

## توسعه‌ی روشی جدید برای طراحی سامانه‌های کنترل تطبیقی پیش‌فاز - پس‌فاز

امیر نصیرهرند (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فن‌آوری‌های نوین، گروه مهندسی فضایی، دانشگاه شهید بهشتی

حسن کریمی (استادیار)

دانشکده‌ی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

در این پژوهش روشی جدید برای طراحی سامانه‌های کنترل تطبیقی پیش‌فاز - پس‌فاز خودتنظیمی<sup>۱</sup> گسترش یافته است. کاربرد این روش در یک ربات غیرخطی که روش‌های متداول کنترل خطی در آن موفق نبودند نیز بررسی شده است. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی پیش‌فاز - پس‌فاز توسط بلوک خودتنظیمی با حل یک سری معادلات چبری خطی تعیین می‌شود. این روش کنترل با در نظر گرفتن معادلات غیرخطی سامانه ارائه شده و کاربرد آن باعث کاهش هزینه‌ی ساخت سامانه‌های کنترل خودکار با دقت و کارایی بالا می‌شود.

### ۱. مقدمه

سیگنال تحریک‌کننده است اقداماتی صورت گرفته است.<sup>[۲]</sup> نوع دیگر طراحی این نوع کنترل‌کننده‌ها مبتنی بر نظریه‌ی فازی است.<sup>[۳]</sup> تحقیق‌های دیگری نیز در راستای طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی پیش‌فاز - پس‌فاز برای فرایندهای غیرخطی نیز به انجام رسیده است.<sup>[۴-۷]</sup> در زمینه‌ی طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی پیش‌فاز - پس‌فاز نیز تحقیق‌هایی انجام شده که محدود به فرایندهای خطی هستند.<sup>[۸]</sup> هدف این تحقیق طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی پیش‌فاز - پس‌فاز به منظور استفاده در فرایندهای غیرخطی است که در نوع خود کاملاً جدید است.

نوآوری‌های این پژوهش عبارت‌اند از: ۱. ابداع یک روش جدید تطبیقی خود تنظیم برای طراحی سامانه‌های کنترل؛ ۲. کاربرد روش طراحی ابداع شده در یک سامانه‌ی خاص کنترل خودکار از نوع ربات‌های صنعتی غیرخطی.

### ۲. روش طراحی

روش طراحی نظام‌مند، و شامل ۷ گام است. این گام‌ها عبارت‌اند از: ۱. تعیین مدل مرجع که همانا تعیین تابع تبدیل ایده‌ال با رفتار دلخواه سامانه‌ی پس‌خوراند است؛ ۲. تولید توابع توصیف‌کننده‌ی دستگاه در برنامه‌های کاری مورد نظر (باید یادآور شویم که واژه‌ی برنامه‌ی کاری با واژه‌ی نقطه‌ی کاری متفاوت است)؛ ۳. تعیین ساختار تابع تبدیل سامانه به منظور متمایز ساختن رفتار سامانه‌ی کنترل خودکار در برنامه‌های کاری متفاوت؛ ۴. تعیین دینامیک بلوک شناسه<sup>۲</sup>؛ ۵. تعیین بازه‌ی فرکانس مورد نظر به منظور بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌ی پیش‌فاز - پس‌فاز

دست‌یابی به روش‌های مناسب برای طراحی منطق سامانه‌ی کنترل، به منظور کاربرد در دستگاه‌های کنترل خودکار یکی از اهداف مهم پژوهش‌ها در این زمینه است. اهمیت دست‌یابی به این روش‌ها در سامانه‌های کنترل خودکار امروزی که باید سرعت و دقت و کارایی بالاتری نسبت به سامانه‌های سنتی الکترومکانیکی داشته باشند و نیز از هزینه‌ی کم‌تری برخوردار باشند محرز است. همچنین ابداع روش‌های کنترل تطبیقی مناسب برای استفاده در یک سامانه‌ی کنترل (شامل حساسه‌ها، واحدهای فراخوانی خودکار<sup>۲</sup> (اکچویتورها) در رایانه، ریزپردازها و ابزارهای مربوط به کنترل در زمان حقیقی) کاربرد ویژه‌ی پیدا کرده است.

