

بهبود عملکرد کنترل مود لغزشی در جاذب ارتعاش فعال با استفاده از رویکرد تطبیقی

پوریا شادکامی اهوازی^{*}، حسین محمدی^۱

^۱ ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: p40032529@hafez.shirazu.ac.ir

چکیده

ارتعاشات ناخواسته در سازه‌ها و سامانه‌های مکانیکی یکی از عوامل اصلی کاهش عمر مفید قطعات، افت عملکرد و ایجاد نویز و ناپایداری به شمار می‌آیند. کنترل فعال ارتعاشات با استفاده از جاذب‌های ارتعاشی فعال، روشی مؤثر برای کاهش این ارتعاشات است. در این روش، نیروی کنترلی متناسب با ارتعاش پایه یا جرم اصلی تولید شده و به‌گونه‌ای اعمال می‌شود که پاسخ ارتعاشی سیستم توسط جسم جاذب تضعیف گردد. از میان روش‌های مختلف کنترل فعال، کنترل مود لغزشی به دلیل پایداری بالا و مقاومت در برابر تغییر پارامترهای سیستم و اغتشاشات خارجی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، عبور مکرر مسیر حالت از سطح لغزش در این روش موجب بروز پدیده‌ای به نام چترینگ می‌شود که باعث نوسانات فرکانس بالا در سیگنال کنترلی، افزایش توان مصرفی، ایجاد نوفه و در نهایت آسیب به عملگرهای الکترومکانیکی می‌گردد. در این پژوهش، با هدف کاهش اثرات نامطلوب چترینگ، یک رویکرد تطبیقی برای تنظیم بهره‌ی کنترل مود لغزشی ارائه شده است. در این روش، مقدار بهره بر اساس فاصله‌ی لحظه‌ای از سطح لغزش به‌صورت پویا تغییر می‌کند؛ به‌گونه‌ای که در نواحی نزدیک به سطح لغزش، بهره کاهش یافته تا چترینگ و توان مصرفی کمینه شود و در صورت افزایش دامنه‌ی تحریک یا اغتشاش، بهره به‌صورت خودکار افزایش می‌یابد تا پایداری سیستم حفظ گردد. برای ارزیابی عملکرد این رویکرد، یک مدل شامل جرم اصلی، فنر، دمپر و جاذب ارتعاش فعال پیاده‌سازی شده است که نیروی کنترل آن توسط یک موتور خطی الکتروپنوماتیکی تأمین می‌شود. معادلات حاکم استخراج و شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی تطبیقی پیشنهادی ضمن حفظ ویژگی‌های کنترل مود لغزشی، ارتعاش جرم اصلی را در بازه‌ی وسیعی از فرکانس‌ها مؤثرتر کاهش داده و توان مصرفی و نوسانات چترینگ را نسبت به حالت کلاسیک به میزان قابل توجهی کم می‌کند.

کلمات کلیدی: کنترل مود لغزشی؛ کنترل ارتعاش فعال؛ چترینگ؛ جاذب ارتعاش تنظیم‌شده.

۱- مقدمه

ارتعاشات ناخواسته در سازه‌ها و سامانه‌های مکانیکی یکی از چالش‌های مهم در مهندسی کنترل و طراحی سیستم‌های دینامیکی محسوب می‌شوند. این ارتعاشات می‌توانند به صورت مستقیم موجب کاهش عمر مفید قطعات، افت دقت عملکرد، ایجاد نویز و بروز ناپایداری در سیستم شوند [۱]. در بسیاری از سامانه‌های صنعتی، از جمله ماشین‌های ابزار، سازه‌های عمرانی، سامانه‌های حمل‌ونقل و تجهیزات دقیق، کنترل ارتعاش نقش حیاتی در تضمین عملکرد پایدار، افزایش عمر تجهیز و کاهش هزینه‌های نگهداری دارد. بنابراین توسعه‌ی روش‌هایی برای کاهش ارتعاشات همواره یکی از محورهای اصلی پژوهش در حوزه‌ی دینامیک و کنترل ارتعاش بوده است [۲]. در میان روش‌های موجود، جاذب‌های ارتعاش غیرفعال از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین ابزارهای کنترل ارتعاش به شمار می‌آیند. این جاذب‌ها معمولاً از یک مجموعه‌ی جرم، فنر و دمپر تشکیل می‌شوند که با تنظیم مناسب سختی و میرایی، انرژی را از سازه‌ی اصلی جذب می‌کنند. با وجود مزایای ساده‌سازی و عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، عملکرد جاذب‌های غیرفعال به شدت به پارامترهای تنظیمی و شرایط کاری وابسته است [۴]. در صورت تغییر فرکانس تحریک یا مشخصات سازه، جاذب از حالت تنظیم‌شده خارج می‌شود و اثربخشی خود را از دست می‌دهد [۳].

