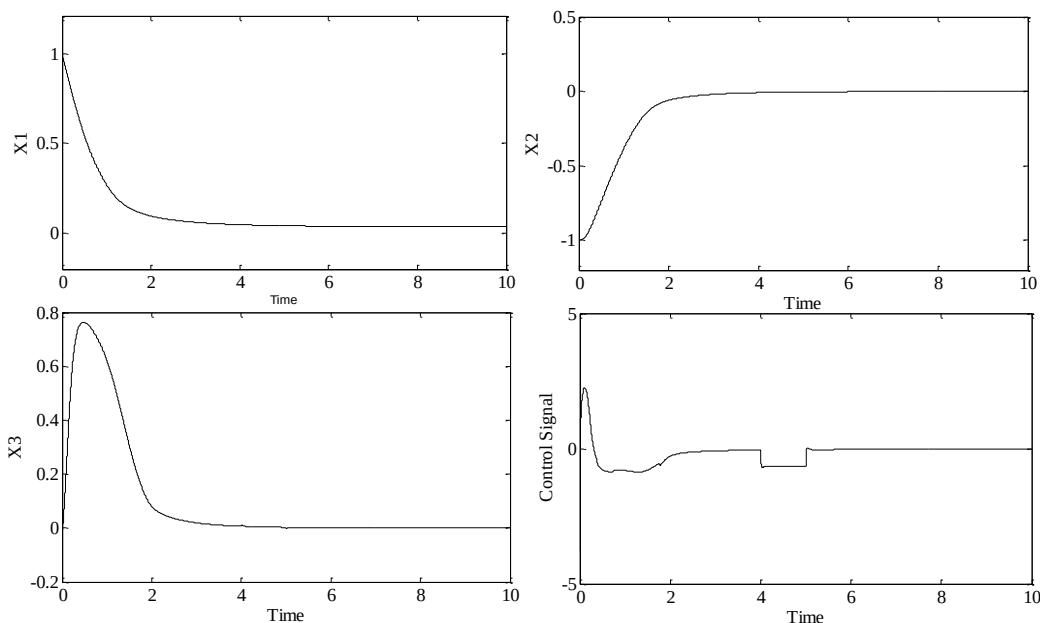
در این بخش کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند بر روی سیستم آشوبگونه کولت اعمال می شود. شرایط اولیه $[1 \ -1 \ 0]$ در نظر گرفته شده است و سیستم تحت نامعینی و اغتشاش خارجی قرار دارد. سیگنال پالس با دامنه ۰٫۶ و پهنای ۱ ثانیه، از ثانیه ۴ تا ۵، به عنوان اغتشاش خارجی به کنترل کننده ها اعمال می شود. همچنین نامعینی جمعی غیر ساختاریافته سازگار، در سیستم حلقه بسته ترکیبی هوشمند مبتنی بر سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، سیگنال سینوسی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

تطبیقی بحث شده در این مقاله روشی موثر و مناسب جهت کنترل سیستم و پایدارسازی حالات می باشد.

به منظور مشاهده تاثیر استفاده از الگوریتم بهینه سازی زنبور در طراحی کنترل کننده، نتایج مربوط به انتخاب تصادفی ضرایب کنترل-کننده مد لغزشی ترمینال در شکل ۶ آورده شده است. ضرایب بصورت تصادفی و دستی مطابق رابطه (۷۱) در نظر گرفته شده است:

$$a = 9.31, \quad b = 2, \quad K_{TSM} = 70.2 \quad (71)$$

همانطور که مشخص است تلاش کنترلی در مقایسه با شکل ۵ بسیار زیاد است و پایدارسازی در حالات سیستم انجام نشده است. بنابراین نیازمند صرف زمان زیادی می باشیم تا با سعی و خطا به پاسخی نسبتاً مطلوب برسیم.

