

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

استفاده از عملگر مغناطیسی برای کنترل فعال سیستم جرم- فنر- دمپر شامل
جاذب ارتعاشی

نگارنده: مسعود عبدالحمیدی

اساتید راهنما

حبیب احمدی

سید مجتبی واردی کولایی

استاد مشاور

جواد قالیبافان

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۱۲۸ / ۲۸۷ / ۱۵
تاریخ: ۲ / ۷ / ۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مسعود عبدالحمیدی با شماره دانشجویی ۹۴۱۱۹۸۴ رشته مهندسی مکترونیک گرایش مکترونیک تحت عنوان استفاده از عملگر مغناطیسی برای کنترل فعال سیستم جرم-فنر-دمپر شامل جاذب ارتعاشی که در تاریخ ۹۷/۰۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: عالی.....)			
نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	حبیب احمدی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	سید مجتبی واردی کولایی	استادیار	
۳- استاد مشاور	جواد قالیبافان	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	مسعود مهدی زاده رخی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	امیر جلالی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	مصطفی نظری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم نامه

تقدیم به مادرم

که در تمامی مراحل زندگی، یاریم کرده و راهنمای راه زندگی ام است.

سپاس گزاری

نهایت سپاس را از استاد بزرگوارم جناب دکتر حمیب احمدی رادارم که علم، معرفت و بزرگواری را به

من آموخت.

تعهد نامه

اینجانب مسعود عبدالحمیدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکترونیک دانشکده‌ی مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه استفاده از عملگر مغناطیسی برای کنترل فعال سیستم جرم- فنر- دمپر شامل جاذب ارتعاشی تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

چکیده

در این پژوهش برای یک سیستم یک‌درجه آزادی غیرخطی با تحریک هارمونیک چند فرکانسی نامشخص، از جاذب ارتعاشی فعال استفاده شده‌است. در ابتدا تابعی از نیروی اغتشاشی وارد شده به سیستم شامل خود نیرو و مشتقات اول و دوم آن تخمین زده می‌شود و به وسیله‌ی کنترل‌کننده فیدبک خطی‌ساز و کنترل‌کننده مود لغزشی با اعمال نیرو به جسم جاذب، موقعیت این جسم کنترل می‌شود. برای اعمال نیروی کنترلی از یک عملگر مغناطیسی استفاده شد که این عملگر نیز دارای کنترل‌کننده داخلی است. یک سیستم جرم-فنر-دمپر با فنر غیرخطی به وسیله‌ی چند تحریک هارمونیک ناشناخته در چند فرکانس به ارتعاش درآمده است. برای کنترل موقعیت این سیستم، مقدار تابعی از نیروی اغتشاشی و مشتقات آن در هر زمان مورد نیاز است. مقدار این تابع به وسیله‌ی مشاهده‌گر لیونبرگر تخمین زده و به وسیله‌ی کنترل‌کننده فیدبک خطی‌ساز و مود لغزشی موقعیت جرم سیستم اصلی کنترل می‌شود. ضرایب کنترل‌کننده‌ها به وسیله‌ی الگوریتم ازدحام ذرات بهینه‌سازی شده که زمان نشست و خطا را کمینه نماید. عملگر مغناطیسی به وسیله‌ی قانون فارادی و قانون لورنتس طراحی شده تا بتواند نیروی کنترلی را به سیستم اعمال کند. در انتها نتایج تخمین‌گر با مقدار واقعی مقایسه شده و جاذب ارتعاشی فعال به وسیله‌ی کنترل فیدبک خطی‌ساز و کنترل مقاوم مود لغزشی شبیه‌سازی شده است و تاثیر بهینه‌سازی ضرایب به صورت نمودار به نمایش درآمده است.

واژگان کلیدی: جاذب ارتعاشی فعال، مشاهده‌گر لیونبرگر، کنترلر فیدبک خطی‌ساز، کنترل مود

لغزشی، عملگر مغناطیسی، بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام ذرات،

نوآوری و دستاورد مستخرج از پایان نامه:

- کنترل فعال سیستم جرم-فنر-دمپر شامل جاذب ارتعاشی و تخمین گر نیروی اغتشاشی (بیست و ششمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، اردیبهشت ۹۷، دانشگاه سمنان)

فهرست عنوان‌ها

ش..... فهرست شکل‌ها

ض..... فهرست جدول‌ها

ط..... فهرست نشانه‌ها

۱..... فصل ۱ مقدمه

۱-۱- پیشگفتار..... ۲

۱-۲- مرور ادبیات موضوع..... ۹

۱۳..... فصل ۲ مدلسازی

۱-۲- پیشگفتار..... ۱۴

۲-۲- مدلسازی سیستم مکانیکی..... ۱۴

۳-۲- مدلسازی سیستم الکتریکی..... ۱۷

۱-۳-۲- محاسبه‌ی نیروی ایجاد شده در عملگر..... ۱۹

۲-۳-۲- مدل‌سازی مداری عملگر..... ۲۱

۳-۳-۲- محاسبه‌ی چگالی شدت میدان‌های پیچه‌ها..... ۲۱

۴-۳-۲- جمع‌بندی مدلسازی عملگر مغناطیسی..... ۲۴

۲۷..... فصل ۳ کنترل

۱-۳- پیشگفتار..... ۲۸

۲-۳- تخمین‌گر نیروی اغتشاشی..... ۳۰

۳-۳- جاذب ارتعاشی فعال..... ۳۴

۱-۳-۳- کنترل‌کننده فیدبک خطی ساز..... ۳۶

۲-۳-۳- کنترل به روش مود لغزشی..... ۳۷

۴-۳- کنترل عملگر مغناطیسی..... ۴۱

۵-۳- بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده‌ها..... ۴۲

۴۵..... فصل ۴ شبیه‌سازی

۱-۴- پیشگفتار..... ۴۶

۴۹	۲-۴- نتایج شبیه‌سازی تخمین‌گر.....
۵۱	۳-۴- شبیه‌سازی کنترل.....
۵۲	۱-۳-۴- شبیه‌سازی کنترل بدون عدم قطعیت.....
۵۳	۲-۳-۴- شبیه‌سازی کنترل در حضور عدم قطعیت.....
۵۵	۴-۴- کنترل عملگر مغناطیسی.....
۵۶	۵-۴- بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کنندها.....

فصل ۵ نتیجه‌گیری ۶۱

۶۲	۱-۵- بررسی خروجی‌های کنترلی.....
۶۲	۲-۵- تخمین‌گر نیروی اغتشاشی.....
۶۲	۳-۵- عملگر مغناطیسی.....
۶۳	۴-۵- پیشنهادات.....

پیوست ۱ مقاله..... ۶۵

منبع‌ها..... ۶۷

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: استفاده از جاذب ارتعاشی در کابل‌های فشار قوی..... ۳
- شکل ۱-۲: استفاده از جاذب ارتعاشی به صورت وزنه در برج‌ها..... ۴
- شکل ۱-۳: استفاده از جاذب ارتعاشی با استفاده از سیال در برج‌ها..... ۴
- شکل ۱-۴: استفاده از جاذب ارتعاشی در پل‌ها..... ۵
- شکل ۱-۵: استفاده از جاذب ارتعاشی در قایق‌ها..... ۶
- شکل ۱-۶: استفاده از جاذب ارتعاشی در پمپ‌ها..... ۷
- شکل ۱-۷: استفاده از جاذب ارتعاشی در بالگرد..... ۷
- شکل ۱-۸: استفاده از جاذب ارتعاشی در بردهای الکترونیکی..... ۸
- شکل ۲-۱: سیستم جرم-فنر-دمپر اولیه..... ۱۵
- شکل ۲-۲: سیستم جرم-فنر-دمپر به همراه جاذب ارتعاشی فعال..... ۱۵
- شکل ۲-۳: تصویر کلی از عملگر مغناطیسی..... ۱۸
- شکل ۲-۴: تشریح عملکرد عملگر مغناطیسی..... ۲۰
- شکل ۲-۵: تصویر مداری عملگر مغناطیسی..... ۲۱
- شکل ۲-۶: یک حلقه از سیم‌پیچ..... ۲۲
- شکل ۲-۷: محاسبه میدان یک سیم به طول $2L$ ۲۲
- شکل ۳-۱: استراتژی کنترل سیستم..... ۳۵
- شکل ۳-۲: مقطع هسته و مسیر حرکت شار مغناطیسی..... ۴۲
- شکل ۴-۱: نیروی اغتشاشی وارد شده به سیستم..... ۴۷
- شکل ۴-۲: نوسانات جرم اصلی بدون جاذب..... ۴۸
- شکل ۴-۳: نوسانات جرم اصلی همراه با جاذب..... ۴۸
- شکل ۴-۴: تخمین معادله تابع نیرو..... ۵۰

- شکل ۴-۵: تخمین معادله تابع نیرو در حضور شتاب.....۵۱
- شکل ۴-۶: پاسخ پله به کمک کنترل کننده فیدبک خطی ساز بدون عدم قطعیت.....۵۲
- شکل ۴-۷: پاسخ پله به کمک کنترل کننده مود لغزشی بدون عدم قطعیت.....۵۳
- شکل ۴-۸: پاسخ پله به کمک کنترل کننده فیدبک خطی ساز با عدم قطعیت.....۵۴
- شکل ۴-۹: پاسخ پله به کمک کنترل کننده مود لغزشی با عدم قطعیت.....۵۵
- شکل ۴-۱۰: پاسخ عملگر به ورودی مقدار مطلوب کنترل کننده اصلی.....۵۶
- شکل ۴-۱۱: کاهش زمان نشست در کنترل کننده فیدبک خطی ساز با الگوریتم PSO.....۵۷
- شکل ۴-۱۲: تاثیر تغییر ضرایب کنترل کننده فیدبک خطی ساز به کمک الگوریتم PSO.....۵۷
- شکل ۴-۱۳: کاهش زمان نشست در کنترل کننده مود لغزشی با الگوریتم PSO.....۵۸
- شکل ۴-۱۴: تاثیر تغییر ضرایب کنترل کننده مود لغزشی به کمک الگوریتم PSO.....۵۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۱ مقادیر سیستم اصلی و جاذب..... ۴۶

جدول ۲ مقادیر عملگر مغناطیسی..... ۴۹

جدول ۳ مقادیر قطب‌های تخمین‌گر..... ۵۰

فهرست نشانه‌ها

m_1	جرم جاذب	A	پتانسیل مغناطیسی برداری
N	تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ	a	عرض هسته مغناطیسی
N_e	تعداد الکترون	a_i	ضرایب کنترل‌کننده فیدبک خطی ساز
q	بار الکتریکی	B	چگالی شدت میدان مغناطیسی
R_e	مقاومت الکتریکی	b	طول هسته مغناطیسی
S	سطح مقطع هادی الکتریکی	c_1	نسبت میرایی سیستم اصلی
x_1	موقعیت جرم اصلی	c_2	نسبت میرایی جاذب
x_2	موقعیت جرم جاذب	E	ولتاژ القایی
V_B	ولتاژ	e	بار الکترون
V_e	سرعت بار الکتریکی	F_m	نیروی مغناطیسی
μ_0	ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی خلا	f	نیروی اغتشاشی
μ	ضریب نفوذ پذیری	I	جریان گذرنده از سیم
ξ	معادله دیفرانسیلی از نیروی اغتشاشی	I_f	جریان گذرنده از سیم‌پیچ
η	متغییر فضای حالت تخمین‌گر	k	ضریب جبران نامعینی
$\hat{\eta}$	تخمین متغییر فضای حالت تخمین‌گر	k_1	ضریب سختی خطی فنر اصلی
V	تابع لیاپانوف	k_{1p}	ضریب سختی غیرخطی فنر اصلی
λ	ضریب کنترل‌کننده مود لغزشی	k_2	ضریب سختی فنر جاذب
ρ	کران نامعینی	L	اندوکتانس
		m_1	جرم اصلی

فصل ۱ مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

ارتعاشات از مباحث جذاب و پرکاربرد در دنیای امروز محسوب می‌شود. ارتعاشات به‌طور کلی به لرزش‌ها با فرکانس‌های مختلف در یک سیستم اطلاق می‌شود. در برخی از سیستم‌ها افزایش ارتعاشات مورد نیاز است. برای مثال کاسه‌های ارتعاشی برای تغذیه‌ی سیستم‌های خودکار، در لرزاننده‌ها به عنوان رابط کاربری در گوشی تلفن همراه یا وسایل بازی و یا کاربردهایی نظیر ماشین‌های بوجاری افزایش ارتعاشات نیاز است. در برخی موارد کاهش ارتعاشات جهت کارکرد بهتر سیستم‌ها و جلوگیری از آسیب رسیدن به آن‌هاست. روش‌های مختلفی برای کاهش ارتعاشات، با توجه به کاربردهای آن وجود دارد. تغییر پارامتر از روش‌های ساده جهت کاهش ارتعاشات در سیستم‌هاست. بدین صورت که در صورت مشخص بودن فرکانس تحریک، با دور کردن فرکانس طبیعی از فرکانس تحریک، دامنه‌ی ارتعاشات کاهش می‌یابد. به طور مثال با افزایش سختی اجسام، فرکانس طبیعی افزایش و دامنه‌ی ارتعاشات کاهش می‌یابد. به صورت کاربردی در ماشین لباسشویی با افزودن جرم بتنی به ماشین لباسشویی با کاهش فرکانس طبیعی دامنه‌ی ارتعاشات در سرعت دوران بالای موتور کاهش می‌یابد. روش‌های مرسوم دیگر برای کاهش ارتعاشات ایزوله^۱ کردن ارتعاشات است. در این روش با اضافه کردن المان‌هایی مانند فنر یا دمپر بین نیروی ورودی تحریک کننده و جسم، از وارد شدن ارتعاشات به سیستم اصلی جلوگیری می‌شود. البته در این روش المان مورد استفاده برای عملکرد مطلوب سیستم با توجه به پارامترهای سیستم اصلی و فرکانس تحریک می‌بایست محاسبه گردد. استفاده از این روش برای کاهش ارتعاشات بسیار پرکاربرد است. از کاربردهای بسیار مشهور برای این روش سیستم فنر بندی و تعلیق خودرو است که به کمک فنر و دمپر ارتعاشات وارده از طرف زمین بر خودرو کاهش می‌یابد و یا حتی استفاده از چرخ‌های بادی نیز جهت کاهش ارتعاشات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از روش‌های دیگر که برای کاهش ارتعاشات مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از جاذب ارتعاشی است. جاذب ارتعاشی در واقع سیستم دومی است که به سیستم اصلی اضافه می‌شود و با انتقال ارتعاشات از روی سیستم اصلی به جاذب،

^۱ Vibration isolation

لرزش‌های سیستم اصلی کاهش می‌یابد. کاربردهای جاذب ارتعاشی فراوان است و عمدتاً بر روی سیستم‌هایی نصب می‌شود که ایزوله کردن ارتعاشات و یا تغییر پارامترهای سیستم یا قابل انجام نیست و یا هزینه‌ی زیاد در پی دارد. برای مثال کاهش ارتعاشات سیستم‌هایی که تحریک آن‌ها به وسیله‌ی باد صورت می‌گیرد به وسیله‌ی ایزوله کردن ارتعاشات عملاً غیر ممکن است و یا تغییر در سیستم امکان پذیر نیست. در کابل‌های انتقال قدرت از جاذب ارتعاشی برای کاهش ارتعاشات کابل‌ها استفاده می‌شود که هم از فرسودگی کابل‌ها جلوگیری کند و هم ارتعاشات را به دکل وارد نکند. **شکل ۱-۱** جاذب ارتعاشی مورد استفاده را روی یک کابل فشار قوی نشان می‌دهد.