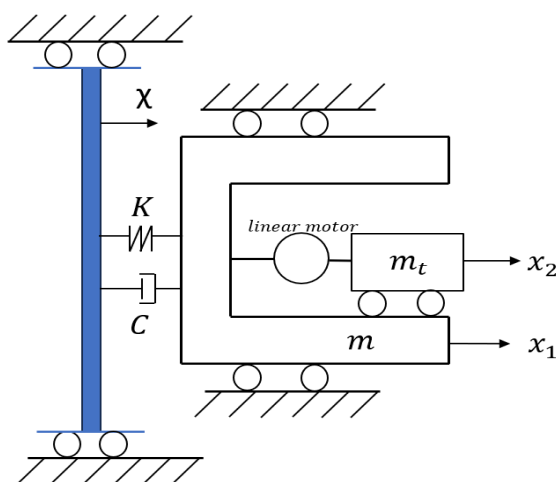
به‌منظور رفع این محدودیت، در دهه‌های اخیر جاذب‌های ارتعاش فعال توسعه یافته‌اند. در این روش‌ها، علاوه بر اجزای مکانیکی متداول، از یک عملکرد (مانند موتور خطی یا هیدرولیکی) استفاده می‌شود تا نیروی کنترلی متناسب با ارتعاش پایه یا جرم اصلی تولید شود و پاسخ ارتعاشی سیستم را به صورت فعال تضعیف کند. مزیت اصلی این نوع سامانه‌ها، قابلیت انطباق با تغییرات محیطی و گستره‌ی فرکانسی وسیع‌تر است، به گونه‌ای که امکان کنترل مؤثر ارتعاش حتی در شرایط غیرخطی یا نامطمئن فراهم می‌شود [۵، ۶]. در میان روش‌های کنترل فعال، کنترل مود لغزشی^۱ به دلیل سادگی طراحی، پاسخ سریع و مقاومت بالا در برابر اغتشاشات و تغییرات پارامتری، یکی از روش‌های مؤثر به شمار می‌آید [۷]. در این روش، سطحی در فضای حالت تعریف می‌شود که مسیر حالت سیستم به سمت آن هدایت و بر روی آن حفظ می‌گردد تا پایداری مطلوب تضمین شود. با این حال، کاربرد عملی این روش با چالشی به نام چترینگ^۲ روبه‌رو است؛ پدیده‌ای که در اثر تغییر سریع تابع علامت در قانون کنترل ایجاد می‌شود و موجب نوسانات فرکانس بالا در نیروی کنترلی، افزایش توان مصرفی، تحریک مدهای ناخواسته و استهلاک عملکردهای الکتروپایه می‌گردد [۸، ۹]. به عنوان نمونه، سالا و همکاران نخستین بار از ساختار کنترل مود لغزشی انتگرالی تطبیقی برای طراحی جاذب ارتعاش فعال استفاده کردند و نشان دادند که با تغییر تطبیقی بهره، دامنه‌ی ارتعاش جرم اصلی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۲]. پژوهش‌های جدیدتر نیز نشان داده‌اند که این رویکرد می‌تواند ضمن حفظ مقاومت در برابر اغتشاشات، توان مصرفی و چترینگ را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. ترکیب کنترل مود لغزشی با جاذب ارتعاش فعال تنظیم‌شده در کنترل ارتعاش سازه‌های بلند، پل‌ها و سیستم‌های صنعتی نیز مورد توجه قرار گرفته است [۹، ۱۰، ۱۱]. این ترکیب، امکان ایجاد پاسخ پایدار و کم‌ارتعاش در بازه‌ی گسترده‌ای از فرکانس‌ها را فراهم کرده و بهبود چشمگیری در میرایی ارتعاشات پایه ایجاد می‌کند. با این وجود، چترینگ همچنان یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از کنترل مود لغزشی در این سامانه‌ها باقی مانده است.