ربات‌های صنعتی، سرومکانیزم‌ها و وسایل نقلیه‌ی هوایی از جمله سامانه‌های مرتبط با این تحقیق‌اند. پیشرفت فن‌آوری کنترل خودکار به منظور بالا بردن دقت و سرعت، کوچک کردن ابعاد، پایین آوردن هزینه و هوشمند ساختن این نوع محصولات مستقیماً با گسترش روش‌های نظام‌مند و ساده برای طراحی سامانه‌های کنترل دستگاه‌ها (با در نظر گرفتن معادلات غیرخطی آن‌ها در ارتباط است). برای مثال، کاربرد این روش‌ها در سامانه‌های کنترل خودکار باعث می‌شود که نیاز به واحدهای فراخوان خودکارگران قیمت که در آن‌ها اثرات غیرخطی کمیته باشد از بین برود. در نتیجه، هزینه‌ی سامانه با کارایی بالاتر به مراتب کاهش می‌یابد. روش‌های متعددی برای طراحی کنترل‌کننده‌های خطی پیش‌فاز - پس‌فاز برای فرایندهای خطی وجود دارند.<sup>[۱]</sup> در زمینه‌ی طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی پیش‌فاز - پس‌فاز برای فرایندهای خطی به منظور رسیدن به سامانه‌ی مدار بسته‌ی که رفتار آن وابسته به دامنه‌ی

مربع‌ها<sup>[۱۵]</sup> استفاده می‌شود. برای انجام این کار مدل پس‌رفت<sup>۶</sup> زیر را در نظر بگیرید:

$$y(t) = \varphi_1(t)\theta_1 + \varphi_2(t)\theta_2 + \dots + \varphi_n(t)\theta_n = \varphi^T(t)\theta \quad (۱)$$

که در آن  $y(t)$  متغیر مشاهده شده،  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  پارامترهای مجهول و  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  تابع‌های معلومی هستند که ممکن است به متغیرهای معلوم دیگری وابسته باشند. روش تخمین‌زنی براساس روش حداقل مربع‌ها است. تخمین حداقل مربع‌ها برای پارامترهای فرایند،  $\hat{\theta}$ ، به‌صورت بازگشتی از معادلات ۲ تا ۴ محاسبه می‌شود:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (۲)$$

$$K(t) = P(t-1)\varphi(t)[I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)]^{-1} \quad (۳)$$

$$P(t) = P(t-1) - P(t-1)\varphi(t)[I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)]^{-1}\varphi^T(t)P(t-1) \quad (۴)$$

حال این سؤال مطرح می‌شود که چگونه می‌توان پارامترهای مدل ورودی-خروجی یک فرایند خطی را تعیین کرد؟ اول باید مدل پس‌رفت مسئله را به‌دست آورد و سپس با استفاده از معادله‌های ۲ تا ۴ پارامترها را تخمین زد. برای روشن شدن این مطلب مدل دینامیکی ۵ را در نظر بگیرید.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = b_1 \frac{du}{dt} + b_2 u \quad (۵)$$

با استفاده از عامل  $p$  می‌توان معادله‌ی ۵ را چنین نوشت:

$$y = -\frac{a_1}{p}y - \frac{a_2}{p^2}y + \frac{b_1}{p}u + \frac{b_2}{p^2}u \quad (۶)$$

بنابراین با تعریف  $\theta$  و  $\varphi(t)$  به‌صورت روابط ۷ و ۸ مدل پس‌رفت دلخواه به‌دست می‌آید.

