

# طراحی یک کنترل کننده غیر خطی مقاوم جدید بر اساس کنترل پیشبین برای پروسه‌های صنعتی

حسین اسفرقی<sup>۱</sup>، حسن ابراهیمی راد<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قاینات، hossein\_sfroghy@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد، پژوهشگاه نیرو تهران، h\_brahimirad@yahoo.com

## چکیده

در این مقاله از یک کنترل کننده مد لغزشی جدید بر مبنای کنترل پیشبین برای کنترل یک سیستم مرتبه اول تأخیردار که تقریباً مدل خوبی برای اکثر پروسه‌های صنعتی می باشد، استفاده شده است. در این روش از کنترل پیشبین توسعه یافته برای بهینه کردن سطح لغزش و ضریب تابع سوئیچینگ مورد استفاده در کنترل مد لغزشی در هر لحظه استفاده شده است. برای رفع *chattering* در اینجا از یک تابع هموار جدید در تابع سوئیچینگ استفاده کردیم. نتایج شبیه سازی‌ها کارایی و مقاوم بودن بالای آن را نشان می دهد.

## واژه های کلیدی

کنترل پیشبین توسعه یافته، کنترل کننده مد لغزشی جدید، کنترل ساختار متغیر، پروسه‌های صنعتی.

## ۱- مقدمه

مورد استفاده قرار گرفت. این ایده برای کنترل درایورهای موتور الکتریکی، هواپیما، پروسه‌های شیمیایی و ربات [۴-۸] با موفقیت مورد استفاده قرار گرفت. کنترل مد لغزشی یک نوع خاصی از کنترل ساختار متغیر می باشد. در کنترل مد لغزشی، سیستم کنترلی ساختار متغیر طوری طراحی می شوند که حالت‌های سیستم در نزدیکی یک تابع سوئیچینگ قرار بگیرند [۹-۱۰]. این حالت دو مزیت دارد. اولاً، رفتار دینامیکی سیستم با انتخاب تابع سوئیچینگ ممکن است مناسب شود. ثانیاً، پاسخ حلقه بسته سیستم به کلاس خاصی از نایقینی‌های سیستم غیر حساس می شود. این روش طراحی شامل دو قسمت می باشد. یکی طراحی تابع سوئیچینگ طوری که حرکت‌های لغزشی مشخصه‌های طراحی را ارضا کند. دیگری یک فیدبک حالت می باشد که حالت‌ها را به سمت سطح لغزش میل می دهد. در اواخر دهه ۷۰ اولین بار الگوریتم کنترل پیشبین بر اساس مدل معرفی شد که در آن از روی یک مدل دینامیکی پروسه، خروجی‌های پروسه در آینده تخمین زده

سیستم‌های کنترل ساختار متغیر به عنوان یک کلاس مخصوصی از سیستم‌های غیرخطی، بوسیله تعداد زیادی از محققین همانند بارباشین [۱] و اتکین [۲،۳] آغاز شده بود. در همان آغاز از آن برای حل مسایل کنترلی معین در سیستم‌های خطی درجه دوم و سیستم‌های غیرخطی استفاده می شد. مقاوم بودن در برابر نایقینی‌ها و اغتشاشات خارجی بهترین مشخصه کنترل ساختار متغیر می باشد. هر چند این ساختار کنترلی در ابتدا مورد توجه محققین و مهندسين قرار نگرفته بود اما بعد از انتشار مقاله اتکین [۲] این روند به گونه‌ای دیگر درآمد. در اواخر دهه ۸۰ محققین کنترلی به این روش علاقه زیادی نشان دادند. بعضی از مفاهیم و تئوری‌های پیشرفته آن در مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به دلیل عملکرد مطلوب و تغییرناپذیری و مقاوم بودن کنترل ساختار متغیر، این روش به سرعت توسعه پیدا کرد و در اغلب سیستم‌ها