در پژوهش حاضر، با هدف رفع این محدودیت، یک رویکرد تطبیقی برای تنظیم بهره‌ی کنترل مود لغزشی ارائه شده است. در روش پیشنهادی، مقدار بهره بر اساس فاصله‌ی لحظه‌ای مسیر حالت از سطح لغزش به صورت پویا تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای که در نزدیکی سطح لغزش، بهره کاهش یافته تا چترینگ و توان مصرفی کمینه شود و هنگام افزایش دامنه‌ی تحریک یا بروز اغتشاش، بهره به صورت خودکار افزایش می‌یابد تا پایداری سیستم حفظ گردد.

۲- مدل‌سازی دینامیکی

با توجه به شکل (۱)، این پژوهش شامل یک جرم اصلی است که به وسیله فنر و دمپر به پایه متحرک با تحریک $\chi(t)$ متصل شده و تحت ارتعاش پایه قرار می‌گیرد. بر روی این جرم، یک جرم جاذب نصب شده که به کمک موتور خطی الکتروپایه‌ای و میرایی نسبی، نیروی کنترلی لازم را به صورت فعال بین دو جرم اعمال می‌کند.

¹Sliding mode Controller²Chattering



شکل (۱) - دیاگرام سیستم مکانیکی

معادلات حاکم، برهم‌کنش دینامیکی جرم اصلی، جرم جاذب، سختی، میرایی و نیروی کنترلی موتور را تحت تحریک پایه توصیف می‌کنند و مبنای طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی تطبیقی قرار می‌گیرند. در معادله فضای حالت (۱) جابجایی جسم $q_1 = x_1$ و جابجایی جسم جاذب برابر با $q_3 = x_2$ است.

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= q_2 \\ \dot{q}_2 &= \frac{1}{m} \left[K(\chi - q_1) + C(\dot{\chi} - q_2) + \frac{k_1 k_2}{R}(q_4 - q_2) + F_{op}(q_4, q_2) - \frac{k_1}{R}v \right] \\ \dot{q}_3 &= q_4 \\ \dot{q}_4 &= \frac{1}{m_t} [F - F_{op}] \end{aligned} \quad (1)$$

از معادله یک F_{op} برابر است با نیروی حاصل از سرعت نسبی میان جسم و جسم جاذب. F برابر است با نیروی اعمالی از عملگر موتور خطی، ضرایب k_1 و k_2 ثابت موتور خطی و v ولتاژ کنترلی به موتور است. معادله (۲) مدلسازی موتور خطی می‌باشد. L مقدار سلف مدار جریان موتور، R مقاومت سیم‌پیچ و i_s جریان الکتریکی است. از تغییرات جریان الکتریکی ناشی از سلف صرف نظر می‌گردد. مقادیر k_1 و k_2 ثابت‌های به ترتیب ضریب تولید نیرو موتور و ضریب پستی موتور خطی هستند.

$$\begin{aligned} L \frac{di_s}{dt} + Ri_s + e_s &= v \\ F &= k_1 i_s \\ e_s &= k_2 (\dot{q}_3 - \dot{q}_1) \end{aligned} \quad (2)$$

۳- کاربرد کنترل مود لغزشی در کنترل فعال ارتعاشات

بخش کنترل مود لغزشی در این پژوهش بر پایه‌ی طراحی یک قانون کنترلی مقاوم برای جاذب ارتعاش فعال است که هدف آن کاهش جابجایی جرم اصلی تحت تحریک پایه می‌باشد. در این روش ابتدا یک سطح لغزش در فضای حالت به‌صورت ترکیبی از جابجایی و سرعت نسبی بین جرم اصلی و جرم جاذب تعریف می‌شود تا بیانگر وضعیت دینامیکی مطلوب سیستم باشد. سپس قانون کنترلی به گونه‌ای طراحی می‌شود که مسیر حالت سیستم به سمت این سطح هدایت شده و پس از رسیدن، بر روی آن باقی بماند. نیروی کنترل تولیدی توسط موتور خطی الکترو دینامیکی، در واقع همان نیروی لازم برای نگهداشتن حالت سیستم روی سطح لغزش است.