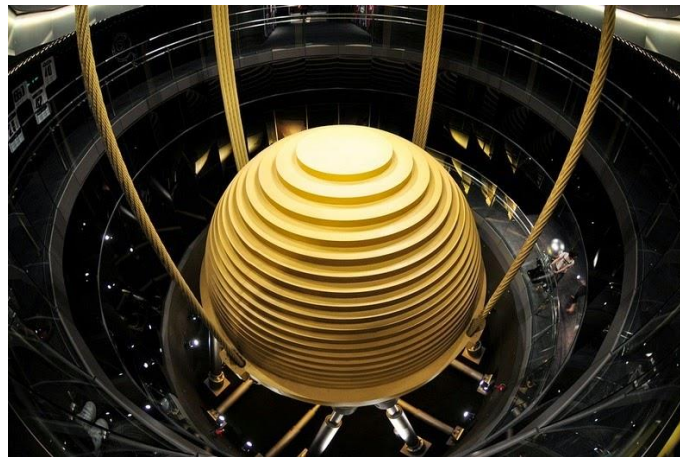


شکل ۱-۱: استفاده از جاذب ارتعاشی در کابل‌های فشار قوی

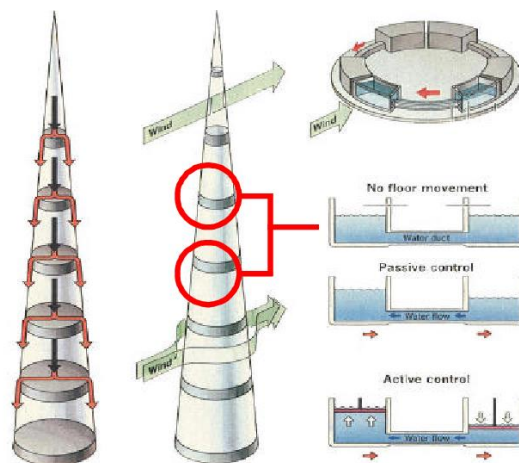
به طور کلی جاذب‌های ارتعاشی را به دو دسته‌ی جاذب‌های ارتعاشی فعال و غیر فعال می‌توان تقسیم کرد. جاذب‌های ارتعاشی غیر فعال جاذب‌هایی هستند که بدون هیچ سیستم کنترلی و گرفتن بازخورد، ارتعاشات کاهش می‌یابد. در جاذب‌های ارتعاشی فعال به کمک یک عملگر و سیستم کنترلی، ارتعاشات وارده بر سیستم در فرکانس‌های مختلف کاهش می‌یابد.

از کاربردهای جاذب‌های ارتعاشی استفاده‌ی آن‌ها در ساختمان‌های بلند است که با اضافه کردن جاذب به این ساختمان‌ها از ارتعاشات و یا حتی ریزش این ساختمان‌ها بر اثر نیروی باد و زلزله جلوگیری

می‌کند. شکل ۱-۲ و شکل ۱-۳ استفاده‌ی این جاذب‌ها را در این ساختمان‌ها نشان می‌دهد. در ساختمان‌ها معمولاً از یک یا چند گوی با وزن زیاد و یا از منابع آب و مسیرهایی برای جابه‌جایی آب به عنوان جاذب ارتعاشی استفاده می‌شود.



شکل ۱-۲: استفاده از جاذب ارتعاشی به صورت وزنه در برج‌ها



شکل ۱-۳: استفاده از جاذب ارتعاشی با استفاده از سیال در برج‌ها

جاذب‌ها در دکل‌ها و دودکش‌های بلند نیز جهت جلوگیری از ارتعاشات و ریزش ساختمان دودکش مورد استفاده قرار می‌گیرد. پل‌ها با توجه به طول بلند و موقعیت‌های مکانی خاص و کاربردهایی که دارند در معرض نیروهای ارتعاشی زیادی هستند [۱]. از عمده‌ی کاربردهای جاذب ارتعاشی در پل‌های بلند و مخصوصاً پل‌های کابلی است که سیستم نرم‌تری دارند. در این ساختارها و پل‌ها از انواع جاذب‌های ارتعاشی با ساختارهای مختلف جهت جلوگیری از ارتعاشات استفاده می‌شود. شکل ۴-۱ استفاده از جاذب ارتعاشی در پل‌ها را نشان می‌دهد. در برخی مکان‌ها و موقعیت‌ها استفاده از جاذب ارتعاشی برای پل‌ها ضروری است [۲].



شکل ۴-۱: استفاده از جاذب ارتعاشی در پل‌ها

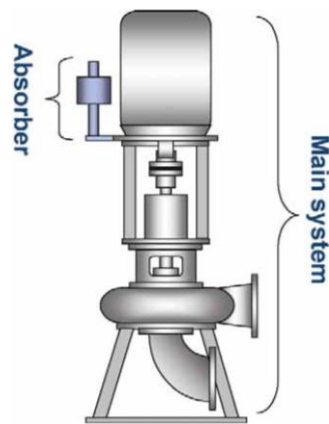
قایق‌هایی که بر روی آب سوارند با توجه به موجی که به آنها وارد می‌شود معمولاً در تلاطم هستند. از دیگر کاربردهای جاذب‌های ارتعاشی استفاده آن‌ها در این قایق‌هاست. **شکل ۱-۵** جاذب ارتعاشی شرکت سی‌کیپر^۱ را بر روی یک قایق نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵: استفاده از جاذب ارتعاشی در قایق‌ها

در برخی از سیستم‌های دوار و یا ضربه‌ای مانند پمپ سیالات، لرزش زیادی توسط پمپ ایجاد می‌شود که برای جلوگیری از این لرزش، جاذب ارتعاشی روشی بسیار مناسب است. در برخی از این پمپ‌ها به دلیل تغییر جهت در حرکت سیال توسط پمپ، ارتعاشات چند درجه آزادی به سیستم وارد می‌شود که در این سیستم‌ها استفاده از جاذب‌های ارتعاشی با درجات آزادی بالاتر مرسوم است. **شکل ۱-۶** کاربرد جاذب ارتعاشی را در یک پمپ نشان می‌دهد.

^۱ Seakeeper



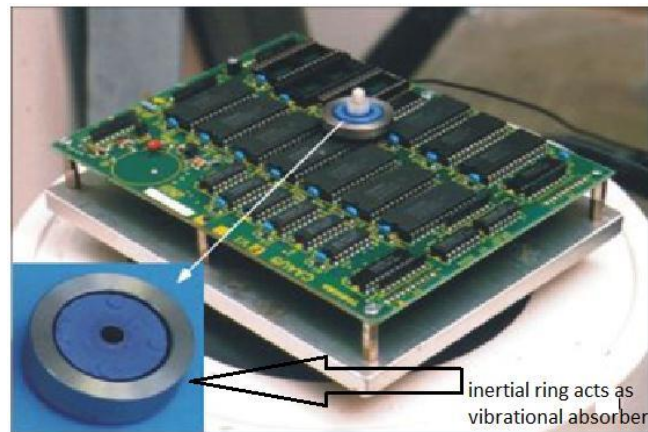
شکل ۱-۶: استفاده از جاذب ارتعاشی در پمپ‌ها

از دیگر کاربردهای جاذب ارتعاشی استفاده از آن‌ها در سیستم‌های دوار مانند بالگردهاست که در شکل ۱-۷ نشان داده شده است.



شکل ۱-۷: استفاده از جاذب ارتعاشی در بالگرد

جاذب‌های ارتعاشی حتی در بردهای الکترونیکی کاربری دارند. در مدارهای الکترونیکی که با فرکانس‌های مختلف کار می‌کنند و یا مدارهایی که سنسورهای شتاب سنج و ژيروسکوپ بر روی آنها قرار دارد از جاذب ارتعاشی برای کاهش ارتعاشات مدار نیز استفاده می‌شود. شکل ۱-۸ نمونه‌ای از کاربرد جاذب ارتعاش بر روی مدار الکترونیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۸: استفاده از جاذب ارتعاشی در بردهای الکترونیکی

جاذب‌های ارتعاشی حتی برای سیستم‌هایی که ارتعاشات بر روی آنها به صورت حرکت دورانی است استفاده می‌شود که از پیچش محور جلوگیری می‌کند.

از مزایای استفاده از جاذب ارتعاشی فعال، کوچکتر شدن عملگر است. در صورتی که از عملگر جهت کنترل استفاده شود، جاذب ارتعاشی باعث کوچکتر شدن عملگر می‌شود. به طور مثال در یک برج برای جلوگیری از ارتعاشات بدون نیاز به عملگری عظیم می‌باشد که تمامی نیروهای ارتعاشات برج را خنثی نماید تا برج حرکت نکند. اما با استفاده از جاذب ارتعاشی و استفاده از عملگر بر روی جاذب، اندازه‌ی عملگر متناسب با جرم ساختمان و جرم جاذب کوچکتر می‌شود.

برای کاربردهای مختلف جاذب ارتعاشی فعال، عملگرهایی مختلف وجود دارد. برای ساختمان و پل‌ها و سازه‌های بسیار بزرگ از عملگرهایی هیدرولیکی^۱ استفاده می‌شود. برای ابعاد کوچکتر از عملگرهای نیوماتیکی^۲ استفاده می‌شود. برای بسیاری از کاربردها در اندازه‌های کوچکتر و معمول، عملگرهای الکتریکی و مغناطیسی پاسخگوی نیاز خواهند بود و در اندازه‌های کوچکتر عملگرهایی از جنس پیزوالکتریک^۳ و یا عملگرهای مغناطیسی استفاده می‌شوند.

عملگرهای الکتریکی در واقع عملگرهای مغناطیسی هستند که از انرژی الکتریکی، میدان‌های مغناطیسی بزرگ تولید کرده و حرکت و نیرو ایجاد می‌کنند. عملگرهای الکتریکی یا همان ماشین‌های الکتریکی از نظر نوع ولتاژ ورودی به سه دسته ماشین‌های جریان مستقیم (DC)، ماشین‌های جریان متناوب (AC) و ماشین‌های یونیورسال تقسیم بندی می‌شوند.

۱-۲- مرور ادبیات موضوع

از سال ۱۹۲۸ تنظیم جاذب ارتعاشی^۴ توسط آرموندروید^۵ و دن هاتوگ^۶ آغاز شد و تا به امروز پیشرفت‌های بسیار زیادی داشته و کاربردهای آن گسترش یافته است [۳]. در طول زمان دانشمندان سعی داشته‌اند تا از روش‌های کارآمدتری برای کنترل ارتعاشات استفاده کنند. به طور مثال در سال ۱۹۸۲ آقای هانت^۷ و همکاران برای یک سیستم یک درجه آزادی جرم-فنر-دمپر از جاذب ارتعاشی با فنر غیر خطی استفاده کردند که ارتعاشات را در گستره فرکانسی بیشتری کاهش دهند [۴]. برای استفاده از جاذب ارتعاشی و نحوه طراحی بهتر جاذب روش‌های کارآمدتر و ساده‌تری در طول زمان ارائه شد که می‌توانست برای کاهش ارتعاشات، جرم و فنر و دمپر را برای یک سیستم ارائه دهد [۵، ۶]. تا دهه‌ی