برای این امر مطابق [23] خواهیم داشت:

$$\dot{s}(t) = -q|s|^h \text{sign}(s) \quad 0 < h < 1, q > 0 \quad (5)$$

با استفاده از (۲) و (۵) خواهیم داشت:

$$\frac{d^2}{dt^2} e(t) + \mu_1 \frac{d}{dt} e(t) + \mu_0 e(t) = -q|s|^h \text{sign}(s) \quad (6)$$

با جایگزینی (۲) در (۶) خواهیم داشت:

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{d^2}{dt^2} r(t) + \mu_1 \frac{d}{dt} (r(t) - x(t)) + \mu_0 e(t) - q|s|^h \text{sign}(s) \quad (7)$$

از طرفی برای تابع تبدیل سیستم نیز داریم:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_0 s} = \frac{x(t)}{u(t)} \quad (8)$$

با استفاده از تقریب پاده برای قسمت تاخیری تابع تبدیل

سیستم مشتق دوم حالت خروجی به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -\frac{1}{\tau t_0} \left( (\tau + t_0) \frac{dx(t)}{dt} + x(t) + Ku(t) \right) \quad (9)$$

با جایگزینی (۹) در (۷) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{t_0 \tau} \left( Ku(t) - (\tau + t_0) \frac{d}{dt} x(t) - x(t) \right) = \frac{d^2}{dt^2} r(t) \quad (10)$$

$$+ \mu_1 \frac{d}{dt} (r(t) - x(t)) + \mu_0 e(t) - q|s|^h \text{sign}(s)$$

در نتیجه قانون کنترلی به صورت زیر در خواهد آمد:

$$u(t) = \frac{t_0 \tau}{K} \left( \left( \frac{(\tau + t_0)}{t_0 \tau} - \mu_1 \right) \frac{d}{dt} x(t) + \frac{1}{t_0 \tau} x(t) + \mu_0 e(t) - q|s|^h \text{sign}(s) + \frac{d^2}{dt^2} r(t) + \mu_1 \frac{d}{dt} r(t) \right) \quad (11)$$

در [۲۴] نشان داده شده است مشتقات ورودی مرجع تأثیری بر عملکرد سیستم نخواهند داشت و وجودشان در قانون کنترلی بی اثر خواهد بود. بنابراین خواهیم داشت:

$$u(t) = \frac{t_0 \tau}{K} \left( \left( \frac{(\tau + t_0)}{t_0 \tau} - \mu_1 \right) \frac{d}{dt} x(t) + \frac{1}{t_0 \tau} x(t) + \mu_0 e(t) - q|s|^h \text{sign}(s) \right) \quad (12)$$

مطابق [۲۰] پارامترهای تنظیم کننده سطح لغزش به صورت زیر انتخاب می شوند:

$$\mu_1 = \frac{\tau + t_0}{t_0 \tau} \quad (13)$$

می شدند [۱۱]. سپس با مشخص شدن کارایی بالا الگوریتم های کنترل پیشبین، این روش به سرعت مورد علاقه محققین گرفت طوری که در دهه ۸۰ روش های مختلفی ارائه شد [۱۳، ۱۲]. یکی از مناسب ترین الگوریتم های پیشنهادی الگوریتم کنترل پیشبین توسعه یافته بود که در سال ۱۹۸۷ معرفی شد [۱۴، ۱۵]. سپس این الگوریتم در چند سال اخیر بسط پیدا کرد [۱۶-۱۹]. کنترل پیشبین مد لغزشی نیز اولین بار در سال ۲۰۰۲ معرفی شد [۲۰، ۲۱] و سپس با انجام کارهای دیگر بر روی آن مورد توجه قرار گرفت [۲۲]. در این مقاله از یک روش جدید ساختار متغیر استفاده شده است که در آن با انتخاب مناسب تابع سوئیچینگ کارایی کنترل کننده بسیار بالا می رود. همچنین از کنترل پیشبین توسعه یافته در طراحی سطح لغزش و ضریب تابع سوئیچینگ کنترل مد لغزشی استفاده شده است. مطالب ارائه شده در این مقاله به این ترتیب می باشند: در بخش ۲ الگوریتم کنترل پیشبین ساختار متغیر جدید برای مدل سیستم مرتبه اول تاخیردار آورده شده است. در بخش ۳ شبیه سازی های انجام شده بر روی یک سیستم نمونه آورده شده است. در بخش ۴ نیز نتایج به دست آمده از کار انجام گرفته آورده شده است.