برای رسیدن به این هدف، تابع کنترلی شامل دو بخش است: بخش اول برای رسیدن به سطح لغزش که با استفاده از تابع علامت مسیر حالت را به سمت سطح هدایت می‌کند، و بخش دوم برای لغزش روی سطح که پایداری و میرایی مورد نظر را حفظ می‌نماید. به صورت کلی، سطح لغزش به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$s = q_2 + bq_1 \quad (3)$$

با صفر قرار دادن آن:

$$q_2 + bq_1 = 0 \quad (4)$$

با در نظر گرفتن معادلات فضای حالت (۱) و جایگذاری در سطح لغزش، قانون کنترلی زیر بدست می‌آید:

$$v = \frac{\gamma R}{k_1} \operatorname{sgn}(s) + \frac{mcR}{k_1} q_2 \quad (5)$$

برای بررسی پایداری کنترل کننده فوق، از اعمال تابع لیاپانوف بر سطح لغزش استخراج می‌شود:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (6)$$

$$\dot{V} < \frac{1}{m} |s| (F_{\max} - \gamma) \quad (7)$$

که از معادله فوق، $F_{\max}$ حد بالای نیروی اعمالی و γ یک ضریب تخمینی است.

در نسخه‌ی کلاسیک کنترل مود لغزشی، ثابت بودن بهره v ممکن است موجب چترینگ شود. برای رفع این مشکل، در این پژوهش از رویکرد تطبیقی استفاده شده است که در آن مقدار v بر اساس فاصله‌ی مسیر حالت از سطح لغزش به صورت پویا تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای که در نزدیکی سطح لغزش، مقدار v کاهش یافته تا نوسانات با فرکانس بالا (چترینگ) کاهش یابد، و در صورت افزایش دامنه‌ی تحریک یا اغتشاش، مقدار آن به طور خودکار افزایش می‌یابد تا پایداری سیستم حفظ شود. این تنظیم به کمک γ با ارائه قیود لازم زیر انجام می‌گیرد.

اساس این مدل بر آن است که با تغییر علامت سطح لغزش s بتوان γ مناسب را انتخاب کرد. در این حالت t_p زمان تغییر علامت سطح لغزش، t_x زمان نمونه‌برداری است که مدار آن 0.04 ثانیه می‌باشد. همچنین $\gamma_{\max} = 50$ ، $\gamma_{\min} = 10$ و حالت اولیه $\gamma = 30$ می‌باشد.

$$\gamma_n = \begin{cases} \gamma_{n-1} - \gamma, & \gamma_{n-1} \leq \gamma_{\max} - \gamma, & t_p > t_x \\ \gamma_{n-1} + \gamma, & \gamma_{\min} + \gamma < \gamma_{n-1} & t_p < t_x \end{cases} \quad (8)$$

در غیر این صورت مقدار $\gamma_n = \gamma_{\max}$ است.