^۱ Hydraulic

^۲ Pneumatics

^۳ Piezoelectric

^۴ Tuned vibration absorber

^۵ Ormondroyd

^۶ Den Hartog

^۷ Hunt

گذشته بیشترین تلاش‌ها در استفاده از جاذب ارتعاشی غیر فعال در کاربردهای مختلف بود [۱، ۷-۱۰]. همچنین دانشمندان به بررسی نحوه‌ی عملکرد و پاسخگویی جاذب ارتعاشی نیز می‌پرداخته‌اند. بطور مثال آقای چنگ^۱ به بررسی عملکرد جاذب ارتعاشی بر روی پل‌ها در سال ۲۰۰۳ پرداخته‌است [۲]. استفاده از جاذب ارتعاشی در تلفیق با روش‌های دیگر کاهش ارتعاشات، به طور مثال ایزوله کردن، زمینه ساز مباحث دیگری در آن زمینه شد [۸، ۹]. در ادامه با ترکیب جاذب ارتعاشی با سیستم‌های کنترل، جاذب ارتعاشی فعال پدید آمد. جاذب ارتعاشی فعال توانایی بسیار بیشتری نسبت به جاذب ارتعاشی غیرفعال دارد. جاذب ارتعاشی فعال محدوده‌ی فرکانسی بیشتری را برای کنترل دارد [۱۱-۱۴]. روش‌های کنترلی مختلفی برای استفاده در جاذب ارتعاشی فعال استفاده می‌شود. این روش‌ها هر کدام مزایای خاصی در کاهش ارتعاشات دارند. این روش‌های کنترلی تیرها نیز مورد پژوهش قرار گرفته‌اند. آقای بیلی^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۵ با استفاده از پیزوالکتریک به عنوان سنسور و عملگر برای یک تیر یکسرگیردار، ارتعاشات تیر را کنترل کردند [۱۵]. تلفیق جاذب ارتعاشی با کنترل در شرایطی که نیروی اغتشاشی به سیستم وارد شود به تنهایی کافی نیست. تخمین‌گر نیروی اغتشاشی می‌تواند کمک بسیار زیادی در کنترل بهتر سیستم‌ها و در نتیجه کاهش بهتر ارتعاشات انجام دهد. همچنین تخمین‌گرها در زمینه‌ی تخمین حالت‌های سیستم می‌تواند به کنترل سیستم کمک کند. آقای میروویچ^۳ در سال ۱۹۸۵ از تخمین‌گر لیونبرگر^۴ استفاده کرد تا حالت‌های سیستم را تخمین بزند. استفاده از تخمین‌گرها نه تنها حالت‌های سیستم را می‌دهد، بلکه می‌تواند نیروی اغتشاشی را نیز تخمین بزند [۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۷]. کنترل و روش‌های آن از مهمترین بخش‌های یک سیستم به همراه جاذب ارتعاشی فعال است. سیستم‌های ارتعاشی به دلیل فرکانس بالا و حرکات زیاد معمولاً با تغییرات در طول زمان همراه هستند که ضرورت ایجاد می‌کند که از کنترل‌کننده‌های مقاوم در این سیستم‌ها استفاده کرد. کنترل‌کننده‌ی

^۱ Cheng

^۲ Baily

^۳ Meirovitch

^۴ Lunberger Observer

مود لغزشی از ساده‌ترین و پرکاربردترین کنترل مقاوم برای این سیستم‌ها است. این کنترل‌کننده برای کنترل ارتعاشات بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸-۲۳].

عملگر مغناطیسی انواع مختلفی دارد و در زمینه‌های مختلفی نیز کاربرد دارد. آقای هاو^۱ در سال ۲۰۰۰ مقاله‌ای منتشر کرد که در آن به کاربردهای انواع عملگر مغناطیسی در سیستم‌های هوانوردی پرداخته است [۲۴]. این پژوهش نشان می‌دهد که متناسب با عملیات مورد نیاز می‌توان از انواع عملگر مغناطیسی استفاده کرد. عملگرهای مغناطیسی خطی نسبت به عملگرهای مغناطیسی دورانی پیچیدگی‌های بیشتری دارند. عملگرهای مغناطیسی با توجه به پیچیدگی از ساختارهای مختلفی استفاده می‌شود. از انواع ساده‌ی عملگر مغناطیسی شکلی از آن است که از آرایه‌های آهنربایی پشت سرهم تشکیل شده است [۲۵، ۲۶]. این ساختار عملگر بسیار غیرخطی است و پژوهشگران با استفاده از روش‌های مختلفی به بهسازی عملگر و کاهش تاثیرات غیرخطی می‌پردازند. آقای کلارک^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۵ سعی بر خطی کردن این نوع عملگر داشتند. عملگرهای مغناطیسی با حرکت خطی دیگری نیز وجود دارد که معمولاً به صورت خلاقانه و نوآورانه ارائه می‌گردد. به طور مثال آقای کیم^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۵ و آقای لی^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۷ عملگری بسیار مشابه ارائه کردند که در بازه‌ی حرکتی کوتاه بسیار موثر واقع می‌شد [۲۷-۲۹]. این نوع عملگرها با بازه‌های حرکتی کوچک در شیرهای کنترل مورد استفاده قرار گرفت و دانشمندان با کنترل این شیرها سعی بر تنظیم خروجی این شیرها گرفتند [۳۰]. پژوهش‌ها بر روی عملگرهای مغناطیسی با حرکت خطی همچنان ادامه دارد و ایده‌های مختلفی برای این عملگرها ارائه می‌گردد. به طور مثال در سال ۲۰۰۹ آقای ون لیروپ^۵ و همکارانش عملگری مغناطیسی با قابلیت حرکت در یک صفحه را ارائه کرده‌اند [۳۱]. در ابعاد میکرو استفاده از عملگر مغناطیسی بسیار مرسوم است زیرا این عملگرها در ابعاد کوچک از توانایی بسیار بالایی برخوردار هستند و قابلیت کنترل بیشتری

^۱ Howe

^۲ Clark

^۳ Kim

^۴ Li

^۵ Van Lierop

نسبت به عملگرهایی مانند نیوماتیکی دارند. همچنین پژوهشی در سال ۱۹۹۶ انجام شد که نشان می‌داد عملگرهای مغناطیسی در ابعاد کوچک قابلیت استفاده‌ی همزمان به عنوان سنسور موقعیت نیز دارا است [۳۲].

از ترکیب سیستم جرم-فنر-دمپر به همراه جاذب ارتعاشی و استفاده از عملگر مغناطیسی برای کنترل این سیستم‌ها می‌توان روش‌های نوینی برای هدایت سیستم‌های تحت نیروی اغتشاشی بهره گرفت. هدف این پژوهش کنترل فعال یک سیستم ارتعاشی یک درجه آزادی به کمک جاذب ارتعاشی فعال است که عملگر استفاده شده برای اعمال نیروی کنترلی، یک عملگر مغناطیسی می‌باشد.

در این پژوهش سیستم جرم-فنر-دمپر با جاذب ارتعاشی، تحت نیروی اغتشاشی به کمک عملگر مغناطیسی و روش کنترل مقاوم تحت کنترل قرار می‌گیرد. در فصل دوم در ابتدا به مدلسازی این سیستم‌ها پرداخته می‌شود. در فصل سوم تخمین‌گر نیروی اغتشاشی و کنترل‌کننده‌ی فیدبک خطی ساز و مود لغزشی ارائه می‌گردد و در فصل چهارم نتایج شبیه سازی این سیستم نمایش داده می‌شود. در فصل ششم به بررسی این نتایج پرداخته شده است.

فصل ۲ مدل سازی

۲-۱- پیشگفتار

سیستم‌ها جهت تشخیص عملکرد و همچنین کنترل مدلسازی می‌شوند. مدلسازی به این معناست که رفتار یک سیستم، متناسب با ورودی یا بدون ورودی به صورت معادلات ریاضی نوشته شود. سیستم‌ها معمولاً به نحوی مدل می‌شوند که بتوان عملکرد آن‌ها را در طول زمان، به کمک ریاضیات مشاهده کرد. مدلسازی سیستم‌های خطی معمولاً در فضای لاپلاس^۱ انجام می‌گیرد زیرا تحلیل سیستم‌های خطی در فضای لاپلاس بسیار ساده‌تر است؛ اما سیستم‌های غیرخطی را نمی‌توان در فضای لاپلاس مدل کرد. ریاضیاتی سیستم‌های غیرخطی عمدتاً در فضای معادلات دیفرانسیل صورت می‌گیرد و برای ساده‌تر شدن تحلیل در فضای معادلات دیفرانسیل از فرم فضای حالت^۲ استفاده می‌شود. فرم فضای حالت در واقع تبدیل یک معادله دیفرانسیل مرتبه n به n معادله دیفرانسیل مرتبه یک است. مدلسازی سیستم‌ها چون تبدیل آن‌ها به شکل ریاضیات است از نقطه نظر کنترلی تفاوتی بین سیستم‌های مختلف از قبیل مکانیکی و الکتریکی ندارد و تنها شکل و مقادیر آن‌ها با توجه به مسئله متفاوت است. پاسخ معادلات دیفرانسیل نسبت به زمان می‌تواند رفتار این سیستم‌ها را نسبت به زمان نشان دهد و در واقع با مدلسازی دقیق می‌توان تقریب بسیار مناسبی از سیستم‌ها در طول زمان داشت. به همین دلیل مدلسازی سیستم‌ها و همچنین دقت در مدلسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تفاوت مدلسازی در سیستم‌ها مکانیکی و الکتریکی در تبدیل المان‌های موجود به پارامترهای ریاضی است که با شناخت این المان‌ها در این سیستم‌ها می‌توان مدل هر یک از این سیستم‌ها را نشان داد.

۲-۲- مدلسازی سیستم مکانیکی

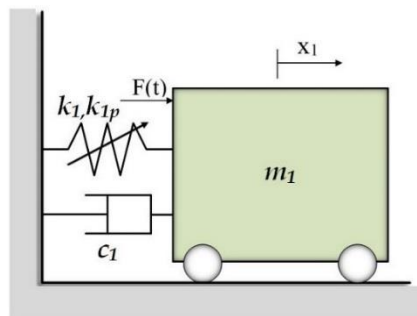
سیستم مکانیکی مورد مطالعه، یک سیستم جرم-فنر-دمپر به همراه جاذب ارتعاشی است. این سیستم شامل جرم و دمپر خطی و فنر غیرخطی است که به وسیله نیروی اغتشاشی هارمونیک و نامشخص $f(t)$ به ارتعاش در می‌آید. شکل ۱-۲ وضعیت کلی سیستم را نشان می‌دهد که با اضافه شدن جاذب

^۱ Laplace^۲ State Space

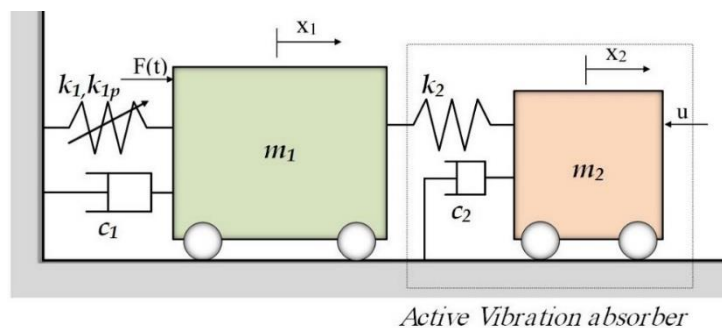
ارتعاشی به سیستم اصلی به وسیله‌ی یک فنر خطی ارتعاشات به جرم جاذب منتقل می‌شود که این انرژی به کمک دمپر متصل به زمین مصرف می‌شود که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. مشخصه‌ی غیرخطی فنر جرم اصلی که در معادله‌ی (۱-۲) نشان داده شده است به صورت چند جمله‌ای درجه ۳ تعریف شده که عامل عملکرد غیرخطی سیستم می‌باشد که x_1 موقعیت جرم اصلی، k_1 ضریب سختی خطی فنر و k_{1p} ضریب سختی غیرخطی فنر است و در وضعیت $x_1 = 0$ فنر در طول آزاد قرار دارد.

$$P(x_1) = k_1 x_1 + k_{1p} x_1^3 \quad (1-2)$$

برای کنترل سیستم، از نیروی کنترلی u استفاده شده است که این نیرو به وسیله‌ی عملگر مغناطیسی به جرم جاذب اعمال می‌شود.



شکل ۲-۱: سیستم جرم-فنر-دمپر اولیه



شکل ۲-۲: سیستم جرم-فنر-دمپر به همراه جاذب ارتعاشی فعال

با نوشتن قانون دوم نیوتن برای جرم اصلی و جرم جاذب می‌توان معادله دیفرانسیل مرتبه ۲ را برای هریک از جرم‌ها به دست آورد. این سیستم مکانیکی در حالت کلی از مرتبه‌ی ۴ است. با توجه به شکل ۲-۲، معادلات سیستم مکانیکی این چنین به دست می‌آیند:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + k_{1p} x_1^3 - k_2 (x_2 - x_1) = f(t) \quad (2-2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = u(t) \quad (3-2)$$

در معادله‌ی (۲-۲)، x_1 موقعیت جرم اصلی و x_2 موقعیت جرم جاذب می‌باشد که در طول آزاد فنرها مقدار آن‌ها برابر با صفر می‌باشد.