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ b_1 \ b_2] \quad (۷)$$

$$\varphi(t) = \left[ -\frac{1}{p}y \quad -\frac{1}{p^2}y \quad \frac{1}{p}u \quad \frac{1}{p^2}u \right] \quad (۸)$$

چنان که اشاره شد، با استفاده از معادله‌های ۲ تا ۴ پارامترهای مدل پس‌رفت تخمین زده می‌شوند. لازم به ذکر است که برای شروع الگوریتم

توسط الگوریتم گسترش‌یافته‌ی بلوک خودتنظیم مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ ۶. تعیین بهره‌ی بلوک متناسب<sup>۴</sup> برای جبران و هماهنگ‌سازی تقریب سیستم غیرخطی با ساختار مشخص شده در گام ۳؛ ۷. تأیید پایداری و کارایی طراحی با تعیین شبه پاسخ فرکانسی سیستم به‌کمک نظریه‌ی پایداری نایکوئیست<sup>۵</sup> و شبیه‌سازی دیجیتالی در حوزه‌ی زمان. ۱. تعیین مدل مرجع: در گام اول تابع تبدیلی که رفتار ایده‌آل سامانه‌ی پس‌خوراند مورد نظر را متمایز می‌کند تعیین می‌شود. یکی از امتیازات این کار اطمینان یافتن استفاده‌کننده از مناسب بودن مشخصات فنی مورد نظر است. برای بیشتر مسائل، تابع تبدیل دلخواه از رسته‌ی ۲ است که قطب‌های دلخواه دارد و مشخصه‌های خطا در شرایط استاتیکی را ارضا می‌کند. مشخصات فنی در حوزه‌ی فرکانس یا زمان، به‌کمک معادلات مربوطه<sup>[۱۰]</sup> قابل تبدیل به فرکانس طبیعی و ضریب میرایی دلخواه هستند. سپس، مشخصات خطا در شرایط استاتیکی، صفر تابع تبدیل را تعیین می‌کند. صفر تابع تبدیل دلخواه توسط روابط تعریف‌کننده‌ی خطا در شرایط استاتیکی تعیین می‌شود. روش دیگری نیز برای تعیین تابع تبدیل دلخواه با مشخصات فنی مخلوط در حوزه‌های فرکانس و زمان ارائه شده است.<sup>[۱۱]</sup>

۲. تولید توابع توصیف‌کننده: در گام دوم تابع توصیف‌کننده‌ی سامانه در برنامه‌های کاری متفاوت تعیین می‌شود. دلایل اصلی برای تولید این توابع را می‌توان چنین برشمرد: ۱. نمی‌توان سامانه‌هایی را که شامل معادلات غیرخطی ناپیوسته‌اند خطی کرد؛ ۲. در برنامه‌های کاری متفاوت، سازی سامانه (به‌علت غیرخطی بودن) تغییر می‌کند؛ ۳. توابع توصیف‌کننده حافظ خصوصیت اصلی سامانه‌ی غیرخطی -- وابستگی رفتار آن سامانه به دامنه‌ی سیگنال تحریک‌کننده -- است. امتیازات دیگر استفاده از تابع توصیف‌کننده برای طراحی نظام‌مند کنترل‌کننده به‌منظور استفاده در سیستم‌های غیرخطی ارائه شده است.<sup>[۱۲]</sup> فهرست برنامه‌های تولید توابع توصیف‌کننده برای سیستم‌های چندمتغیره و غیرخطی<sup>[۱۳]</sup> و نیز شرح نظریه‌ی تولید توابع توصیف‌کننده برای سیستم‌های غیرخطی تشریح شده است.<sup>[۱۴]</sup>

۳. شناسایی مدل خطی: در گام سوم مدل‌های خطی فرایند که مدل‌های توابع توصیف‌کننده‌ی مرحله‌ی قبل را متمایز می‌کنند شناسایی می‌شوند. چون مدل‌های توابع توصیف‌کننده نمایانگر یک سیستم غیرخطی‌اند، رابطه‌ی استاندارد موجود بین قسمت حقیقی و مجازی مدل فرکانسی در سیستم‌های خطی، در مدل‌های توابع توصیف‌کننده برقرار نیست.<sup>[۱۴]</sup> برای تأمین هدف در این مرحله، می‌توان از دستور invfreqs نرم‌افزار MATLAB استفاده کرد. این دستور، نکاتی را که باید در ضمن شناسایی مدل خطی در نظر گرفت لحاظ می‌کند.