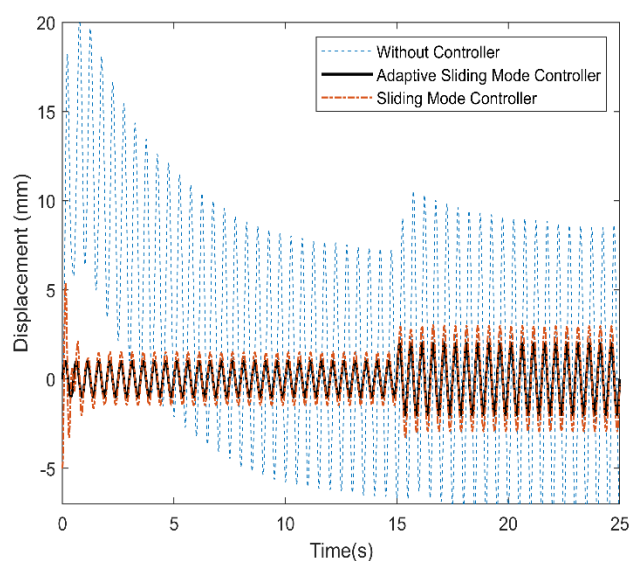
۳- نتایج شبیه‌سازی

در این حالت ورودی به شکل موج سینوسی با دامنه ۱ میلی‌متر برای ۱۵ ثانیه اول و دامنه ۲ میلی‌متر برای ۱۰ ثانیه بعد با فرکانس ۸ هرتز است. کل شبیه‌سازی برای ۲۵ ثانیه می‌باشد. همچنین پارامترهای دینامیکی مسئله در جدول (۱) قرار دارد.

جدول ۱. پارامترهای دینامیکی سیستم ارتعاشی

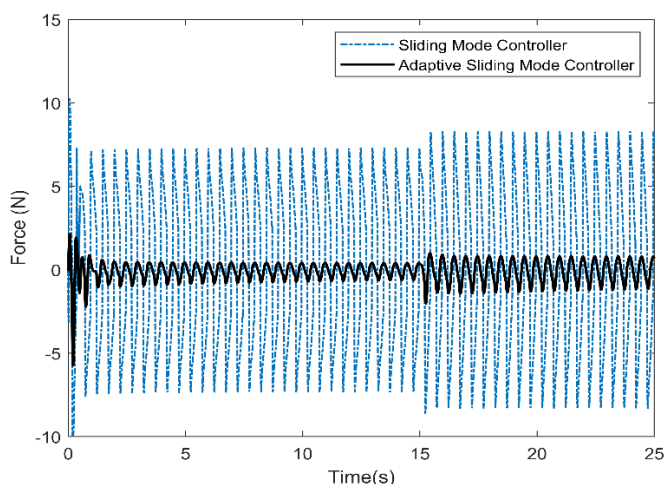
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
m	22 Kg	m _t	6 Kg
K	1.21e4 N/m	C	30 N.s/m
k ₁	55.1	k ₂	31.8
L	84.2 mH	R	11.7

همانطور که در شکل (۲) مشخص است، جاذب ارتعاشی توانسته ارتعاشات جسم را نسبت به حالت بدون کنترل کننده، کاهش دهد. همچنین رویکردی تطبیقی پیشنهادی برای کنترل مود لغزشی، به جهت مقاومت ایجاد کننده در برابر چترینگ، دامنه ارتعاشی کوتاه‌تری نسبت به کنترل کننده مود لغزشی کلاسیک دارد.



شکل ۲- جابجایی جسم تحت دو رویکرد کنترلی و بدون کنترل کننده

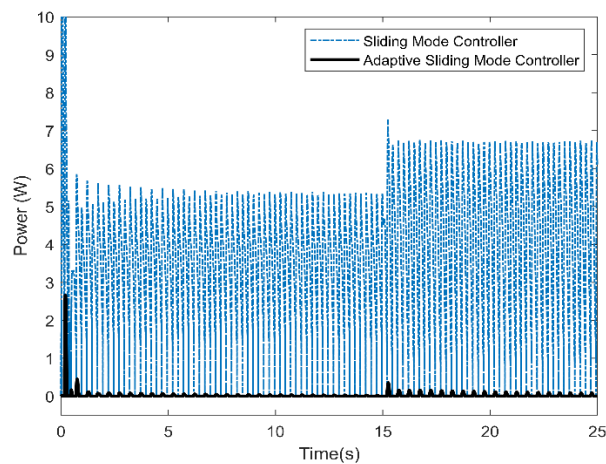
با وجود این بهبود، سیگنال نیروی کنترلی حاصل از قانون کلاسیک حاوی اجزای فرکانس بالاست که ناشی از تابع علامت در قانون کنترل است. این رفتار به صورت نوسانات سریع در نیروی اعمالی موتور و تغییرات تند در سرعت نسبی بین دو جرم مشاهده می‌شود که همان پدیده‌ی چترینگ است. این موضوع به خصوص در فرکانس‌های بالاتر و در نزدیکی شرایط گذرای ورود به سطح لغزش شدیدتر دیده می‌شود و از دید عملی می‌تواند منجر به افزایش توان مصرفی، تنش مکانیکی اضافی و استهلاک عملگر گردد. شکل (۳) نیروی بدست آمده از عملگر اعمالی را نشان می‌دهد که با توجه به توضیحات فوق، رویکرد پیشنهادی باعث شده میزان نیروی بکار رفته کاهش یابد و به تبع آن، توان مصرفی موتور خطی نیز کاهش یابد.