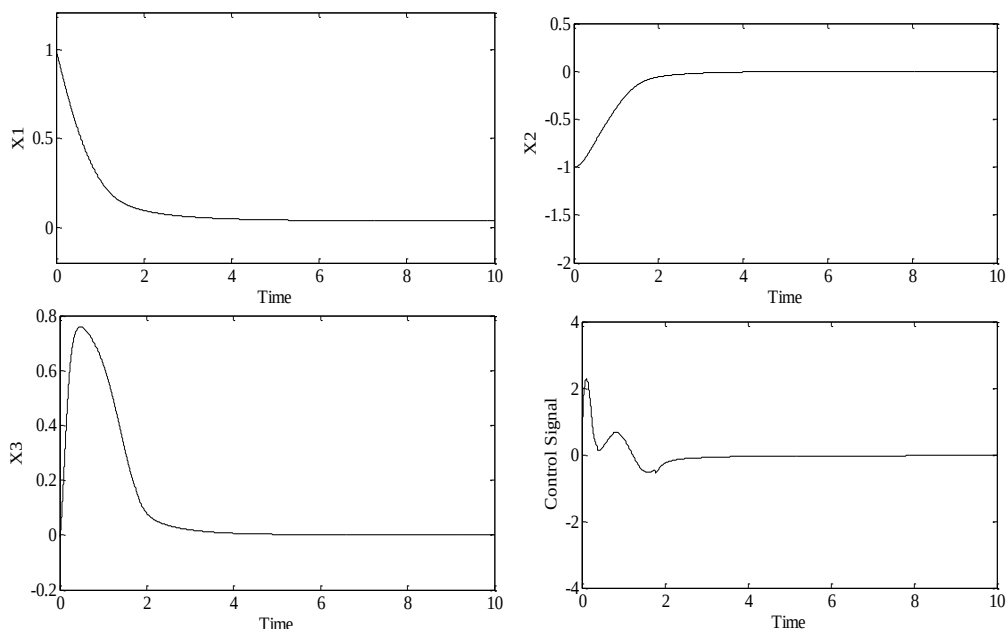


شکل ۳: پاسخ زمانی حالات X_1 ، X_2 ، X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند مبتنی بر سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (IITSM) سیستم کولت در حضور اغتشاش

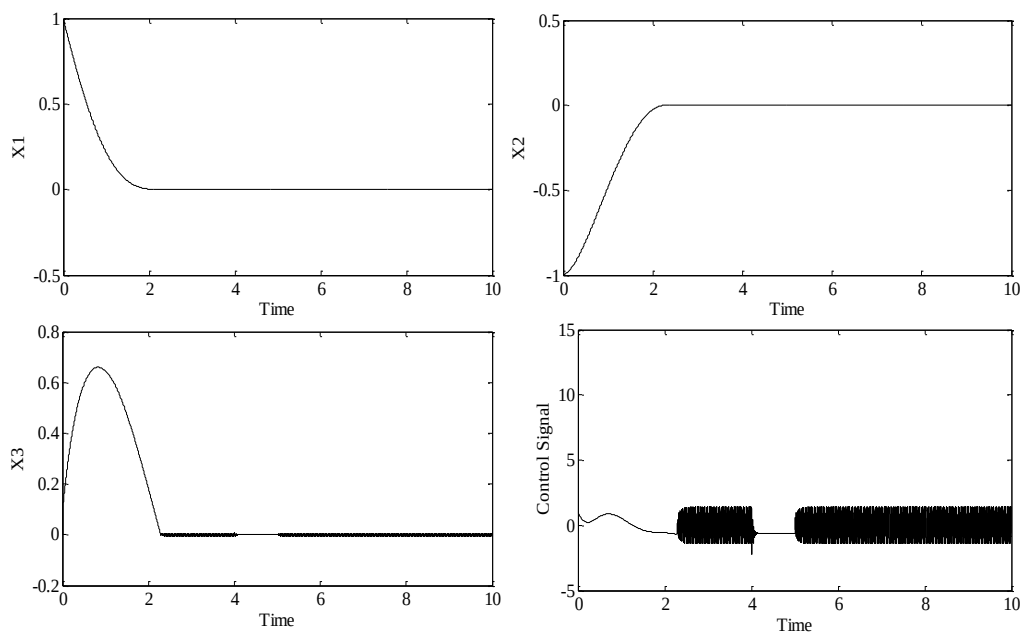
همچنین مقادیر پارامترهای آن با الگوریتم زنبور عسل به صورت زیر بدست آمده است:

$$a = 4.7023, \quad b = 4.7964, \quad K_{TSM} = 126.6199 \quad (70)$$

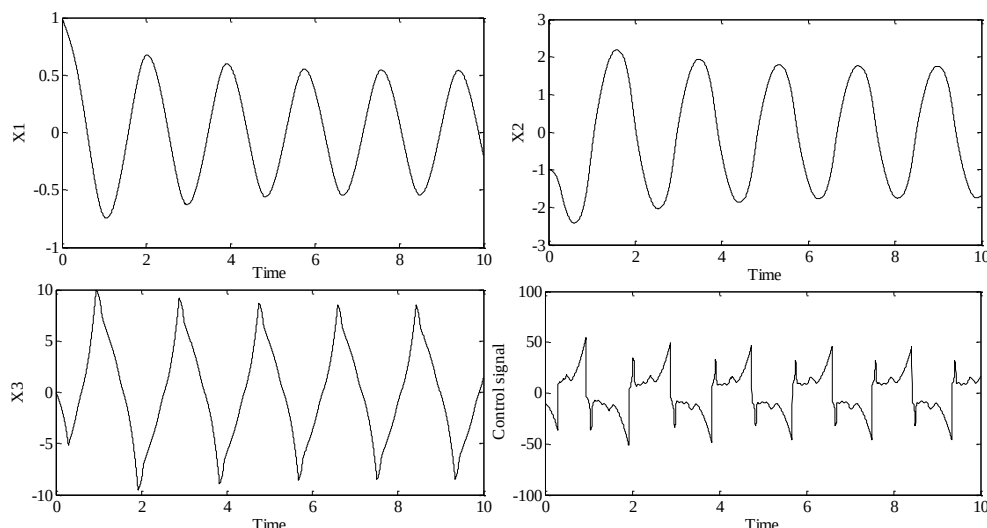
شیه سازی مربوط به مد لغزشی ترمینال نیز در شکل ۵ نشان داده شده است که این روش پیش تر در [۲۵] بر روی سیستم کولت اعمال گردیده بود و به عنوان مقایسه با روش ارائه شده در این مقاله آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود، زمان نشست حالات مطلوب می باشد. اما پاسخ دارای چترینگ زیادی می باشد که این مشکل در کنترل کننده طراحی شده در این مقاله برطرف گردیده است. همچنین در مواردی که فقط اطلاعات ورودی خروجی بخشی از دینامیک سیستم در دسترس است، استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی



شکل ۴: پاسخ زمانی حالات X_1 ، X_2 ، X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند مبتنی بر سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (IITSM) سیستم کولت در حضور عدم قطعیت



شکل ۵: پاسخ زمانی حالات X_1 ، X_2 ، X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال (TSM) سیستم کولت در حضور عدم قطعیت و اغتشاش و با ضرایب بدست آمده توسط الگوریتم زنبور عسل



شکل ۶: پاسخ زمانی حالات X_1 ، X_2 و X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال (TSM) سیستم کولت در حضور عدم قطعیت و اغتشاش و با ضرایب تصادفی

مراجع

- [1] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna, and G. Manganaro, "Hyperchaos from cellular neural networks," *Electronics letters*, vol. 31, pp. 250-251, 1995.
- [2] A. C. Enys, A. Tamas, evic ius and A. Baziliauskas, "Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators," *Chaos, Solitons Fractionals*, vol. 17, pp. 349-353, 2003.
- [3] J. P. Goedgebuer, L. Larger, and H. Porle, "Optical cryptosystem based on synchronization of hyperchaos generated by a delayed feedback tunable laser diode," *Physical Review Letters*, vol. 80, pp. 2249-2252, 1998.
- [4] C. Sparrow, "The Lorenz equation: bifurcation, chaos and strange attractors," New York, Springer, 1982.
- [5] G. Chen, and T. Ueta, "Yet another chaotic attractor," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 12, PP. 1465-1466, 1999.
- [6] S. Dadras, H. R. Momeni, and V. J. Majid, "Sliding mode control for uncertain new chaotic dynamical system," *Chaos, Solitons Fractionals*, vol. 41, pp. 1857-1862, 2009.
- [7] Y. Hong, G. Yang, D. Cheng, S. Spurgeon, "A new approach to terminal sliding mode control design," *Asian Journal of Control*, Vol. 7, pp. 177-181, 2005.
- [8] Yang, Liang and Yang, Jianying, "Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems," *International Journal of*