## ۲- کنترل کننده پیشبین ساختار متغیر برای یک سیستم

### تأخیردار مرتبه اول

سیستم تاخیردار مرتبه اول که معمولاً تقریبی مناسب برای پروسه های صنعتی می باشد را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_0 s} \quad (1)$$

که در آن K بهره ثابت پروسه،  $\tau$  ثابت زمانی پروسه و  $t_0$  تاخیر سیستم می باشد. حال برای طراحی کنترل کننده مد لغزشی ابتدا باید سطح لغزش انتخاب شود بر این اساس سطح لغزش به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$s(t) = \frac{d}{dt} e(t) + \mu_1 e(t) + \mu_0 \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

که در آن  $\mu_0$  و  $\mu_1$  پارامترهای قابل تنظیم و  $e(t)$  خطا که به صورت زیر تعریف می شود.

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (3)$$

که در آن  $x(t)$  حالت خروجی و  $\Gamma(t)$  ورودی مرجع سیستم می باشد. حال باید یک قانون کنترلی پیدا کنیم که شرط حصول را ارضا کند:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (4)$$

k می‌باشد و  $w(k+d+1)$  مرجع آینده برای  $d+1$  لحظه جلوتر می‌باشد. الگوریتم کنترل پیشبین طوری Q را نتیجه می‌دهد که تابع هزینه زیر کمینه شود.

$$J = \sum_{j=d+1}^{N+d+1} [y(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=d+1}^{N+d+1} \lambda [Q(k+j-1)]^2 \quad (22)$$

که در آن N افق پیش‌بینی و  $\lambda$  وزن ورودی می‌باشد. با به‌دست آمدن Q در هر لحظه قسمت تابع سوئیچینگ قانون کنترلی ما تقریباً حل شد. برای کامل شدن این قسمت مطابق [۲۳] از آنجائیکه sp یک سطح لغزشی است که براساس لحظات آینده شکل گرفته است بنابراین در صورت تغییر ورودی مرجع دنبال کردن آن با تاخیر انجام خواهد شد برای رفع چنین مشکلی عبارت زیر هم به تابع سوئیچینگ اضافه می‌شود.

$$w(k+d+1) - r(k) \quad (23)$$

با اضافه شدن جمله فوق قانون کنترلی ما تا اینجا به‌صورت زیر در خواهد آمد.

$$u(k) = \frac{1}{K} x(k) + \frac{(\tau+t_0)^2}{4Kt_0\tau} e(k) - Q|s(k)|^h (\text{sign}(s(k)) + w(k+d+1) - r(k)) \quad (24)$$

از آنجائی که قانون کنترلی بالا دارای تابع sign می‌باشد، بنابراین قانون کنترلی ما دارای chattering فراوان خواهد بود برای رفع این مشکل در اینجا از تابع جدید زیر استفاده شده‌است.

$$[\tanh(s/\alpha)]^\beta \quad (25)$$

صاف و هموار بودن تابع معرفی شده و همچنین مشتق پذیر بودن آن عاملی شده است که استفاده از این تابع بسیار کارا و موثر باشد. با جایگزینی تابع بالا در قانون کنترلی، سه پارامتر قابل تنظیم خواهیم داشت. برای پیدا کردن بهینه این پارامترها از دو معیار استفاده شده‌است.