با تبدیل دو معادله‌ی مرتبه‌ی ۲ معادله‌های (۲-۲) و (۳-۲) به چهار معادله‌ی مرتبه‌ی ۱ معادلات فضای حالت سیستم را بدست می‌آید. برای به دست آوردن معادلات فضای حالت در ابتدا موقعیت جرم اصلی Z_1 تعریف می‌شود ($Z_1 = x_1$) و همچنین موقعیت جرم جاذب Z_3 تعریف می‌شود ($Z_3 = x_2$). سپس با تعریف Z_2 به عنوان سرعت جرم m_1 و Z_4 به عنوان سرعت جرم جاذب معادلات فضای حالت سیستم را بدست می‌آید. که در رابطه (۴-۲) نشان داده شده است.

$$Z_1 = x_1$$

$$\dot{Z}_1 = \dot{x}_1 = Z_2$$

$$\dot{Z}_2 = \ddot{x}_1 = -\frac{k_1 + k_2}{m_1} x_1 - \frac{k_{1p}}{m_1} x_1^3 - \frac{c_1}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2 + \frac{1}{m_1} f(t)$$

$$Z_3 = x_2$$

$$\dot{Z}_3 = \dot{x}_2 = Z_4$$

$$\dot{Z}_4 = \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_2 - \frac{k_2}{m_2} x_2 + \frac{1}{m_2} u \quad (4-2)$$

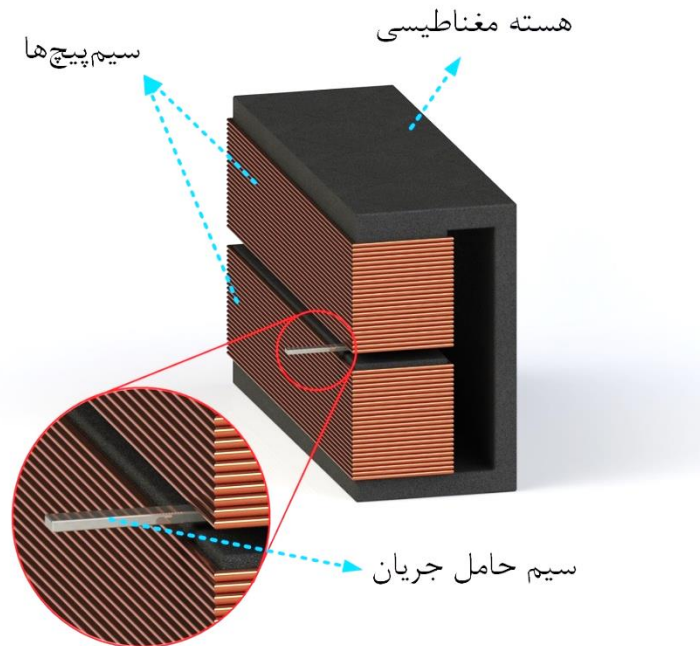
حال با جاگذاری $x_1 = z_1$ و $x_2 = z_3$ و $\dot{x}_1 = z_2$ و $\dot{x}_2 = z_4$ در معادلات (۲-۴) معادلات فضای حالت را به صورت تفکیک شده بدست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = -\frac{k_1 + k_2}{m_1} z_1 - \frac{k_{1p}}{m_1} z_1^3 - \frac{c_1}{m_1} z_2 + \frac{k_2}{m_1} z_3 + \frac{1}{m_1} f(t) \\ \dot{z}_3 = z_4 \\ \dot{z}_4 = \frac{k_2}{m_2} z_1 - \frac{c_2}{m_2} z_4 - \frac{k_2}{m_2} z_3 + \frac{1}{m_2} u \end{cases} \quad (۲-۵)$$

معادله (۲-۲) و (۲-۳) مدل سیستم جرم-فنر-دمپر را نشان می‌دهد و معادله (۲-۵) مدل فضای حالت سیستم مکانیکی است که با تحلیل آن می‌توان عملکرد سیستم را مورد بررسی قرار داد.

۲-۳- مدل‌سازی سیستم الکتریکی

سیستم الکتریکی در واقع مدار تشکیل دهنده‌ی عملگر مغناطیسی می‌باشد. این عملگر از دو پیچ‌های مغناطیسی و یک سیم حامل جریان تشکیل شده که پیچ‌ها با ایجاد میدان مغناطیسی و قرارگیری سیستم در این میدان نیروی مورد نیاز عملگر جهت کنترل سیستم جرم-فنر-دمپر را ایجاد می‌کند. شکل ۲-۳ تصویری از این عملگر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: تصویر کلی از عملگر مغناطیسی

باتوجه به شکل ۲-۳ دو پیچه با فاصله‌ی اندک از یکدیگر قرار دارند و هسته‌ی مغناطیسی درون هر یک از سیم پیچ‌ها، چگالی شدت میدان مغناطیسی را افزایش می‌دهد و همچنین جهت‌دهی مناسب برای جهت‌گیری میدان‌های مغناطیسی را ایجاد می‌کنند و از اتلاف میدان جلوگیری می‌کنند. سیم حامل جریان که از میدان تقریباً یکنواخت ایجاد شد توسط این پیچه‌ها عبور می‌کند با گذار از این میدان طبق قانون لورنتز^۱، نیرویی ایجاد می‌کند که این نیرو به جاذب اعمال می‌شود. مدل‌سازی عملگر مغناطیسی به طور کلی شامل دو قسمت می‌شود.

قسمت اول محاسبه‌ی نیروی ایجاد شده در سیستم حامل جریان است که این نیرو به طور مستقیم به مقدار جریان عبوری و میزان میدان ایجاد شده وابسته است.

^۱ Lorentz

قسمت دوم مدل‌سازی مداری این عملگر است که شامل مدار الکتریکی با ورودی ولتاژ و خروجی جریان است که این جریان نیروی مورد نظر را با توجه به قسمت اول ایجاد می‌کند.

۲-۳-۱- محاسبه‌ی نیروی ایجاد شده در عملگر

برای محاسبه‌ی نیروی ایجاد شده در عملگر مغناطیسی در ابتدا می‌بایست نیروی مغناطیسی بدست آید. نحوه‌ی محاسبه‌ی این نیرو در معادله‌ی (۲-۶) نشان داده شده است [۳۳].

$$F_m = qV_e \times B \quad (۲-۶)$$

که در آن q میزان بار و V_e سرعت بار و B چگالی شدت میدان مغناطیسی است. در کل معادله‌ی (۲-۶) بدین معناست که اگر باری با سرعت V_e عمود بر میدان مغناطیس حرکت کند نیروی F_m به آن وارد می‌شود.

اگر dl جزء کوچک یک هادی با سطح مقطع S باشد و N_e تعداد الکترون‌ها در واحد حجم و e بار الکترون باشد و الکترون‌ها با سرعت V_e در جهت dl در حال حرکت باشند آنگاه نیروی وارده بر dl برابر است با:

$$dF_m = -N_e e S |dl| V_e \times B$$

$$\rightarrow dF_m = -N_e e S |V_e| dl \times B \quad (۲-۷)$$

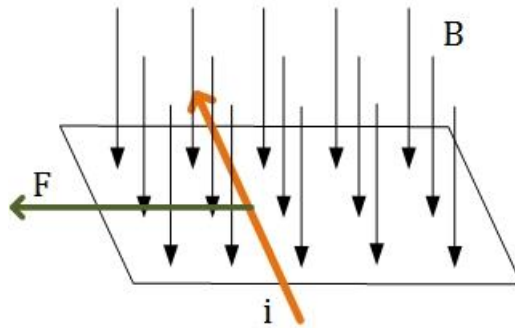
که در معادله‌ی (۲-۷)، مقدار $N_e e S |V_e|$ برابر با میزان جریان گذرنده از سیم است؛ پس مقدار نیرو برابر می‌شود با:

$$dF_m = Idl \times B \quad (۲-۸)$$

که به رابطه (۲-۸) قانون لورنتز می‌گویند.

این قانون نشان می‌دهد که اگر یک سیم حامل جریان عمود بر میدان مغناطیسی قرار گیرد به آن نیروی F_m وارد می‌شود. شکل ۲-۴ نحوه‌ی اعمال نیرو را در این عملگر نشان می‌دهد. این قانون حالت استاتیک دارد و در صورت حرکت سیم در این میدان ولتاژی بر سر سیم‌ها القا می‌شود که این ولتاژ باعث کاهش جریان عبوری در سیم می‌شود و نیروی ایجاد شده و حرکت باعث جذب انرژی از سیستم می‌شود که این جذب انرژی را به شکل ولتاژ القا شده در سیم می‌توان مشاهده کرد. این ولتاژ القا شده را از قانون فارادی می‌توان بدست آورد. قانون فارادی بیان می‌دارد که اگر یک سیم با سرعت V_e در یک میدان مغناطیسی حرکت کند ولتاژ E در آن القا می‌شود. معادله‌ی (۲-۹) مقدار ولتاژ القا شده در سیم به طول L را محاسبه می‌کند [۳۳].

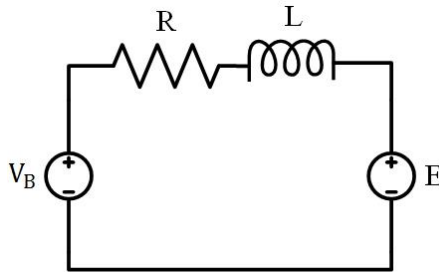
$$E = (V_e \times B)L \quad (۲-۹)$$



شکل ۲-۴: تشریح عملکرد عملگر مغناطیسی

۲-۳-۲- مدل‌سازی مدار عملگر

مدار معادل سیستم در شکل ۲-۵ نشان داده شده است V_B ولتاژ ورودی سیم است و R_e مقدار مقاومت کلی مدار و سیم عامل جریان است و E ولتاژ القا شده در سیم است و L اندوکتانس خودی سیم حامل جریان است.



شکل ۲-۵: تصویر مدار عملگر مغناطیسی

با استفاده از قانون کیرشهف در مدار شکل ۲-۵ می‌توان رابطه‌ی بین جریان و ولتاژ ورودی سیستم به دست آورد.

$$V_B - R_e i - E - L \frac{di}{dt} = 0 \quad (10-2)$$

معادله‌ی (۱۰-۲) معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی اول سیستم است که V_B به عنوان ورودی سیستم الکتریکی در نظر گرفته می‌شود و متغیر زمانی این معادله جریان است که فرم فضای حالت سیستم الکتریکی در معادله‌ی (۱۱-۲) مشاهده می‌شود.

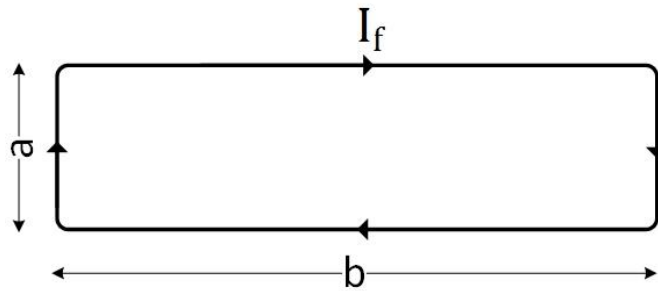
$$\frac{di}{dt} = \frac{-R_e i}{L} - \frac{E}{L} + \frac{1}{L} V_B(t) \quad (11-2)$$

۲-۳-۳- محاسبه‌ی چگالی شدت میدان‌های پیچ‌ها

در روابط (۲-۸) و (۲-۹) مقدار B نشان دهنده‌ی چگالی شدت میدان مغناطیسی تشکیل شده در پیچ‌هاست. برای به دست آوردن میدان این پیچ‌ها در ابتدا یک حلقه‌ی مستطیل شکل را به دست آید.

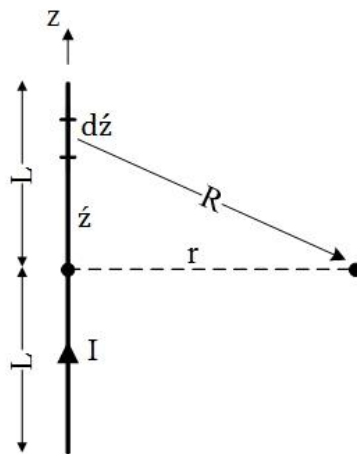
برای به دست آوردن میدان در یک حلقه‌ی مستطیل شکل در ابتدا می‌بایست میدان ایجاد شده برای یک سیم جریان به دست آورد.

شکل ۶-۲ یک حلقه از پیچ‌های مستطیل شکل را نشان می‌دهد و برای محاسبه میدان در مرکز مستطیل میدان را در طول و عرض مستطیل به دست می‌آید.



شکل ۶-۲: یک حلقه از سیم پیچ

برای محاسبه‌ی میدان در فاصله‌ی r از سیم به طول $2L$ در ابتدا پتانسیل مغناطیس برداری را مطابق شکل ۷-۲ به دست می‌آید. در محاسبه میدان از مختصات استوانه‌ای با بردارهای یکه $(\hat{a}_r, \hat{a}_\phi, \hat{a}_z)$ استفاده شده است.



شکل ۷-۲: محاسبه میدان یک سیم به طول $2L$ [۳۳].

$$R = \sqrt{Z^2 + r^2}$$

$$A = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{L}}{R}$$

$$A = \hat{a}_z \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\ln(Z + \sqrt{Z^2 + r^2}) \right] \Big|_{-L}^L$$

$$A = \hat{a}_z \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \frac{\sqrt{L^2 + r^2} + L}{\sqrt{L^2 + r^2} - L} \quad (12-2)$$

چگالی شدت میدان مغناطیسی از روی پتانسیل برداری مغناطیسی از رابطه‌ی (۱۳-۲) به دست می‌آید [۳۳]. در این معادلات μ_0 ضریب گذردهی مغناطیسی خلا و μ ضریب گذردهی می‌باشد.

$$B = \nabla \times A \quad (13-2)$$

$$B = \nabla \times (\hat{a}_z A) = \hat{a}_r \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \varphi} - \hat{a}_\varphi \frac{\partial A}{\partial r} \quad (14-2)$$

چون میدان در فاصله‌ی ثابت از سیم حول سیم تغییر نمی‌کند مقدار $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$ برابر با صفر است. در نتیجه:

$$B = -\hat{a}_\varphi \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \frac{\sqrt{L^2 + r^2} + L}{\sqrt{L^2 + r^2} - L} \right]$$

$$B = \hat{a}_\varphi \frac{\mu_0 I L}{2\pi r \sqrt{L^2 + r^2}} \quad (15-2)$$

معادله (۱۵-۲) میدان حول یک سیم به طول $2L$ در فاصله‌ی r از آن را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۶-۲ میدان ناشی از هر طول مستطیل در مرکز مستطیل با رابطه (۱۶-۲) برابر می‌شود.

$$B = \frac{\mu I_f \frac{b}{2}}{2\pi \frac{a}{2} \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}$$

$$B = \frac{\mu I_f b}{a\pi\sqrt{b^2 + a^2}} \quad (۱۶-۲)$$

و همچنین میدان ناشی از هر عرض مستطیل در مرکز مستطیل برابر است با:

$$B = \frac{\mu I_f a}{b\pi\sqrt{b^2 + a^2}} \quad (۱۷-۲)$$

پس چگالی شدت میدان ناشی از یک حلقه برابر است با دو برابر مجموع معادلات

(۱۶-۲) و (۱۷-۲) که برای N حلقه برای هر پیچه و برای هر پیچه کل چگالی شدت میدان مغناطیسی برابر می شود با:

$$B = \frac{4N\mu I_f}{\pi} \left(\frac{a}{b\sqrt{b^2 + a^2}} + \frac{b}{a\sqrt{b^2 + a^2}} \right)$$

$$B = \frac{4N\mu I_f \sqrt{a^2 + b^2}}{\pi(ab)} \quad (۱۸-۲)$$

۲-۳-۴- جمع بندی مدلسازی عملگر مغناطیسی

با توجه به میدان به دست آمده از معادله‌ی (۱۸-۲) می توان نیرو را با توجه به میزان میدان و میزان جریان به دست آورد.