۴. طراحی بلوک شناسه: در گام چهارم باید دینامیک بلوک شناسه تعیین شود. در این پژوهش از الگوریتم شناسایی توسط روش حداقل

تخمین زدن باید مقادیر اولیه برای ماتریس  $P$  و بردار  $\theta$  را داشته باشیم.

$$A = h_2 g_1 - h_2 g_2 - h_1 g_1 + h_2 g_2 \quad (16)$$

$$B = -h_2 g_2 - h_2 g_1 + h_1 g_2 + h_2 g_1 \quad (17)$$

$$D = h_1 g_2 + h_2 g_2 \quad (18)$$

$$E = h_1 g_2 - h_2 g_2 \quad (19)$$

در ادامه، با مشتق‌گیری از تابع هدف نسبت به پارامترهای جبران‌کننده، و با قراردادن نتیجه برابر با صفر، مجموعه‌ی معادلات جبری خطی به صورت رابطه‌ی ۲۰ حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} T_1 & 0 & -T_2 & R_1 & S_2 \\ 0 & T_2 & 0 & -S_2 & R_2 \\ -T_2 & 0 & T_2 & -R_2 & -S_2 \\ R_1 & -S_2 & -R_2 & Q_2 & 0 \\ S_2 & R_2 & -S_2 & 0 & Q_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ R_1 \\ -S_2 \\ 0 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

که در آن:

$$T_k = \int_{\omega_1}^{\omega_2} (A^T + B^T) \omega^k d\omega \quad (21)$$

$$R_k = \int_{\omega_1}^{\omega_2} (AD + BE) \omega^k d\omega \quad (22)$$

$$S_k = \int_{\omega_1}^{\omega_2} (AE - BD) \omega^k d\omega \quad (23)$$

$$Q_k = \int_{\omega_1}^{\omega_2} (D^T + E^T) \omega^k d\omega \quad (24)$$

بنابراین، با داشتن یک مدل خطی (خروجی گام چهارم)، تابع تبدیل سیستم پس‌خوراند دلخواه (خروجی گام ۱) و بازه‌ی فرکانس مورد نظر،

۵. تعیین بازه فرکانس دلخواه: در گام پنجم بازه‌ی فرکانس مورد نظر تعیین می‌شود. برای روشن شدن این مطلب، آشنایی با دینامیک خودتنظیم که در این پژوهش گسترش یافته، ضروری است. تابع تبدیل شناسایی شده در گام چهارم به صورت رابطه‌ی ۹ نمایش داده می‌شود.

$$G_p(j\omega) = \frac{g_1 + g_2 j}{g_2 + g_2 j} \quad (9)$$

سپس، مدل کنترل‌کننده‌ی پیش‌فاز - پس‌فاز (رابطه‌ی ۱۰) را در نظر بگیرید.

$$G_c(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2}{1 + b_1 s + b_2 s^2}, \quad s = j\omega \quad (10)$$

تابع تبدیل دلخواه، که در گام نخست شناسایی شد، طبق رابطه‌ی ۱۱ نمایش داده می‌شود.

$$F(j\omega) = \frac{h_1 + h_2 j}{h_2 + h_2 j} = \frac{Y_1}{Y_2} \quad (11)$$

سیستم پس‌خوراند طراحی شده به صورت رابطه‌ی ۱۲ علامت‌گذاری می‌شود.

$$G_{cl} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (12)$$

سپس، تابع هدف همانندساز عینی<sup>۷</sup> تشکیل می‌شود.

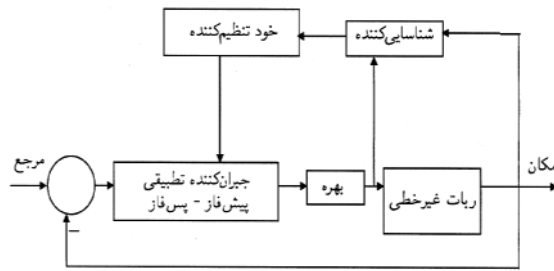
$$J' = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left| \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Y_1}{Y_2} \right|^2 d\omega \quad (13)$$