۵- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند مبتنی بر سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی برای سیستم آشوبگونه کولت طراحی گردید. هدف از ارائه روش پیشنهادی، دستیابی به اهداف مورد نظر از جمله کاهش چترینگ، سرعت پاسخ مناسب و مقاومت نسبت به اغتشاشات و نامعینی یا پاسخ گذرای مطلوب در شرایطی بود که بخشی از سیستم نامعلوم است و فقط به اطلاعات ورودی-خروجی سیستم دسترسی داریم. سطح لغزش در نظر گرفته شده، ترکیب سطح لغزش مد لغزشی ترمینال و انتگرال تابعی از حالات سیستم است که برای اولین بار پیشنهاد شده است. همچنین برای افزایش دقت پاسخ، پارامترها با الگوریتم زنبور محاسبه شده اند. مقایسه روش مطرح شده در این مقاله با روش مد لغزشی ترمینال نشان می دهد که کنترل کننده طراحی شده عملکرد بهتری نسبت به مد لغزشی ترمینال داشته اند و چترینگ در آن حذف گردیده است. همچنین سرعت پاسخ و پاسخ گذرای سیستم نیز مطلوب می باشد. در واقع در روش مد لغزشی ترمینال باید دینامیک سیستم معلوم باشد که در کنار آن، مد لغزشی ترمینال می تواند اثرات وجود نامعینی و اغتشاش را در سیستم بهبود دهد. در روش ارائه شده این مقاله، در صورت داشتن اطلاعات ورودی-خروجی و بدون دسترسی به معادلات دینامیکی سیستم می توان بطور مطلوبی سیستم را کنترل نمود و به اهداف کنترلی مطلوب دست یافت. همچنین روش ارائه شده در این مقاله، قابل اعمال به کلاس وسیعی از سیستم های پیوسته و غیرخطی بدون تاخیر و خودگردان نیز می باشد.

- [17] P. Coullet, C. Tresser, A. Arnodo, "Transition to stochasticity for a class of forced oscillators", *Phys Lett A*, vol. 72, pp. 268-270, 1979.
- [18] A. Arnodo, P. Coullet, C. Tresser, "Possible new strange attractors with spiral structure", *Common Math Phys*, vol. 79, pp. 573-9, 1981.
- [19] J.S.R. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*", Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.
- [20] Zhang, Yajun, Chai, Tianyou, Wang, Hong, "A Nonlinear Control Method Based on ANFIS and Multiple Models for a Class of SISO Nonlinear Systems and Its Application", Vol. 22, No. 11, pp. 1783-1795, 2011.
- [21] O. Nelles, "Nonlinear System Identification: From Classical approaches to Neural Networks and Fuzzy Models", Springer-Verlag, Germany, 2001.
- [22] C. Loganathanl, K.V. Girija, "Investigations on Hybrid Learning in ANFIS", *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, Issue 10, pp. 2248-9622, 2014.
- [23] D. T. Pham, M. Castellani, "The Bees Algorithm: modeling foraging behavior to solve continuous optimization problems", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 223, No. 12, pp. 2919-2938, 2009.
- [24] R. Gholipour, A. Khosravi, H. Mojallali, "Bees Algorithm based Intelligent Backstepping Controller Tuning for Gyro System", *The Journal of Mathematics and Computer Science*, Vol.5, No. 3, pp. 205-211, 2012.
- [25] S. Khari, Z. Rahmani, B. Rezaie, "chaos control using fuzzy controller based on combination of intelligent terminal sliding mode and state feedback controllers ," *international journal of engineering & technology sciences*, vol. 03, issue 04, pp. 317-336, 2015.
- Robust and Nonlinear Control, vol. 21, pp. 1865-1879, 2011.
- [9] S. T. Venkataraman, S. Gulati, "Control of nonlinear systems using terminal sliding modes," *Proceedings American Control Conference*, Chicago, IL, U.S.A., pp. 891-893, 1992.
- [10] X. Yu, Z. Man "Model reference adaptive control systems with terminal sliding modes," *International Journal of Control*, vol. 66, pp. 1165-1176, 1996.
- [11] X. Yu, Z. Man, "Fast terminal sliding mode control for single input systems," *Proceedings of 2000 Asian Control Conference*, Shanghai, China, July 2000.
- [12] X. Yu, Z. Man, "Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 49, pp. 261-264, 2002.
- [13] Y. Feng, X. Yu, Z. Man "Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators," *Automatica*, vol 38, pp. 2159-2167, 2002.
- [14] X. Yu, Z. Man, Y. Feng, Z. Guan "Nonsingular terminal sliding mode control of a class of nonlinear dynamical systems," *Proceedings of 2002, IFAC 15th Triennial World Congress*, Barcelona, Spain, 2002.
- [15] S. Khari, Z. Rahmani, B. Rezaie, "Designing fuzzy logic controller based on combination of terminal sliding mode and state feedback controllers for stabilizing chaotic behaviour in rod-type plasma torch system," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, doi:10.1177/0142331214568607, 2015.
- [16] K. Konishi, M. Hirai, and H. Kokame, "Sliding mode control for a class of chaotic systems" *Physics letters A*, vol. 245, pp. 511-517, 1998.