یکی انتگرال خطا، مطابق معادله زیر:

$$ie(t) = \int_0^t (y(t) - r(t)) dt \quad (26)$$

و دیگری انتگرال قدر مطلق مشتق دوم خروجی و یا ورودی که این تابع مطابق [۲۵] معیاری برای محاسبه chattering به‌شمار می‌آید.

$$\mu_0 = \frac{1}{4} \left( \frac{\tau+t_0}{t_0\tau} \right)^2 \quad (14)$$

بنابراین قانون کنترلی مشخص می‌شود. صورت گسسته قانون کنترلی به‌صورت زیر در می‌آید:

$$u(k) = \frac{1}{K} x(k) + \frac{(\tau+t_0)^2}{4Kt_0\tau} e(k) - Q|s(k)|^h \text{sign}(s(k)) \quad (15)$$

که در آن  $Q = \frac{t_0\tau}{K} q$  است. اکنون نوبت به تعیین مقدار بهینه Q با استفاده از الگوریتم پیشبین توسعه یافته رسید. روش پیشبین بر اساس زمان گسسته می‌باشد. مدل فوق در حالت گسسته زمان و با استفاده از روش نگهدارنده مرتبه اول به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G(z^{-1}) = \frac{bz^{-1}}{1-az^{-1}} z^{-d} \quad (16)$$

که در آن پارامترهای a و b و d به‌صورت زیر بوده و T هم‌زمان نمونه برداری می‌باشد

$$d = \frac{\tau d}{T}, a = e^{-\frac{T}{\tau}}, b = k(1-a) \quad (17)$$

کنترل پیشبین توسعه یافته در این قسمت تلاش می‌کند که بنابراین تابع سوئیچینگ بر روی یک سطح لغزش پیش‌بینی شده کار می‌کند. بنابراین شکل زمان گسسته سطح لغزش با توجه به (۲) به‌صورت زیر می‌شود:

$$s_p(k) = \frac{e(k+d+2) - e(k+d+1)}{T_s} + \mu_1 e(k+d+1) + \mu_0 \sum_0^k e(k+d+1) \quad (18)$$

با توجه به [۱۹] ضریب تابع سوئیچینگ به‌صورت زیر در می‌آید:

$$Q(k) = Q(k-1) + kGPC\hat{e}f \quad (19)$$

که در آن بردار ستونی خطای پیش‌بینی شده می‌باشد.

$$\hat{e}f = \begin{bmatrix} \hat{y}_f(k+d+1|k) - w(k+d+1) \\ \dots \\ \hat{y}_f(k+d+N|k) - w(k+d+N) \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

و kGPC اولین سطر از ماتریس بهره KGPC می‌باشد، که به صورت زیر به دست می‌آید.

$$KGPC = \left( G^T G + \lambda I_{N \times N} \right)^{-1} G^T \quad (21)$$

که G ماتریس مدل پروسه و  $I_{N \times N}$  ماتریس مشخصه با بعد N می‌باشد. همچنین در (۲۰)  $\hat{y}_f(k+d+1|k)$  پاسخ پیش‌بینی شده برای لحظه  $k+d+1$  به شرط داشتن پاسخ تا لحظه

مقدار خیلی کمی نسبت به دو کنترل دیگر سریعتر می‌باشد ولی کنترل کننده معرفی شده پاسخ خیلی بهتری نسبت به دوتای دیگر داشته‌است. همچنین کنترل کننده ارائه شده با اینکه یک کنترل کننده ساختار متغییر می‌باشد ولی همان طوری که مشاهده می‌شود دارای chattering کمتری و همچنین خطای کمتری نسبت به دو تای دیگر می‌باشد.

در شکل (۲) پاسخ برای وقتی که ۱۵ درصد خطا در تاخیر سیستم وجود داشته باشد آورده شده‌است. همان طوری که مشاهده می‌شود در این حالت کنترل پیشبین ناپایدار شده است و کنترل کننده ارائه شده نیز دارای خطا و chattering کمتری نسبت به کنترل کننده معمول PSMC می‌باشد.