تابع فوق به هنگام کمینه کردن نسبت به پارامترهای کنترل‌کننده به یک سری معادلات جبری غیرخطی تبدیل می‌شود که باید به صورت عددی حل شوند. اما هدف این است که جوابی از فرم بسته<sup>۸</sup> گسترش یابد. توجه داشته باشید که در شرایط بهینه  $0 = Z_1 Y_2 - Z_2 Y_1 \Rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Y_1}{Y_2}$ . بنابراین، با فرض این که یک جواب وجود داشته باشد، تابع هدف به صورت رابطه‌ی ۱۴ خواهد بود.

$$J = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left| Z_1 Y_2 - Z_2 Y_1 \right|^2 d\omega \quad (14)$$

با جایگذاری معادلات ۹ تا ۱۲ در معادله‌ی ۱۴، رابطه‌ی ۱۵ حاصل می‌شود.

$$J = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left[ \begin{aligned} & (a_0 A + a_1 B \omega - a_2 A \omega^2 + b_1 D \omega + \\ & (-a_0 B + a_1 A \omega + a_2 B \omega^2 - b_1 E \omega + \\ & b_2 E \omega^2 - E)^2 + \\ & b_2 D \omega^2 - D)^2 \end{aligned} \right] d\omega \quad (15)$$



شکل ۱. سامانه‌ی پس‌خوراند کنترل تطبیقی خودتنظیم.

حدود ۶۰ درجه است. [۱۷] بنابراین فرایند به‌شدت غیرخطی است. در یک فرایند خطی فقط یک نمودار پاسخ فرکانسی برای بررسی رفتار فرایند در تمامی شرایط کاری کافی است. هدف این است که سامانه‌ی کنترل چنان طراحی شود که پس‌خوراند یک سری مشخصات فنی را در تمامی شرایط کاری ارضا کند. به‌عبارت دیگر، مطلوب است که یک سامانه‌ی پس‌خوراند غیرخطی تشکیل شود تا به ارزش دامنه‌ی تحریک‌کننده حساس نباشد.

در این پژوهش، کارایی یک کنترل‌کننده‌ی پیش‌فاز - پس‌فاز خودتنظیم که به‌روشنی بیان شده در بخش پیش طراحی می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم کنترل پس‌خوراند در شکل ۱ نشان داده شده است. طراحی این سامانه یک زمان نشست ۰٫۳ ثانیه با درصد فراجهش ۴۰ را نشان داد. [۱۷]

برای بلوک شناسه باید سازه‌ی مدل خطی مورد نظر را تعیین کرد. با استفاده از دستور invfreqs نرم‌افزار MATLAB مدل زیر تعیین شده است:

$$G_p = \frac{x_1 s + x_2}{s^2 + x_3} \quad (25)$$

برای تخمین پارامترهای مدل بالا  $(x_1, x_2, x_3)$  در بلوک شناسه از مقادیر اولیه‌ی (۱، ۱۴) و (۱، ۱۰) استفاده می‌شود. برای بلوک خودتنظیم، بازه‌ی فرکانس مورد نظر مطابق آنچه که در بخش گذشته ارائه شده، برابر ۱ تا ۱۰ قرار داده شد. تابع تبدیل دلخواه عبارت است از:

$$F = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (26)$$

که در آن  $\omega_n = 43.25$  و  $\zeta = 0.3$ . این ارزش‌ها برای فرکانس طبیعی و ضریب میرایی با مشخصات فنی دلخواه مطابقت دارند. از آنجا که این طراحی برای یک فرایند به‌شدت غیرخطی است و بلوک خودتنظیم در حوزه‌ی خطی است، ممکن است تغییر پارامترهای تابع تبدیل دلخواه ضروری باشد. در ابتدا، بهره‌ی بلوک متناسب را برابر با ۱ قرار داده، و سپس سیستم با ارزش دامنه‌ی تحریک‌کننده (۲۵٪) تحریک می‌شود. با بررسی خروجی سیستم آشکار شد که ضریب میرایی در حوزه‌ی

می‌توان با استفاده از معادله‌ی ۲۰ مستقیماً پارامترهای جبران‌کننده را تعیین کرد. براساس تجربه‌ی کسب شده در این پژوهش، تعیین بازه‌ی فرکانس مورد نظر کار مشکلی نیست. کاربر می‌تواند پهنای باند سیستم پس‌خوراند مورد نظر را تعیین، و براساس آن بازه‌ی فرکانس دلخواه را مشخص کند. اجرای روش طراحی در مسائل متفاوت نشان داده است که  $\omega_1 = 0$  و  $\omega_2 = 10$  مطلوب‌اند.