اندوکتانس خودی سیم حامل جریان به دلیل کوتاه بودن سیم و تک حلقه بودن آن را می توان صفر در نظر گرفت. اندوکتانس متقابل بین پیچه ها و سیم حامل جریان نیز مقدار بسیار کوچکی دارد. زیرا جریان در پیچه ها ثابت است و همچنین میدان ایجاد شده توسط سیم حامل جریان بسیار کوچک است. وجود هسته‌ی مغناطیسی در پیچه ها نیز باعث می شود اندوکتانس متقابل بین پیچه ها و سیم حامل جریان تقریباً صفر باشد. پس معادله‌ی (۱۰-۲) به شکل معادله‌ی (۱۹-۲) ظاهر می شود.

$$V_B - R_e i - E = 0$$

$$i = \frac{V_B - E}{R_e} \quad (۱۹-۲)$$

با توجه به معادله (۱۹-۲):

$$F_m = ia \times B \quad (۲۰-۲)$$

با استفاده از معادلات (۹-۲) و (۱۹-۲) و (۲۰-۲) میزان نیرو این چنین به دست می آید.

$$F_m = \left(\frac{V_B - E}{R_e} \right) a \cdot B$$

$$F_m = \left(\frac{V_B - V_e B a}{R_e} \right) a \cdot B$$

$$F_m = \frac{a}{R_e} B (V_B - a B V_e) \quad (۲۱-۲)$$

با توجه به معادله (۱۸-۲):

$$F_m = \frac{4\mu N I_f \sqrt{a^2 + b^2}}{R_e b \pi} \left(V_B - \frac{4\mu N I_f V_e \sqrt{a^2 + b^2}}{b \pi} \right) \quad (۲۲-۲)$$

معادله (۲۲-۲) مقدار نیروی ایجاد شده توسط عملگر مغناطیسی را نشان می دهد که به وسیله

ولتاژ V_B می توان این نیرو را ایجاد کرد.

فصل ۳ کنترل

۳-۱- پیشگفتار

سیستم‌های مکانیکی و الکترونیکی با توجه به ساختارهایی که دارند، رفتار و عملکرد متفاوتی دارند که این عملکرد را می‌توان در مدل ریاضی مشاهده کرد. منظور از عملکرد سیستم پاسخ آن‌ها به ورودی‌های مختلف و تغییرات خروجی آن‌ها با توجه به تغییرات ورودی آن‌هاست.

کنترل یک سیستم در واقع طراحی یک ورودی مناسب برای یک سیستم است تا آن سیستم به جواب مطلوب برسد. در برخی سیستم‌ها حتی در صورت طراحی مناسب کنترل‌کننده، نه تنها خروجی به پاسخ مطلوب نمی‌رسد، بلکه از پاسخ مطلوب نیز دور می‌شود که به این سیستم‌ها اصطلاحاً ناپایدار می‌گویند؛ این ناپایداری ناشی از ذات سیستم است که کنترل این سیستم‌ها را با وجود ناپایداری بسیار دشوار و غیر ممکن می‌سازد. در برخی از موارد سیستم در ذات خود ناپایدار نیست اما کنترل نامناسب می‌تواند پاسخ سیستم را از مقدار مطلوب دور کند که این سیستم‌ها به واسطه‌ی کنترل نامناسب ناپایدار می‌شوند.

برای کنترل سیستم‌ها روش‌های مختلفی ارائه شده است که این روش‌ها می‌تواند سیستم را با شرایط مختلف به پاسخ مطلوب برساند. در سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان، کنترل‌کننده‌ی PID از مرسوم‌ترین کنترل‌کننده‌هاست. البته کنترل‌کننده پیش فاز و کنترل‌کننده پس فاز در کنترل سیستم‌های خطی کاربرد دارند. اما در سیستم‌های غیرخطی نامتغیر با زمان، روش‌های فراوان و پیچیده‌تری وجود دارد. در سیستم‌های خطی کنترل‌کننده‌ی PID و پیش فاز و پس فاز با توجه به ذات خطی بودن، سیستم را تنها به سمت پاسخ هدایت می‌کنند و چون سیستم‌ها خطی هستند، نحوه‌ی رسیدن به پاسخ برای تمامی مقادیر مطلوب یکسان است و با طراحی کنترل‌کننده‌ی مناسب می‌توان هدایت سیستم را به خوبی در دست گرفت. اما در سیستم‌های غیرخطی باید شناخت کافی از ذات سیستم داشت تا بتوان کنترل‌کننده مناسب را برای یک سیستم طراحی کرد. البته روش‌های کنترل

غیرخطی برای سیستم‌های خطی نیز پاسخگوست اما روش‌های کنترل خطی پاسخ مشابهی را برای تمام ورودی‌های یک سیستم غیرخطی نمی‌دهد.

روش‌های کنترل سیستم‌های غیرخطی با توجه به شناخت نسبت به سیستم ارائه می‌شوند. در سیستم‌هایی که شناخت کامل از سیستم وجود دارد، روش کنترل فیدبک خطی ساز ساده‌ترین روش کنترلی است که با جبران تمامی مقادیر و تغییرات سیستم، خروجی را به پاسخ مطلوب می‌رساند. شناخت کامل از سیستم‌ها معمولاً امکان پذیر نیست و اگر شناخت سیستم به طور کامل انجام نگردد روش فیدبک خطی ساز پاسخگو نیست و معمولاً با خطا همراه است. به این عدم شناخت در سیستم‌ها عدم قطعیت گفته می‌شود که این عدم قطعیت به دو گونه‌ی عدم قطعیت سیستمی و عدم قطعیت پارامتری تقسیم می‌شود که برای مقابله با این دو گونه عدم قطعیت، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌های مرسوم کنترل برای یک سیستم با عدم قطعیت پارامتری، روش کنترل مود لغزشی^۱ است که این روش در صورت پایدار بودن ذاتی سیستم، پایداری کل سیستم را تضمین می‌کند چون کنترل کننده‌ی مود لغزشی براساس محاسبات پایداری لیاپانوف^۲ به دست می‌آید.

کنترل کننده‌ی مود لغزشی با چالش‌هایی همراه است که این چالش‌ها راه حل‌هایی دارند که متناسب با سیستم و شکل مسئله حل می‌شود.

برای کنترل سیستم جرم-فنر-دمپر به همراه جاذب ارتعاشی از دو روش فیدبک خطی ساز و کنترل مود لغزشی استفاده شده است که برای استفاده از این دو روش نیازمند به شناخت نیروی اغتشاشی وارد شده بر سیستم است. نیروی اغتشاشی وارد شده به سیستم نیرویی نامعلوم است و تنها آگاهی نسبت به آن، هارمونیک بودن نیروی اغتشاشی است. برای تخمین نیروی اغتشاشی از تخمین گر لیونبرگر استفاده شده است که در واقع مدلی جدید از سیستم شناخته شده است و با مقایسه سیستم واقعی و سیستم مدل شده نیروی اغتشاشی وارد شده بر سیستم را محاسبه می‌کند. سرعت و صحت عملکرد

^۱ Sliding Mode Control

^۲ Lyapunov

تخمین‌گرها بسیار مهم است؛ به همین دلیل از تخمین‌گر لیونبرگر برای تخمین نیروی اغتشاشی استفاده شده است.

۳-۲- تخمین‌گر نیروی اغتشاشی

برای کنترل سیستم جرم-فنر-دمپر به همراه جاذب ارتعاشی در ابتدا نیاز به تخمین مناسبی از نیروی اغتشاشی است. نیروی اغتشاشی مجهول از مجموع چند نیروی هارمونیک با دامنه و فرکانس متفاوت است. این نیروی اغتشاشی با توجه به شکل ۲-۲ و معادله (۲-۲) به جرم اصلی اعمال می‌شود که تخمین آن با توجه به معادلات (۲-۲) و (۳-۲) به دست می‌آید. با توجه به اینکه نیروی کنترلی به جرم جاذب اعمال می‌شود و موقعیت جرم اصلی هدف کنترل است نیاز به مشتق گرفتن از معادلات فضای حالت سیستم است تا بتوان ورودی را در معادله‌ی خروجی که موقعیت جرم اصلی است مشاهده کرد. با اعمال این مشتقات، توابعی از مجموع نیروی اغتشاشی و مشتق اول و دوم نیروی اغتشاشی ظاهر می‌گردد که تخمین این معادله برای کنترل سیستم کافیت.

با توجه به معادلات فضای حالت در رابطه‌ی (۴-۲) با در نظر گرفتن $y = z_1$ و ورودی u می‌بایست تمام متغیرهای حالت ورودی را برحسب خروجی y نوشت تا u در خروجی ظاهر گردد. برای این کار باید حداقل ۴ بار از y مشتق گرفت.

$$y = z_1$$

$$\dot{y} = z_2$$

$$\ddot{y} = -\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1}\right)y - \frac{k_{1p}}{m_1}y^2 - \frac{c_1}{m_1}\dot{y} + \frac{k_2}{m_1}z_3 + \frac{1}{m_1}f(t)$$

$$y^{(3)} = -\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1}\right)\dot{y} - 3\frac{k_{1p}}{m_1}y^3\dot{y} - \frac{c_1}{m_1}\ddot{y} + \frac{k_2}{m_1}z_4 + \frac{1}{m_1}\dot{f}(t)$$

$$y^{(4)} = \frac{k_2^2}{m_1 m_2} y - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} \right) \ddot{y} - 3 \frac{k_{1p}}{m_1} y^2 \dot{y} - 6 \frac{k_{1p}}{m_1} y \dot{y}^2 - \frac{c_1}{m_1} y^{(3)} \quad (1-3)$$

$$- \frac{k_2^2}{m_1 m_2} z_3 - \frac{k_2 c_2}{m_1 m_2} z_4 + \frac{k_2}{m_1 m_2} u + \frac{1}{m_1} \ddot{f}(t)$$

با توجه به معادلات (۱-۳)، حال می‌توان متغیرهای حالت را برحسب خروجی y به دست آورد که در معادله‌ی (۲-۳) نشان داده شده است.

$$z_1 = y$$

$$z_2 = \dot{y}$$

$$z_3 = \frac{m_1}{k_2} \ddot{y} + \frac{c_1}{k_2} \dot{y} + \frac{k_1 + k_2}{k_2} y + \frac{k_{1p}}{k_2} y^3 - \frac{1}{k_2} f(t)$$

$$z_4 = \frac{m_1}{k_2} y^{(3)} + \frac{c_1}{k_2} \ddot{y} + \frac{k_1 + k_2}{k_2} \dot{y} + 3 \frac{k_{1p}}{k_2} y^2 \dot{y} - \frac{1}{k_2} \dot{f}(t) \quad (2-3)$$

حال با توجه به معادلات (۲-۳) و قراردادن آن‌ها در معادله‌ی مرتبه‌ی چهار معادله‌ی (۱-۳) می‌توان $y^{(4)}$ که معادله‌ی مرتبه چهار سیستم است را به دست آورد.

$$y^{(4)} = - \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \right) y^{(3)} - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} + \frac{c_1 c_2}{m_1 m_2} \right) \ddot{y}$$

$$- \left[\frac{c_2 k_2}{m_1 m_2} + \frac{c_2 (k_1 + k_2)}{m_1 m_2} \right] \dot{y} - \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} y - \frac{k_2 k_{1p}}{m_1 m_2} y^3$$

$$- 3 \frac{k_{1p}}{m_1} y^2 \dot{y} - 6 \frac{k_{1p}}{m_1} y \dot{y}^2 - 3 \frac{c_2 k_{1p}}{m_1 m_2} y^2 \dot{y}$$

$$+ \frac{k_2}{m_1 m_1} u(t) + \xi(t) \quad (3-3)$$

که در آن:

$$\xi(t) = \frac{k_2}{m_1 m_2} f(t) + \frac{c_2}{m_1 m_2} \dot{f}(t) + \frac{1}{m_1} \ddot{f}(t) \quad (4-3)$$

معادله‌ی (۴-۳) در واقع تابع مورد نیاز جهت کنترل است که می‌بایست تخمین زده شود. در واقع به جای اینکه مقادیر $f(t)$ و $\dot{f}(t)$ و $\ddot{f}(t)$ هر کدام به صورت جداگانه تخمین زده شوند، تابع ξ که برای

کنترل سیستم مورد نیاز است تخمین زده می‌شود. این عملیات جهت بهبود تخمین مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا در صورت تخمین $f(t)$ و دوبار مشتق گرفتن از آن، در صورت وجود خطا در تخمین $f(t)$ خطا و نویزها در مشتقات بالاتر افزایش یافته و حتی ممکن است تخمین مشتقات بالاتر را از اعتبار ساقط کند.

برای تخمین تابع ξ از تخمین گر لیونبرگر استفاده شده که این تخمین گر از سیگنال پیش‌بینی سری تیلور^۱ استفاده می‌کند که در معادله (۵-۳) نشان داده شده است [۱۴].

$$\xi(t) = \sum_{i=0}^{r-1} p_i t^i \quad (5-3)$$

که در این سری تمامی ضرایب p_i ناشناخته هستند و t متغیر زمانی سری است. معادلات فضای حالت سیگنال پیش‌بینی در معادله (۶-۳) آمده است که r مرتبه‌ی این معادلات نشان دهنده‌ی میزان دقت پیش‌بینی است و با افزایش مرتبه‌ی تخمین گر میزان دقت و حجم پردازش افزایش می‌یابد.