در شکل‌های (۳ و ۴) نیز پاسخ به ترتیب برای حالتی که دارای ۵۰ درصد خطا در بهره و lag سیستم داشته باشیم آورده شده‌است. همان طوری که مشاهده می‌شود در این دو حالت کنترل کننده ارائه شده باز هم نسبت به دو کنترل کننده دیگر بهتر جواب می‌دهد. اما در سه شکل آخری مشاهده می‌شود که حساسیت کنترل کننده پیشبین به خطا در تاخیر خیلی بالاتر از حساسیت به بهره و lag سیستم است.

$$cc(t) = \int_0^t \left| \frac{d^2 y}{dt^2} \right| dt \quad (27)$$

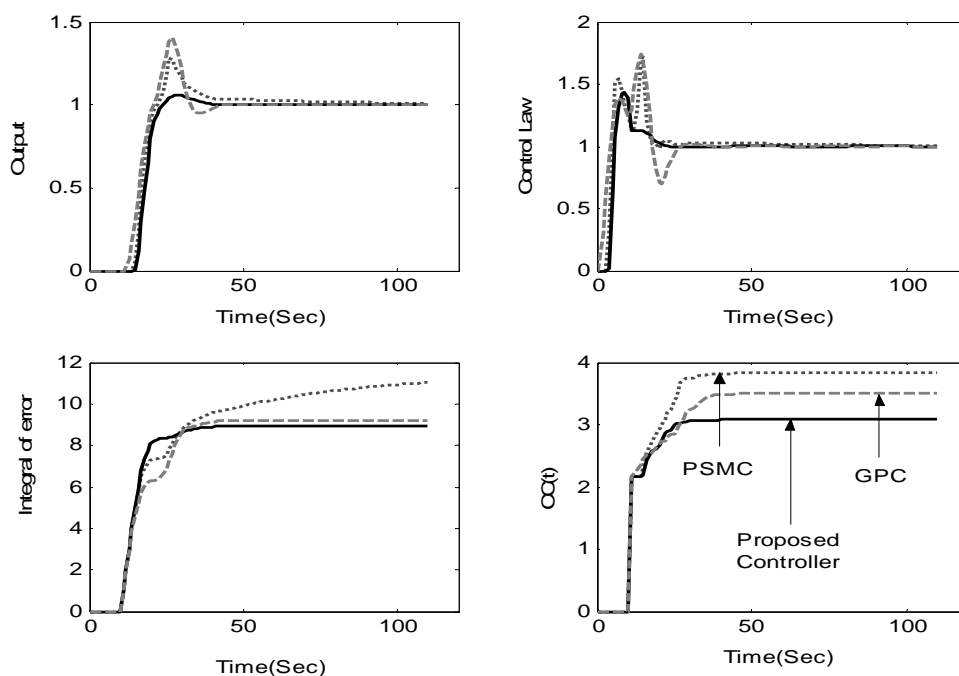
با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک برای کمینه کردن دو رابطه (۲۶) و (۲۷) پارامترهای  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $h$  به دست خواهند آمد و قانون کنترلی کاملاً مشخص خواهد شد.