۶. تعیین بهره‌ی متناسب: در گام ششم بهره‌ی بلوک متناسب تعیین می‌شود. در ابتدا ارزش این بهره برابر با ۱ است. سپس با توجه به مقایسه‌ی رفتار سیستم طراحی در برنامه‌ی که اثرات معادلات غیرخطی با رفتار دلخواه چشم‌گیر هستند بهره‌ی بلوک متناسب با روش سعی و خطا تنظیم می‌شود. لازم به ذکر است که معمولاً با ۲ تا ۵ بار سعی و خطا ارزش مطلوب بلوک متناسب تنظیم می‌شود. در صورتی که سیستم کاملاً غیرخطی نباشد، بهره‌ی بلوک متناسب برابر با ۱ خواهد بود.

۷. تأیید طراحی: در گام هفتم، طراحی با استفاده از شبیه‌سازی دیجیتال تأیید می‌شود و با استفاده از نظریه‌ی نایکوئیست، پایداری سیستم کنترل طراحی شده با تولید توابع توصیف‌کننده‌ی حلقه بسته و به‌دست آوردن شبه پاسخ فرکانسی مدار حلقه باز معادل در شرایط کاری مورد نظر با کاربرد نظریه‌ی نایکوئیست تحلیل می‌شود. [۱۶] لازم به ذکر است که روش‌های پایداری مطلق<sup>۱</sup> برای سامانه‌های مدنظر این پژوهش هنوز گسترش نیافته، و باید توجه داشت که آن روش‌ها صرفاً متضمن پایداری برای مدل ریاضی سامانه‌اند. به‌عبارت دیگر، اختلاف بین مدل ریاضی و سیستم حقیقی می‌تواند منشاء ناپایداری باشد. [۱۶] لازم به ذکر است که اثبات پایداری «مطلق» در روش‌های طراحی کنترل‌کننده برای سامانه‌های غیرخطی که در حال حاضر مبتنی بر نظریه‌ی توابع توصیف‌کننده است امکان‌پذیر نیست. ولی بنا به این اصل که «شرط لازم و کافی برای اینکه مدل‌های توابع توصیف‌کننده وجود داشته باشند این است که سیستم پایدار باشد»، پایداری در برنامه‌های کاری متفاوت با تولید توابع توصیف‌کننده‌ی مدار بسته (یا همان «پاسخ فرکانسی») نشان داده شده است.

### ۳. مثال

یک ربات صنعتی کاملاً غیرخطی را در نظر بگیرید. (مدل ریاضی این فرایند قابل دسترسی است.) [۱۷] اصطکاک خشک و حالت اشباع در موتور مدل شده است؛ توجه داشته باشید که اثرات اصطکاک در دامنه‌های تحریک‌کننده با ارزش پایین چشم‌گیرند. ارزش دامنه‌های تحریک‌کننده عبارت‌اند از ۰٫۲۵، ۰٫۳۲، ۰٫۶۵، ۰٫۸۰، ۰٫۵، و ۱۰٫۲۰، و پهنای نمودارهای بهره‌ی توابع توصیف‌کننده حدود ۲۰ دسی‌بل است در حالی که پهنای نمودارهای فاز توابع توصیف‌کننده

بلوک خودتنظیم و بهره‌ی بلوک متناسب) تنظیم شده‌اند. گام بعدی تأیید طراحی، آزمایش مقاوم بودن سیستم کنترل، و سپس تعیین این نکته است که آیا بلوک خودتنظیم به‌طور دلخواه پارامترهای جبران‌کننده‌ی پس‌فاز — پیش‌فاز را نو می‌کند یا خیر؟ بنابراین، سیستم با سیگنال ورودی پله با ارزش‌های مورد نظر تحریک شد. پاسخ‌های زمانی به‌هنگار شده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. واضح است که سیستم مقاوم است و رفتار آن تقریباً به دامنه‌ی سیگنال تحریک‌کننده حساس نیست؛ همچنین مشاهده شد که مشخصات فنی دلخواه ارضا شده‌اند.