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 &= \xi_3 \\ &\vdots \\ \dot{\xi}_{r-1} &= \xi_r \\ \dot{\xi}_r &= 0 \end{aligned} \quad (6-3)$$

که در آن‌ها $\xi_1 = \xi$ و $\xi_2 = \dot{\xi}$ و \dots و $\xi_r = \xi^{(r-1)}$ می‌باشد.

مدل توسعه یافته‌ی سیگنال پیش‌بینی سیستم دینامیکی در معادله (۷-۳) نشان داده شده است.

^۱ Taylor

$$\dot{\eta}_1 = \eta_2$$

$$\dot{\eta}_2 = \eta_3$$

$$\dot{\eta}_3 = \eta_4$$

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_4 = & -\left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2}\right)\eta_4 - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} + \frac{c_1 c_2}{m_1 m_2}\right)\eta_3 \\ & - \left[\frac{c_2 k_2}{m_1 m_2} + \frac{c_2(k_1 + k_2)}{m_1 m_2}\right]\eta_2 - \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}\eta_1 - \frac{k_2 k_{1p}}{m_1 m_2}\eta_1^3 \\ & - 3\frac{k_{1p}}{m_1}\eta_1^2 \eta_3 - 6\frac{k_{1p}}{m_1}\eta_1 \eta_2^2 - 3\frac{c_2 k_{1p}}{m_1 m_2}\eta_1^2 \eta_2 + \frac{k_2}{m_1 m_1}u(t) \\ & + \xi_1 \end{aligned}$$

$$\dot{\xi}_1 = \xi_2$$

$$\dot{\xi}_2 = \xi_3$$

⋮

$$\dot{\xi}_{r-1} = \xi_r$$

$$\dot{\xi}_r = 0$$

(۷-۳)

که در آن $y = \eta_1 = z_1$ و $\dot{y} = \eta_2$ و ... می باشد.

با استفاده از مشاهده گر لیونبرگر، معادلات فضای حالت رابطه (۶-۳) به صورت معادله (۸-۳) به دست می آید که با انتخاب مقادیر مناسب $\beta_0 \dots \beta_r$ محل قطب های تخمین گر را می توان تعیین کرد که در نهایت نحوه ی رسیدن تخمین گر به مقدار واقعی را تنظیم خواهد کرد.

$$\hat{\eta}_1 = \hat{\eta}_2 + \beta_7(y - \hat{y})$$

$$\hat{\eta}_2 = \hat{\eta}_3 + \beta_6(y - \hat{y})$$

$$\hat{\eta}_3 = \hat{\eta}_4 + \beta_5(y - \hat{y})$$

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_4 = & -\left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2}\right)\eta_4 - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} + \frac{c_1 c_2}{m_1 m_2}\right)\eta_3 \\ & - \left[\frac{c_2 k_2}{m_1 m_2} + \frac{c_2(k_1 + k_2)}{m_1 m_2}\right]\eta_2 - \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}\eta_1 - \frac{k_2 k_{1p}}{m_1 m_2}\eta_1^3 \\ & - 3\frac{k_{1p}}{m_1}\eta_1^2\eta_3 - 6\frac{k_{1p}}{m_1}\eta_1\eta_2^2 - 3\frac{c_2 k_{1p}}{m_1 m_2}\eta_1^2\eta_2 \\ & + \frac{k_2}{m_1 m_1}u(t) + \hat{\xi}_1 + \beta_4(y - \hat{y}) \end{aligned}$$

$$\hat{\xi}_1 = \hat{\xi}_2 + \beta_3(y - \hat{y})$$

$$\hat{\xi}_2 = \hat{\xi}_3 + \beta_2(y - \hat{y})$$

$$\hat{\xi}_3 = \hat{\xi}_4 + \beta_1(y - \hat{y})$$

$$\hat{\xi}_4 = \beta_0(y - \hat{y})$$

(۸-۳)

۳-۳- جاذب ارتعاشی فعال

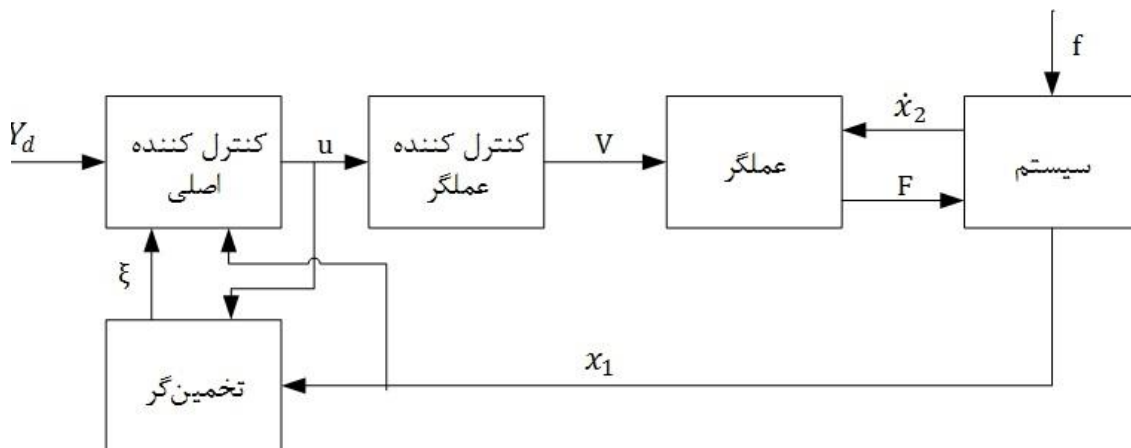
جاذب ارتعاشی از نگاه کنترلی به دو دسته‌ی جاذب ارتعاشی فعال و جاذب ارتعاشی غیر فعال تقسیم می‌شوند. جاذب ارتعاشی غیر فعال جاذب‌هایی هستند که هیچگونه سیستم کنترلی ندارند و تنها با جذب انرژی و اعمال نیرو در فرکانس مناسب ارتعاشات سیستم را کاهش می‌دهند. اما جاذب ارتعاشی فعال نه تنها از مزایای جاذب ارتعاشی غیرفعال استفاده می‌کند، بلکه از سیستم کنترلی به همراه عملگر نیز برای کاهش یا کنترل ارتعاشات نیز بهره می‌برد.

جاذب ارتعاشی فعال در واقع سیستم هوشمندی است که می‌تواند فرکانس‌های ارتعاشی را از روی سیستم اصلی حذف کند و موقعیت جسم را کنترل نماید. با توجه به شکل ۲-۲ عملگر کنترلی بر روی جرم جاذب قرار گرفته است. علت نصب عملگر بر روی جاذب کوچکتر شدن عملگر است. در صورتی که عملگر بر روی جرم اصلی نصب شود، عملگر متناسب با نسبت جرم‌های جاذب و جرم اصلی بزرگتر می‌شود که در واقع در این حجم دیگر نیاز به جاذب ارتعاشی نخواهد بود و عملگر و یک سیستم کنترلی

برای کاهش ارتعاشات کافی خواهد بود. هرچند وجود جرم جاذب در این حالت به عملگر کمک خواهد کرد.

روش‌های کنترلی انجام شده برای سیستم شکل ۲-۲ و معادلات (۲-۲) و (۳-۲)، روش کنترل با فیدبک خطی ساز در حضور عدم قطعیت و بدون عدم قطعیت و کنترل مود لغزشی در حضور عدم قطعیت است و پاسخ آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

استراتژی کنترل، استفاده از بازخورد موقعیت جرم اصلی و استفاده از آن در کنترل کننده و تخمین‌گر است. شکل شکل ۱-۳ شمای کلی سیستم به همراه کنترل کننده و تخمین‌گر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل تنها بازخوردی که از سیستم اصلی شامل جرم و فنر و دمپر اصلی و جرم و فنر و دمپر جاذب گرفته شده است، موقعیت جرم اصلی است. خروجی تخمین‌گر مقدار تابع نیروی $\xi(t)$ است که این تابع به همراه موقعیت جرم اصلی و موقعیت مطلوب ورودی‌های کنترل کننده هستند. کنترل کننده عملگر مغناطیس ورودی مطلوب نیرو را از کنترل کننده اصلی دریافت می‌کند و با تنظیم ولتاژ عملگر میزان نیروی عملگر را تعیین می‌کند.



شکل ۱-۳: استراتژی کنترل سیستم

۳-۳-۱- کنترل کننده فیدبک خطی ساز

کنترل کننده‌ی فیدبک خطی ساز با جبران مقادیر موقعیت و تغییرات آن‌ها در سیستم خروجی مطلوب را تضمین می‌کند. معادله‌ی خطا در این کنترل کننده رفتار سیستم را به همراه کنترل کننده تعیین می‌کند. می‌توان کنترل کننده فیدبک خطی ساز را بدون معادله خطا و تنها با یافتن ورودی کنترلی از معادله سیستم پیدا کرد؛ اما جواب این کنترل کننده تنها به نقطه تنظیم مناسب بود و پاسخ آن به ورودی‌های مسیر احتمالاً پاسخ نامناسبی خواهد بود.

معادله خطای استفاده شده معادله‌ی (۹-۳) است که از مرتبه چهار تشکیل شده است که در آن $a_0 \dots a_3$ ضرایب کنترلی هستند که با تنظیم این مقادیر نحوه‌ی رسیدن سیستم به پاسخ مطلوب را می‌توان تعیین کرد. این مقادیر باید به گونه‌ای تعیین شوند که پایداری معادله خطا را ضمانت کند.

$$e^{(4)} + a_3 e^{(3)} + a_2 \ddot{e} + a_1 \dot{e} + a_0 e = 0 \quad (9-3)$$

برای معادله‌ی (۹-۳) خطا به صورت $e = y_d - y$ تعریف شده است که در واقع خطای موقعیت جرم اصلی نسبت به موقعیت مطلوب است.

با قرار دادن معادلات (۱-۳) در معادله‌ی (۵-۲)، سیستم برحسب خروجی y به دست می‌آید که مقدار $y^{(4)}$ در معادله‌ی (۳-۳) نشان داده شده است.

با گرفتن بازخورد از موقعیت جرم اصلی و سه بار مشتق گرفتن از آن مقادیر y و \dot{y} و \ddot{y} و $y^{(3)}$ به دست می‌آیند. با در نظر گرفتن مقادیر مطلوب y_d و \dot{y}_d و \ddot{y}_d و $y_d^{(3)}$ و $y_d^{(4)}$ و قراردادن این مقادیر در معادله‌ی خطا معادله‌ی (۱۰-۳) پدید می‌آید.

$$\begin{aligned} & (y_d^{(4)} - y^{(4)}) + (y_d^{(3)} - y^{(3)})a_3 + (\ddot{y}_d - \ddot{y})a_2 + (\dot{y}_d - \dot{y})a_1 \\ & + (y_d - y)a_0 = 0 \end{aligned} \quad (10-3)$$

با قرار دادن معادله‌ی (۳-۳) در معادله‌ی (۱۰-۳) و به دست آوردن u ، کنترل کننده فیدبک خطی ساز به شکل معادله (۱۱-۳) به دست می‌آید.

$$u = (v - \psi - \xi) \frac{m_1 m_2}{k_2} \quad (11-3)$$

که در آن:

$$v = y_d^{(4)} - a_3 e^{(3)} - a_2 \ddot{e} - a_1 \dot{e} - a_0 e \quad (12-3)$$

$$\begin{aligned} \psi = & - \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \right) y^{(3)} - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} + \frac{c_1 c_2}{m_1 m_2} \right) \ddot{y} \\ & - \left(\frac{c_1 k_2}{m_1 m_2} + \frac{c_2 (k_1 + k_2)}{m_1 m_2} \right) \dot{y} - \left(\frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} \right) y - \left(\frac{k_2 k_{1p}}{m_1 m_2} \right) y^3 \\ & - \left(\frac{3k_{1p}}{m_1} \right) y^2 \ddot{y} - \left(\frac{6k_{1p}}{m_1} \right) y \dot{y}^2 - \left(\frac{3c_2 k_{1p}}{m_1 m_2} \right) y^2 \dot{y} \end{aligned} \quad (13-3)$$

و همچنین ξ مقدار تخمین زده شده‌ی معادله‌ی نیرو است که در معادله (۴-۳) رابطه ریاضی آن آمده است.

۳-۳-۲- کنترل به روش مود لغزشی

برای برطرف کردن خطا در صورت وجود عدم قطعیت‌ها، از روش‌های کنترل مقاوم استفاده می‌شود. از جمله روش‌های متداول با پاسخ مناسب و همچنین تضمین کننده پایداری، روش مود لغزشی است که این روش با ایجاد یک سطح لغزش سیستم را به سمت پاسخ مطلوب سوق می‌دهد و علاوه بر اینکه سیستم را به پاسخ مطلوب می‌رساند، عدم قطعیت‌های موجود در سیستم را پوشش می‌دهد و خطای پاسخ را نیز کاهش می‌دهد. روش مود لغزشی براساس پایداری لیاپانوف است که موجب پایداری سیستم می‌شود [۳۰].