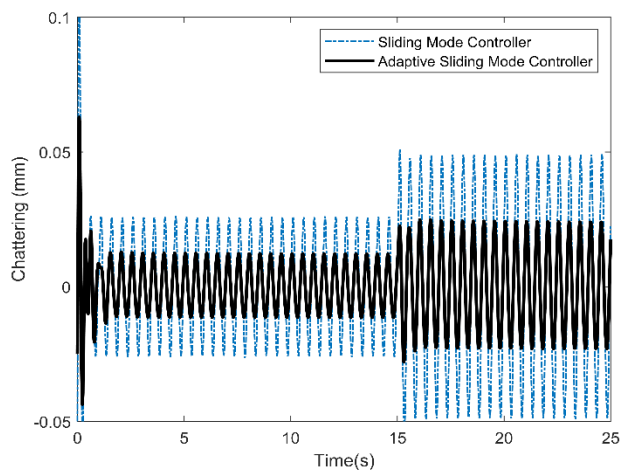
شکل (۳)- نیروی اعمالی کنترل کننده توسط موتور خطی

با توجه به شکل (۵) که سطح لغزش است، می‌توان دید دامنه چترینگ ایجاد شده کمتر از کنترل کننده مود لغزشی معمول است. این امر سبب کاهش نرخ تغییرات سیگنال کنترلی و آسیب حداقلی به تجهیزات می‌گردد. این امر تنها با انتخاب تطبیقی مقدار γ

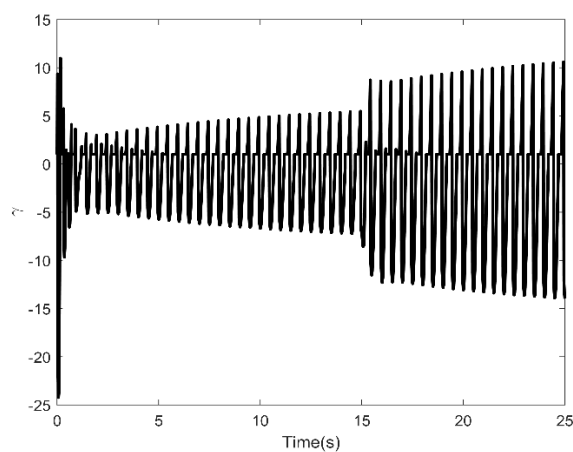
که براساس قیود (۶) می‌باشد، میسر می‌گردد. همچنین این پارامتر تطبیقی توانسته است سیستم را سریع‌تر پایدار کند و در برابر تغییرات ناگهانی ارتعاش پایه، مقاوم سازد.