### ۳- نتایج شبیه سازیها

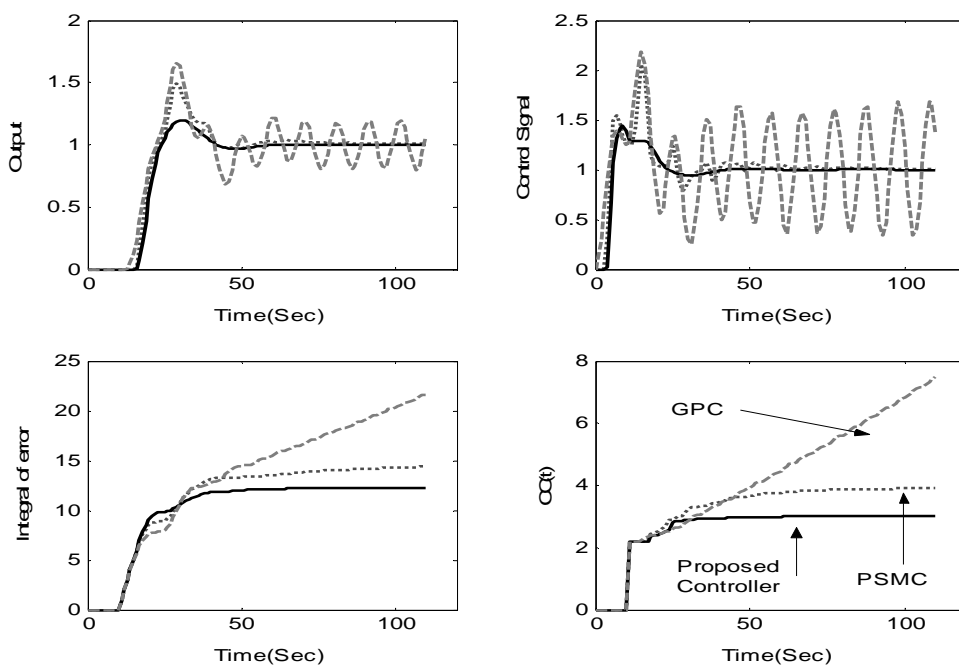
در این بخش یک مدل سیستم مرتبه اول تاخیردار مطابق (۱) در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی مقاوم بودن الگوریتم زیر نایقینی‌هایی نیز در سیستم در نظر گرفته می‌شود. مقادیر پارامترهای سیستم در زیر آورده شده‌اند.

$$K = 1, \tau = 5, t_o = 10, N = 5 \quad (28)$$

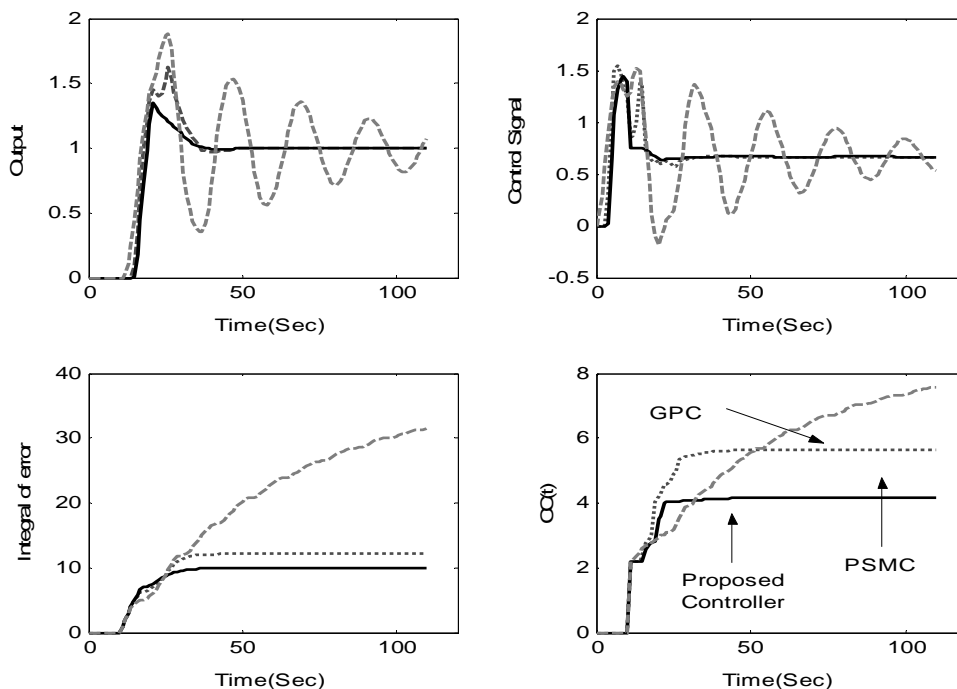
برای بررسی کیفیت کنترل کننده ارائه شده، عملکرد این الگوریتم با کنترل کننده پیشبین توسعه یافته [۱۹] و کنترل کننده معمول مد لغزشی پیشبین [۲۱، ۲۲] بررسی شده‌است. ابتدا پاسخ سیستم بدون در نظر گرفتن نایقینی در شکل (۱) آورده شده‌است. همان طوری که در شکل مشخص می‌باشد کنترل کننده پیشبین