شبه پاسخ فرکانسی مدار باز سیستم که با تولید تابع توصیف‌کننده به‌دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است. روشن است که سیستم مدار باز نقطه‌ی ۱- را در بر نمی‌گیرد و سیستم مدار بسته پایدار است.

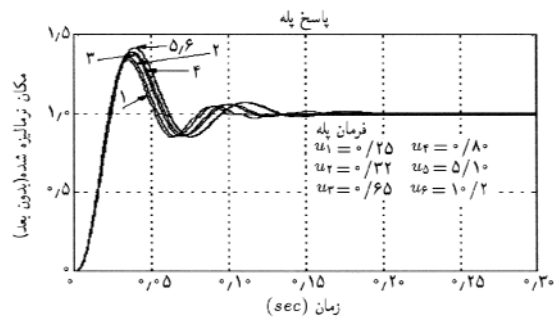
#### ۴. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، معرفی روش جدید طراحی کنترل‌کننده به‌منظور بالابردن کارایی، دقت و پایین آوردن هزینه‌ی سیستم کنترل خودکار است. به‌منظور تأمین این هدف، روش طراحی، در نظر گرفته شده نظام‌مند و شامل ۷ گام است. فعالیت‌های اصلی این روش عبارت‌اند از: طراحی سازه‌ی مدل خطی فرایند برای استفاده توسط بلوک شناسه، تعیین بازه‌ی فرکانس مورد نظر، تعیین تابع تبدیل مرجع (که رفتار دلخواه سامانه را متمایز می‌کند) برای استفاده‌ی بلوک خودتنظیم، و تعیین بهره‌ی بلوک متناسب. در حال حاضر بهره‌ی بلوک متناسب در زمان زنده تعیین نمی‌شود و تعیین خودکار این بهره در فعالیت‌های آتی گنجانده شده است. کاربرد روش طراحی در یک فرایند به‌شدت غیرخطی نشان داد که روش طراحی گسترش یافته، منجر به دست‌یابی به رفتار دلخواه سیستم پس‌خوراند می‌شود.

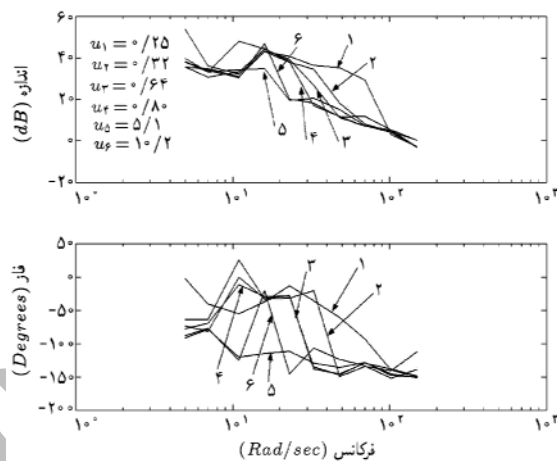
نقطه‌ی قوت روش ارائه شده قابلیت کاربرد آن در سامانه‌های غیرخطی بدون هیچ محدودیتی بر تعداد، نوع و جانمایی معادلات غیرخطی است. نقطه‌ی ضعف این روش نیز در حال حاضر، محدودیت کاربرد آن در سامانه‌های چندمتغیره است.

#### پانویس

1. self-adjusting
2. actuators
3. identifier
4. proportional
5. nyquist criterion
6. regression model
7. exact model matching objective function



شکل ۲. پاسخ پله به‌هنگار با دامنه‌های متفاوت.



شکل ۳. آزمایش پایداری: شبه پاسخ فرکانسی مدار حلقه‌باز.