با در نظر گرفتن معادله سیستم به شکل رابطه (۱۴-۳) و سطح لغزش صفر به صورت رابطه مرتبه ۳ در رابطه (۱۵-۳) طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم مرتبه چهار انجام می گیرد. که معادله مرتبه ۴ در واقع خط آخر معادله (۱-۳) است که الباقی مقادیر به صورت $f(y)$ نشان داده شده است.

$$y^{(4)} = f(y) + \frac{k_2}{m_1 m_1} u(t) \quad (14-3)$$

$$s = e^{(3)} + 3\lambda\ddot{e} + 3\lambda^2\dot{e} + \lambda^3 e \quad (15-3)$$

هدف کنترل برای سطح لغزش صفر، یافتن u به گونه‌ای است که متغیر s به سمت صفر میل کند.

$$s = 0 \rightarrow e^{(3)} + 3\lambda\ddot{e} + 3\lambda^2\dot{e} + \lambda^3 e = 0 \quad (16-3)$$

برای محقق شدن رابطه‌ی (۱۶-۳) از روش اثبات پایداری لیاپانوف استفاده می شود. این روش با پایدار در نظر گرفتن سیستم پارامترهای کنترلی به گونه‌ای می یابد که سیستم به سمت صفر کردن خطا و حرکت کند. برای این کار تابع لیاپانوف تابعی مثبت معین در نظر گرفته می شود.

$$V = \frac{1}{2}s^2 > 0 \quad (17-3)$$

حال برای محقق شدن رابطه‌ی (۱۶-۳) می بایست مقدار u را به گونه‌ای طراحی که $\dot{V}(s)$ مقداری منفی معین داشته باشد.

$$\dot{V}(s) = s\dot{s} \quad (18-3)$$

که با مشتق گرفتن از رابطه (۱۵-۳) مقدار \dot{s} به دست می آید.

$$\dot{s} = y_d^{(4)} - y^{(4)} + 3\lambda e^{(3)} + 3\lambda^2\ddot{e} + \lambda^3\dot{e} \quad (19-3)$$

با قراردادن رابطه‌ی (۱۴-۳) در رابطه‌ی (۱۹-۳) مقدار \dot{s} به دست می آید.

$$\dot{s} = y_d^{(4)} - f(y) - \frac{k_2}{m_1 m_1} u(t) + 3\lambda e^{(3)} + 3\lambda^2 \ddot{e} + \lambda^3 \dot{e} \quad (20-3)$$

برای ساده‌تر کردن محاسبات $\dot{V}(s)$ ، مقدار آن را نه تنها کوچکتر از صفر، بلکه مقدار آن را کوچکتر از یک مقدار منفی نیز در نظر گرفته می‌شود. برای این کار $\dot{V}(s) < -\eta|s|$ در نظر گرفته می‌شود که مقدار η همیشه مثبت است.

$$\dot{V}(s) = s\dot{s} \leq -\eta|s| \quad (21-3)$$

برای اینکه $\dot{s} = 0$ باشد مقدار u از رابطه‌ی (20-3) چنین به دست می‌آید.

$$\dot{s} = 0 \rightarrow u = \frac{m_1 m_2}{k_2} \left(y_d^{(4)} - f(y) + 3\gamma e^{(3)} + 3\gamma^2 \ddot{e} + \gamma^3 \dot{e} \right) \quad (22-3)$$

در صورتی که مقادیر پارامتری سیستم به صورت کامل مشخص شده و دقیق باشند، یعنی عدم قطعیت وجود نداشته باشد، کنترل‌کننده معادله (22-3) پاسخگوی مسئله هست ولی در صورت وجود عدم قطعیت یعنی مقادیر $f(y)$ دقیقاً برای کنترل‌کننده مشخص نیست؛ پس با $\hat{f}(y)$ نشان داده می‌شود و u نیز به عنوان u_{eq} شناخته می‌شود.

$$u_{eq} = \frac{m_1 m_2}{k_2} \left(y_d^{(4)} - \hat{f}(y) + 3\gamma e^{(3)} + 3\gamma^2 \ddot{e} + \gamma^3 \dot{e} \right) \quad (23-3)$$

برای جبران نامعینی‌های موجود در مقدار u_{eq} مقدار $k \operatorname{sgn}(s)$ از معادله‌ی (23-3) کم می‌شود و سپس کنترل‌کننده مود لغزشی به صورت معادله‌ی (24-3) به دست می‌آید.

$$u = u_{eq} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (24-3)$$

که در این رابطه k ضریب است.

در ادامه برای اثبات پایداری و یافتن مقدار k با قرار دادن رابطه‌ی (24-3) و (20-3) در رابطه‌ی (3-

۲) مراحل اثبات پایداری لیاپانوف طی می‌شود.

$$s\dot{s} \leq -\eta|s| \xrightarrow{\frac{s}{|s|} = \text{sgn}(s)} \dot{s} \text{sgn}(s) \leq -\eta$$

$$\rightarrow (y_d^{(4)} - f(y) - \frac{k_2}{m_1 m_1} u(t) + 3\lambda e^{(3)} + 3\lambda^2 \ddot{e} + \lambda^3 \dot{e}) \text{sgn}(s) \leq -\eta$$

$$\rightarrow \left(y_d^{(4)} - f(y) - \frac{k_2}{m_1 m_1} \left(\frac{m_1 m_2}{k_2} (y_d^{(4)} - \hat{f}(y) + 3\lambda e^{(3)} + 3\lambda^2 \ddot{e} + \lambda^3 \dot{e}) - k \text{sgn}(s) \right) + 3\lambda e^{(3)} + 3\lambda^2 \ddot{e} + \lambda^3 \dot{e} \right) \text{sgn}(s) \leq -\eta$$

$$\left(\hat{f}(y) - f(y) \right) \text{sgn}(s) + \frac{k_2}{m_1 m_1} k \leq -\eta \quad (25-3)$$

برای پیدا کردن ضریب k در کنترل کننده می بایست کران بالای نامعینی ها مشخص باشد. یعنی:

$$|\hat{f}(y) - f(y)| \leq \rho \quad (26-3)$$

در این صورت مقدار k اینچنین به دست می آید.

$$\rho + \frac{k_2}{m_1 m_1} k \leq -\eta$$

$$k \leq -\frac{m_1 m_2}{k_2} (\eta + \rho) \quad (27-3)$$

با در نظر گرفتن k کوچکتر مقادیر به دست آمده در رابطه ی (27-3)، بنابر پایداری لیاپانوف، سیستم

و کنترل کننده به صورت کلی پایدار می شوند.

کنترل کننده ی مود لغزشی در نهایت به شکل رابطه ی (28-3) باز نویسی می شود.

$$u = \frac{m_1 m_2}{k_2} \left(y_d^{(4)} - \hat{f}(y) + 3\lambda e^{(3)} + 3\lambda^2 \ddot{e} + \lambda^3 \dot{e} + (\eta + \rho) \text{sgn}(s) \right) \quad (28-3)$$

$$u = (\varphi - \psi - \xi + (\eta + \rho) \operatorname{sgn}(s)) \frac{m_1 m_2}{k_2}$$

که در این رابطه:

$$\varphi = y_d^{(4)} + 3\lambda e^{(3)} + 3\lambda^2 \ddot{e} + \lambda^3 \dot{e}$$

$$\hat{f}(y) = \psi + \xi \quad (29-3)$$

که مقدار ψ در رابطه (۱۳-۳) نشان داده شده و مقدار ξ نیز مقدار تخمین زده شده توسط تخمین گر است.

۳-۴- کنترل عملگر مغناطیسی

عملگر مغناطیسی با توجه به رابطه (۱۰-۲) مدل سازی شده که با توجه به اندوکتانس خودی بسیار پایین سیم حامل جریان و همچنین اندوکتانس متقابل کم بین سیم پیچ ها و سیم حامل جریان با در نظر گرفتن $L \cong 0$ ، معادله (۱۰-۲) به صورت معادله (۳۰-۳) بازنویسی می شود.

$$V_B = -R_e i - E \quad (30-3)$$

نیروی ایجاد شده در معادله (۲۱-۲) محاسبه شده که با در نظر گرفتن ورودی V_B مقدار خروجی F_m به دست می آید.

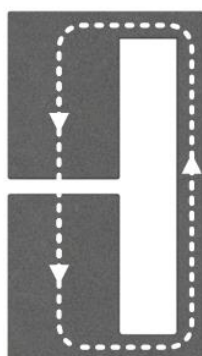
$$V_B = \frac{F_m R_e}{aB} + z_4 B a \quad (31-3)$$

معادله (۳۱-۳) در واقع کنترل کننده فیدبک خطی ساز برای این عملگر است. با کاهش جریان سیم پیچ ها مقدار چگالی شدت میدان مغناطیسی کاهش می یابد. با این کاهش می توان از تاثیر سرعت جرم جاذب در کنترل کننده چشم پوشی کرد. به دلیل اینکه تنها بازخوردی که از سیستم گرفته می شود موقعیت جرم اصلی است و هیچ بازخوردی از جرم جاذب وجود ندارد، کنترل کننده رابطه (۳-۳)

(۳۱) را نمی‌توان پیاده‌سازی کرد که با کاهش جریان سیم‌پیچ‌ها و کاهش تاثیر القای فارادی، کنترل کننده رابطه (۳۱-۳) به شکل رابطه (۳۲-۳) تقریب زده می‌شود.

$$V_B = \frac{F_m R_e}{aB} \quad (۳۲-۳)$$

چون از مقدار ناچیز اندوکتانس و تاثیر سرعت چشم‌پوشی شده این کنترل کننده در عمل بهره‌ای ثابت با ضریب $\frac{R_e}{aB}$ است. از راهکارهای دیگر برای کاهش اندوکتانس استفاده می‌شود نحوه پیچش سیم‌پیچ‌هاست به طوری که فاصله بین سیم‌ها بسیار کم و سیم‌ها در کنار هم (نه روی هم) در طول هسته پیچیده شوند. همچنین هسته مغناطیسی مانند شکل ۲-۳ به صورت حلقه بسته طراحی شده است تا کمترین اتلاف شار در ایجاد شود که در نهایت به کاهش اندوکتانس متقابل منجر می‌شود.



شکل ۲-۳: مقطع هسته و مسیر حرکت شار مغناطیسی

۳-۵- بهینه‌سازی ضرایب کنترل کننده‌ها

ضرایب کنترل کننده‌ها در کنترل کننده‌ی فیدبک خطی ساز و مود لغزشی معمولاً به صورت آزمون و خطا و به کمک شبیه‌سازی به دست می‌آیند. در این پژوهش ضرایب کنترل کننده‌های فیدبک خطی‌ساز شامل a_0, a_1, a_2, a_3 و مود لغزشی λ به کمک بهینه‌سازی به‌دست آمده که برای بهینه‌سازی از الگوریتم ازدحام ذرات مشهور به PSO استفاده شده است. این الگوریتم با تنظیم ضرایب کنترل کننده‌ها

زمان نشت و خطای کنترل کننده‌ها را کمینه می‌کند تا سریعترین پاسخ و کمترین حالت ماندگار را در خروجی سیستم‌ها ایجاد شود. عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات به این نحو است که با تعیین تعدادی جمعیت اولیه به صورت تصادفی و قرار دادن آن‌ها در تابع هزینه کمترین مقدار خروجی در اولین گام پیدا شده و دیگر مقادیر شروع به حرکت به سمت کمترین مقدار می‌کنند. در گام‌های بعد اگر ورودی دیگری مقدار کمتری پیدا کرد دیگر ذرات به سمت این مقدار کمتر حرکت می‌کنند و این گام‌ها طی می‌شود تا کمترین مقدار خروجی یافت شود.

برای بدست آوردن بهترین ضرایب برای کنترل کننده‌ها در حالی که خطا و زمان نشت کمینه شود می‌بایست تابع هزینه و قیود برای بهینه سازی تعریف شوند. برای این کار در ابتدا با اعمال ورودی مشخص به سیستم مانند ورودی پله زمانی که سیستم ۹۹٪ خطا را جبران کرده باشد و سرعت و شتاب و جرک سیستم صفر شود در نظر گرفته می‌شود. در واقع خروجی تابع هزینه زمان نشت است و کم بودن خطا قید مسئله تعریف شده است.

فصل ۴ شبیه سازی

۴-۱- پیشگفتار

شبیه سازی نتایج عملکرد سیستم جرم-فنر-دمپر به همراه جاذب ارتعاشی و عملگر مغناطیسی به همراه کنترل کننده در محیط نرم افزار متلب^۱ انجام شده است. نرم افزار متلب به روش تحلیل عددی، محاسبات شبیه سازی را انجام می دهد. شبیه سازی سیستم مورد مطالعه در محیط کدنویسی و سیمولینک^۲ نرم افزار انجام شده و نمودارهای عملکرد و مقایسه نرم افزار به دست آمده است.

برای شبیه سازی از نیروی اغتشاشی هارمونیک به شکل مجموع چند نیروی سینوسی با فرکانس و دامنه و فاز متفاوت استفاده شده است که به شکل معادله (۴-۱) به دست آمده است. این معادله نیرو به صورت نیروی اغتشاشی به جرم اصلی وارد شده و در کنترل کننده و تخمین گر هیچگونه نقشی ندارد.

$$f = 0.3 \sin\left(2.145 t + \frac{\pi}{8}\right) + 0.4 \sin\left(1.826 t + \frac{\pi}{8}\right) + 0.45 \sin\left(0.49 t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (4-1)$$

مقادیر جرم و فنر و دمپر سیستم اصلی مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است که با توجه به مقادیر سیستم اصلی و همچنین فرکانس طبیعی سیستم، مقدار جرم و فنر و دمپر در جاذب ارتعاشی به دست آمده است؛ به صورتی که دامنه ی ارتعاشات در فرکانس طبیعی به صفر میل کند. در ادامه ی جدول ۱ مقادیر جرم و فنر و دمپر جاذب نوشته شده است. مقادیر جاذب با توجه به محاسبات مرجع ۱۴ به دست آمده است [۱۴].