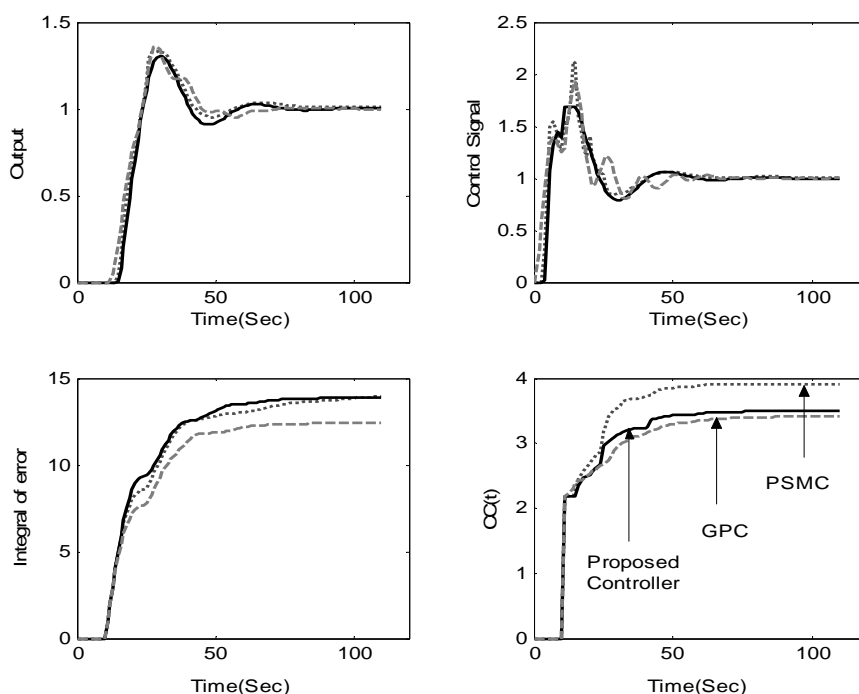
شکل ۱- پاسخ سیستم بدون وجود هیچ نایقینی



شکل ۲- پاسخ سیستم با وجود ۱۵٪ خطا در تأخیر



شکل ۳- پاسخ سیستم با وجود ۵۰٪ خطا در بهره سیستم



شکل ۴- پاسخ سیستم با وجود ۵۰٪ خطا در lag سیستم

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترل پیشبین ساختار متغیر مقاوم و بدون chattering برای یک سیستم مرتبه اول تاخیردار ارائه شد. در این الگوریتم از یک تابع هموار جدید برای تابع سوئیچینگ و همچنین از یک کنترل پیشبین توسعه یافته برای تعیین ضریب تابع سوئیچینگ استفاده شد. همان طوری که در شبیه سازی ها دیده شد با اصلاح کنترل مد لغزشی پیشبین معمولی، قوام سیستم به مراتب افزایش یافت و سیستم chattering های قبلی خود را که در PSMC دیده می شود را حذف کرد. مقاوم بودن و عملکرد بهتر روش ارائه شده نسبت به نایقینی های موجود در سیستم از نکات برجسته این الگوریتم به شمار می رود.