شکل (۴) - توان مصرفی موتور خطی



شکل (۵) - سطح لغزش کنترل‌کننده



شکل (۷) - انتخاب پارامتر γ به صورت تطبیقی

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، کاهش ارتعاش یک سیستم تحت تحریک پایه با استفاده از جاذب ارتعاش فعال مبتنی بر کنترل مود لغزشی تطبیقی بررسی شد. هدف اصلی، دستیابی به عملکردی مقاوم در برابر تغییرات پارامتری و در عین حال کاهش اثرات نامطلوب چترینگ در قانون کنترل بود. ساختار سیستم شامل جرم اصلی و جرم جاذب متصل از طریق فنر، دمپر و یک عملگر خطی است که نیروی کنترلی را برای تضعیف ارتعاش اعمال می‌کند. در روش کلاسیک کنترل مود لغزشی، با وجود پایداری بالا و کاهش مؤثر ارتعاش، پدیده‌ی چترینگ به دلیل تغییرات سریع تابع علامت در قانون کنترل با دامنه شدید بروز می‌کند. این نوسانات باعث افزایش توان مصرفی، تحریک مودهای ناخواسته و استهلاک مکانیکی عملگر می‌شوند. برای غلبه بر این مسئله، در این پژوهش از رویکرد تطبیقی در تنظیم بهره‌ی کنترل مود لغزشی استفاده شد. در این روش، مقدار بهره متناسب با فاصله‌ی مسیر حالت از سطح لغزش تنظیم می‌شود؛ بدین ترتیب در نزدیکی سطح لغزش، بهره کاهش یافته و چترینگ به حداقل می‌رسد، در حالی که در شرایط تحریک شدید، بهره افزایش می‌یابد تا پایداری سیستم حفظ شود. نتایج تحلیل نشان داد که رویکرد تطبیقی پیشنهادی ضمن حفظ ویژگی‌های مقاومتی کنترل مود لغزشی، منجر به کاهش قابل توجه چترینگ، توان مصرفی و نرخ تغییرات کنترلی می‌شود و پاسخ دینامیکی هموارتر و پایداری بیشتری می‌دهد. بنابراین، استفاده از کنترل مود لغزشی تطبیقی برای جاذب‌های ارتعاش فعال، روشی کارآمد و عملی برای کنترل ارتعاشات در سامانه‌های مکانیکی و سازه‌ای تحت تحریک پایه به‌شمار می‌آید.

مراجع

1. Snamina J, Orkisz P. Active vibration reduction system with mass damper tuned using the sliding mode control algorithm. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2021 Mar;40(1):540-54.
2. Kavyashree BG, Patil S, Rao VS. Review on vibration control in tall buildings: from the perspective of devices and applications. *International Journal of Dynamics and Control*. 2021 Sep;9(3):1316-31.
3. Barredo E, Larios JM, Mayén J, Flores-Hernández AA, Colín J, Montiel MA. Optimal design for high-performance passive dynamic vibration absorbers under random vibration. *Engineering Structures*. 2019 Sep 15;195:469-89.
4. Mayer D, Pfeiffer T, Vrbata J, Melz T. Adaptive-passive vibration control systems for industrial applications. In *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 2015* 2015 Apr 1 (Vol. 9433, pp. 106-120). SPIE.
5. Mousaviyan Safakhaneh M, Fahimi Farzam M, Ahmadi H, Farnam A. Vibration control of structure using active tuned mass damper: A new control algorithm. *Journal of Vibration and Control*. 2025 Jul;31(13-14):2908-19.
6. Hassan A, Torres-Perez A, Kaczmarczyk S, Picton P. Vibration control of a Stirling engine with an electromagnetic active tuned mass damper. *Control Engineering Practice*. 2016 Jun 1;51:108-20.

7. Al-Tamimi A, MohammadRidha T. Adaptive Sliding Mode Control for Structural Vibration Using Magnetorheological Damper. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2025 May 20;6(3):1308-15.
8. Ahvazia PS, Mohammadia H, Mohammadia M. Optimal Memory-Based Feedback Control for Time-Delayed Systems with Application to Suppressing Regenerative Chatter. *ISA transactions*. 2025 Jul 21.
9. Geronel RS, Bueno DD. Adaptive sliding mode control for vibration reduction on UAV carrying a payload. *Journal of Vibration and Control*. 2025 Mar;31(5-6):721-37.
10. Zhang L, Ge Q, Zhang R, He Q, Wang X. Horizontal Vibration Immunity Control of High-Speed Elevator Car Based on Active Disturbance Rejection Control and Fast Terminal Sliding Mode Control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2025 Jul 22.
11. Ghaedi K, Ibrahim Z, Adeli H, Javanmardi A. Invited Review: Recent developments in vibration control of building and bridge structures. *Journal of Vibroengineering*. 2017 Aug 15;19(5):3564-80.
12. Salawudeen, A. T., Mu'azu, M. B., Yusuf, A., & Adedokun, A. E. (2018). "Methods of chattering reduction in sliding mode control: A case study of ball and plate system." *2018 IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, 1-8.