خطی باید افزایش یابد تا رفتار گذرای دلخواه در حوزه‌ی غیرخطی تأمین شود. ضریب میرایی از ۰/۳ به ۰/۶ و سپس به ۰/۹ افزایش پیدا کرد. با این تغییر، رفتار مناسب به‌دست آمد، اما ملاحظه شد که پاسخ زمانی باید بالا کشیده شود. با افزایش بهره‌ی بلوک متناسب از ۱ به ۵ و سپس به ۱۰ رفتار پاسخ زمانی دلخواه به‌دست آمد. در این مرحله، تمامی پارامترهای ورودی لازم (ارزش اولیه‌ی بردار بلوک شناسه بازه‌ی فرکانس مورد نظر، تابع تبدیل دلخواه برای استفاده

8. closed-form
9. absolute stability

#### منابع

1. Nassirharand, A., and Karimi, H., "Closed-form solution for design of lead-lag compensators", *Int. Journal. of Electrical Engineering Education*, **41** (2), pp. 172-180 (2004).

2. Williamson, D., "Nonlinear compensation of linear processes", *Automatica*, **15**, Issue 5, pp. 601-608 (1979).
3. Kovacic, Z., Bodan, S. and Punccec M., "Adaptive fuzzy logic control based on integral criterion", *Proceedings of the IEEE Int. Symposium on Intelligent Control*, pp. 55-60 (2000).
4. Akgul, M. and Morgul O., "Fuzzy controller design for parametric controllers", *Proceedings of the IEEE Int. Symposium on Intelligent Control*, pp. 67-72 (1997).
5. Taylor, J.H., "A systematic nonlinear controller design approach based on quasilinear models", *Proceedings of American Control Conference*, pp. 141-145 (1983).
6. Nassirharand, A. and Mousavi Firdeh, S.R., "Design of nonlinear lead and/or lag compensators", Submitted.
7. Nanka-Bruce, O. and Atherton, D.P., "Design of nonlinear controllers for nonlinear plants", *Proceedings of IFAC Congress*, **6**, pp. 75-80 (1990).
8. Loh, A.P., Cai, X. and Tan, W.W., "Auto-tuning of phase lead/lag compensators", *Automatica*, **40**, Issue 3, pp. 423-429 (2004).
9. Kovacic, Z., Bogdan, S. and Punccec M., "Adaptive control based on sensitivity model-based adaptation of lead-lag compensator parameters", *Proceedings of the IEEE Int. Conference on Industrial Technology*, **1**, pp. 321-326 (2003).
10. Rowland, J.R., *Linear control systems*, John Wiley, New York (1986).
11. Chen, C. F. and Shieh, L.S., "An algebraic method for control systems design", *International Journal of Control*, **11**(5), pp. 717-739 (1970).
۱۲. نصیرهرند امیر و کریمی، حسن. «طراحی کنترل‌کننده‌ی تک‌دامنه برای سیستم‌های غیرخطی»، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللی و نهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان (۱۳۸۰).
13. Nassirharand, A. and Karimi H., "Input/output characterization of highly nonlinear multivariable systems", *Advances in Engineering Software*, **33**, pp. 825-830, (2002).
14. Mousavi Firdeh, S.R., Nassirharand, A., Abbassi, N. and Karimi H., "A systematic single-range controller synthesis procedure for nonlinear and multivariable liquid propellant engines", *Aerospace Science and Technology*, **10**(5), pp. 392-401 (2006).
15. Astrom, K.J. and Wittenmark, B., *Adaptive Control*, New York, Addison Wesley (1989).
16. Nassirharand, A. and Mousavi Firdeh, S.R., "Computer-aided design of nonlinear  $H_\infty$  controllers using describing functions", *Proceedings of IEEE Symposium on Computer-Aided Control System Design*, Munich, Germany (October 4-6, 2006).
17. Nassirharand, A. and Karimi, H., "Nonlinear controller synthesis based on inverse describing function technique in the MATLAB environment", *Advances in Engineering Software*, **37**(6), pp. 370-374 (2006).