#### ۵- مراجع

- [2] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding mode." IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.22, 2, April 1977.
- [3] V. I. Utkin, Sliding modes in control optimization, New York, Springer-Verlag, 1992.
- [4] H. Ebrahimirad, M. Jalili-Kharaajoo, M.J. Yazdanpanah, and B. Labibi, "Feedback linearization with sliding mode control of current and arc length of GMAW systems", 4<sup>th</sup> IFAC Sym. Robust Control Design, ROCOND2003, Italy, June 2003.
- [5] H. Ebrahimirad, S. Vaez-Zadeh, and M. Jalili-Kharaajoo, "Speed Control of PM Synchronous Motor: Comparison of Sliding Mode and PI Controllers", IEEE CCA, Istanbul, Turkey, June, 2003, pp. 99-102.
- [6] H. Ebrahimirad, S. Vaez-Zadeh, and M. Jalili-Kharaajoo, "Rubust Sliding Mode Control Applied to Speed Control of PM Synchronous Motors", IEEE SCS2003, Iasi, Romania, July 2003, pp. 317-320.
- [1] E. A. Barbashin, E. I. Geraschenko, "On speeding up sliding modes in automatic control systems." Differentsialniye Uravneniya, Vol. 1, 25-32, 1965.

- [22] M. Perez de la Parte, E. F. Camacho, "**Application of a Predictive Sliding Mode Controller to a heat exchanger**", IEEE CCA, Glasgow, Scotland, Sep. 2003, pp 1219-1224.
- [23] W. B. Gao, J. C. Hung, "**Variable structure control of nonlinear system: a new approach**", IEEE Transaction on Industrial Electronics, 40(1), Feb, 1993.
- [24] O. Camacho. "**A new approach to design and tune sliding mode controllers for chemical processes**", Ph. D Dissertation, University of South Florida, Tampa, Florida, 1996.
- [7] Y. Stepanenko, C. Su, "**Variable structure control of robot manipulator with nonlinear sliding manifolds**", INT. J. Control, 58(2), 285-300, 1993.
- [8] J.-X. Xu, W.-J. Cao, "**Synthesized sliding mode control of a single-like flexible robot.**", Int. J. control 73(3), 197-209, 2000.
- [9] G. Bartolini, P. Pydynowski, "**An improved, chattering free, VSC: scheme for uncertain dynamics systems**", IEEE Transaction on Automatic Control, 41(8), August 1996.
- [10] G. Bartolini, A. Ferrara and E. Usai, "**Chattering avoidance by second-order sliding mode control**", IEEE Transactions on Automatic Control, 43(2), February 1998.
- [11] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, and J. Papon, "**Algorithmic control of industrial processes**", In Proc. of the 4th IFAC symposium on identification and system parameter estimation, pp. 1119-1167, 1976.
- [12] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud and J. Papon, "**Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes**", Automatica, 14, 413-428, 1978.
- [13] C. R Cutler and B. L. Ramaker, "**Dynamic matrix control—a computer control algorithm**", In Proc. of the joint automatic control conference, 1980.
- [14] D. W Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tuffs. "**Generalized Predictive Control- Part I and II**", Automatica, 23 (2), pp. 137-160, 1987.
- [15] D. W Clarke, C. Mohtadi. "**Properties of Generalized Predictive Control**", Automatica, 25, pp. 859-875, 1989.
- [16] J. R Gossner, B. Kouvaritakis and J. A. Rossiter. "**Stable Generalized Predictive Control with Constraints and Bounded Disturbances**", Automatica, 33, pp. 551-568, (1997).
- [17] E. F. Camacho. "**Constrained Generalized Predictive Control**", IEEE Transactions on Automatic Control, 38, pp. 327-332, (1993).
- [18] C. Bordons, E. F. Camacho. "**A Generalized Predictive Controller for a Wide Class of Industrial Processes**", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 6, pp. 372-387, (1998).
- [19] E. F Camacho, C. Bordons, **Model Predictive Control**, Springer, 1999.
- [20] Oscar Camacho, "**A Predictive approach based- sliding mode control**", 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [21] M. Perez de la Parte, O. Camacho, and E.F. Camacho, "**A GPC-based Sliding Mode Controller or nonlinear chemical processes**", ISA Transactions. Vol. 41, 2002.