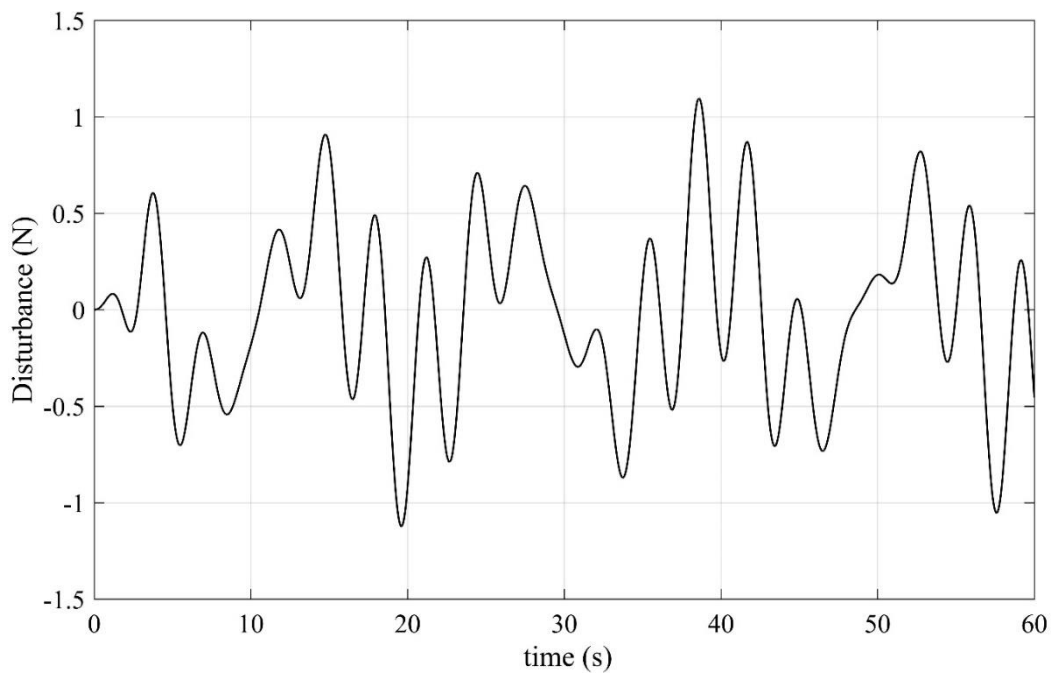
جدول ۱ مقادیر سیستم اصلی و جاذب

پارامتر	نماد	مقدار
جرم اصلی	m_1	10 (kg)
ضریب سختی خطی فنر اصلی	k_1	44 (N/m)
ضریب سختی غیر خطی فنر اصلی	k_{1p}	44 (N/m ³)

^۱ MATLAB^۲ SIMULINK

0.1 (Ns/m)	c_1	دمپر اصلی
0.6 (kg)	m_2	جرم جاذب
2 (N/m)	k_2	فنر جاذب
0.08 (Ns/m)	c_2	دمپر جاذب

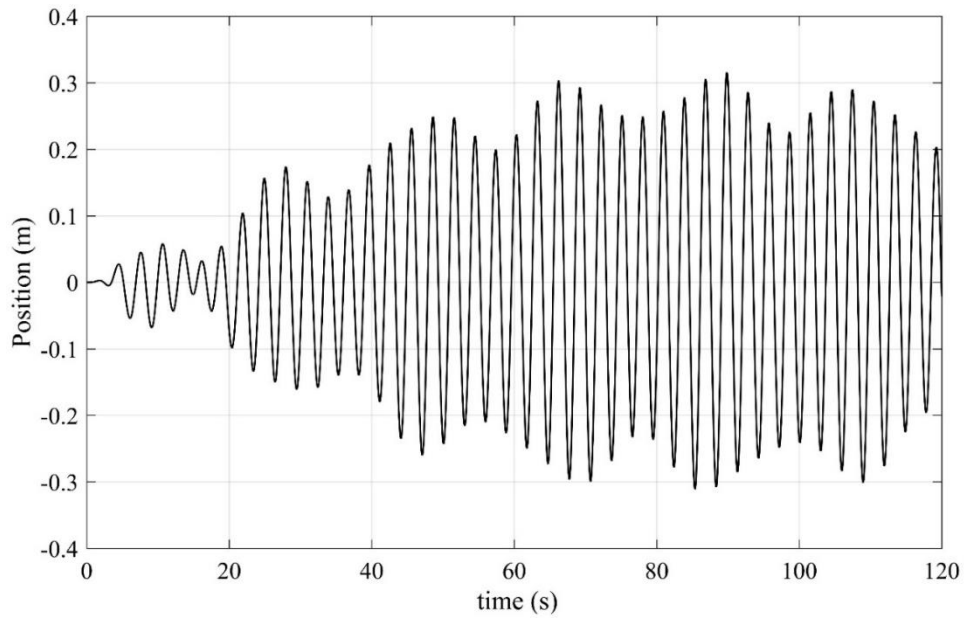
با جایگذاری مقادیر جدول ۱ در معادلات سیستم و اعمال نیروی اغتشاشی، نحوه پاسخگویی سیستم با جاذب و بدون جاذب به نیروی اغتشاشی در شکل‌های شکل ۲-۴ و شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود. شکل ۱-۴ نیروی اغتشاشی وارد شده بر سیستم را نشان می‌دهد.



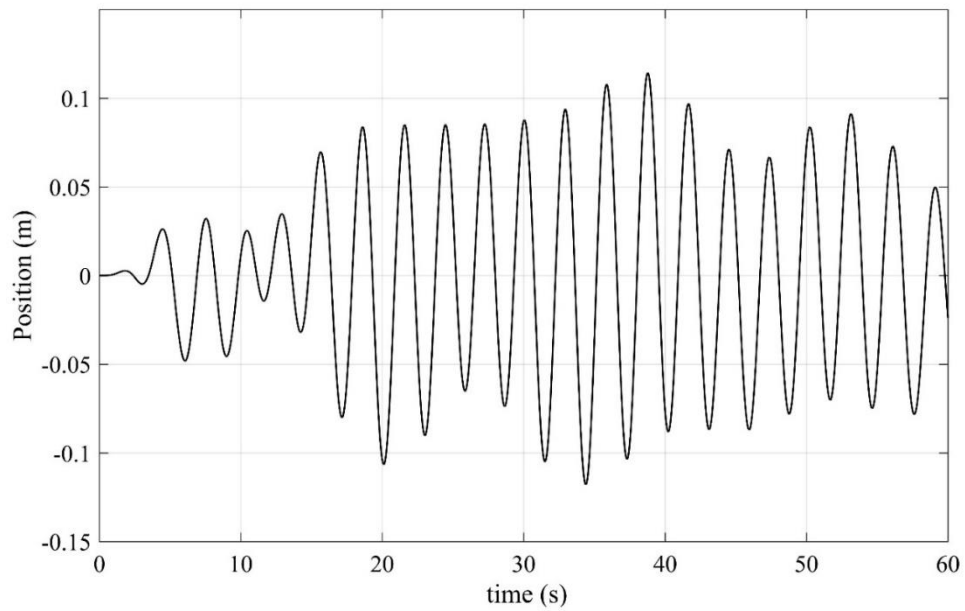
شکل ۱-۴: نیروی اغتشاشی وارد شده به سیستم

اگر نیروی اغتشاشی تنها به سیستم اصلی بدون جاذب ارتعاشی وارد شود جرم اصلی نوسان خواهد کرد. شکل ۲-۴ نوسان سیستم اصلی را نشان می‌دهد که با اضافه کردن جاذب ارتعاشی نوسانات سیستم اصلی کاهش می‌یابد. شکل ۳-۴ نوسانات جرم اصلی را به همراه جاذب ارتعاشی را نشان می‌دهد. مشاهده

می شود که نوسانات جرم اصلی همراه با جاذب در مقایسه با سیستم اصلی بدون جاذب به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد.



شکل ۴-۲: نوسانات جرم اصلی بدون جاذب



شکل ۴-۳: نوسانات جرم اصلی همراه با جاذب

با اضافه کردن عملگر مغناطیسی و کنترل کننده خروجی سیستم و تاثیر و نحوه عملکرد کنترل کننده را مشاهده کرد. جدول ۲ پارامترها و ضرایب و مقادیر عملگر مغناطیسی را پس از محاسبات برای نیروی لازم برای کنترل را نشان می دهد.

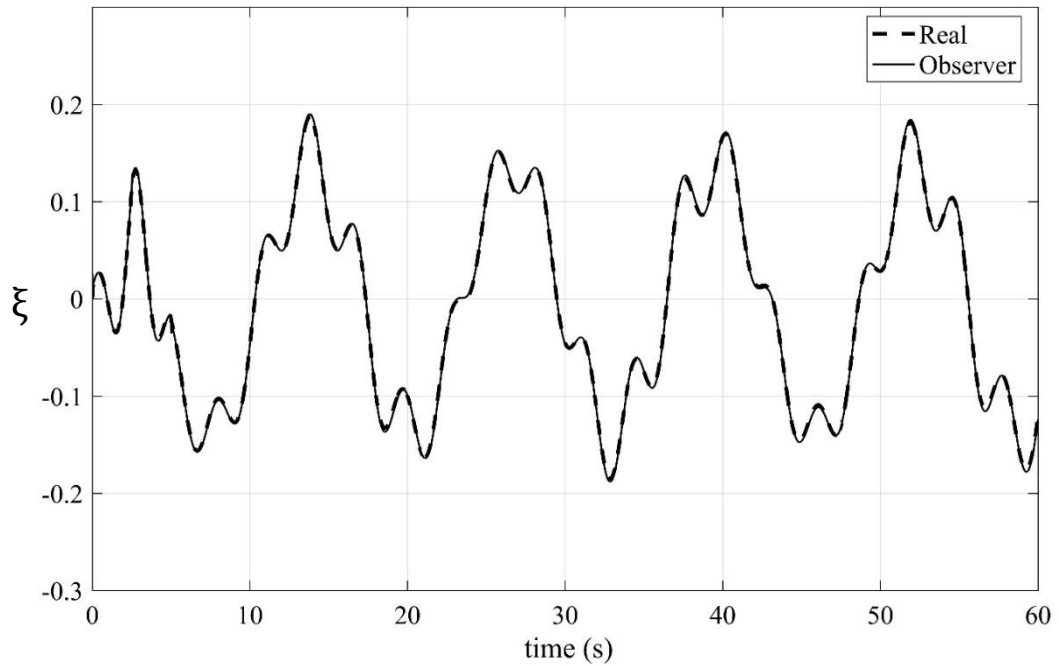
جدول ۲ مقادیر عملگر مغناطیسی

پارامتر	نماد	مقدار
تعداد دور سیم پیچ	N	50
ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی خلا	μ_0	$4\pi * 10^{-7}$ (H/m)
ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی آهن	μ_r	4000
جریان گذرنده از سیم پیچ	I_f	0.5 (A)
عرض سیم پیچ	a	0.04 (m)
طول سیم پیچ	b	0.5 (m)
مقاومت سیم پیچ	R	2 (Ω)

با کنترل و بهینه سازی مقادیر کنترل کننده نتایج و کنترل و تخمین نیروی اغتشاشی به دست می آید.

۴-۲- نتایج شبیه سازی تخمین گر

تخمین گر تابع نیروی اغتشاشی با تخمین معادله (۴-۳) به کنترل سیستم کمک می کند. تخمین گر از روش لیونبرگر مقدار ξ را تخمین زده و این مقدار جهت کنترل به کنترل کننده داده می شود تا کنترل به بهترین شکل صورت گیرد. شکل ۴-۴ مقدار واقعی تابع ξ و مقدار تخمین زده شده را در شرایط مقدار ورودی صفر نشان می دهد.



شکل ۴-۴: تخمین معادله تابع نیرو

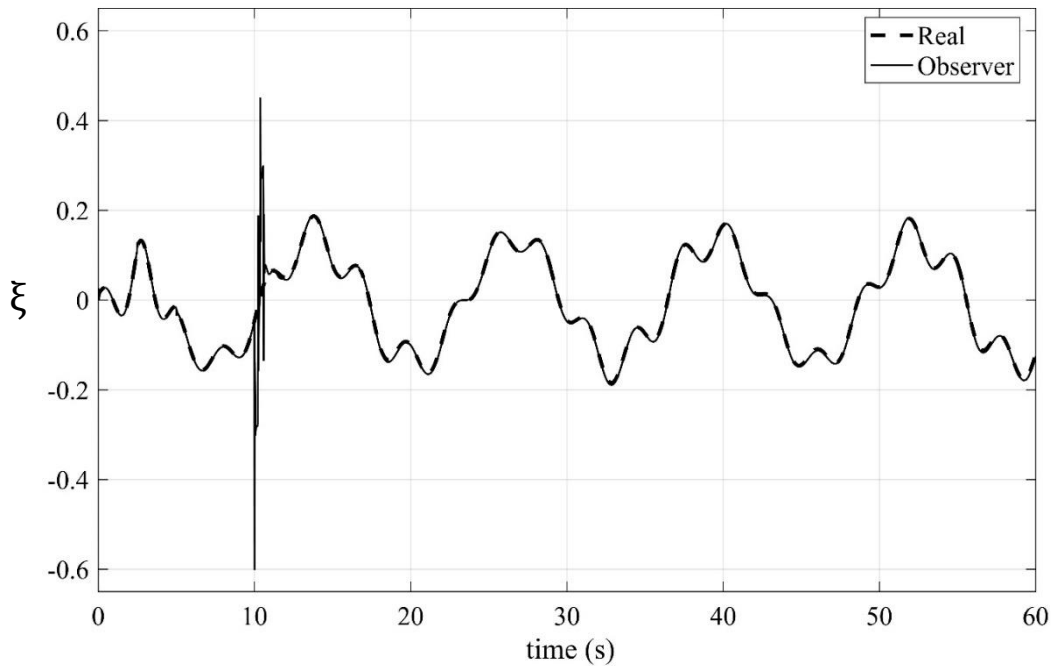
مقادیر قطب‌های تخمین‌گر به صورت آزمون و خطا برای رسیدن مقدار تخمین به مقدار واقعی تابع ξ به دست آمده که با قرار دادن این قطب‌ها، تخمین‌گر، سرعت و دقت مورد نظر را برای رسیدن به مقدار واقعی را به دست می‌آورد. مقادیر قطب‌های تخمین‌گر در جدول ۳ به دست آمده است که این مقادیر به صورتی تعیین شده‌اند که پایداری تخمین‌گر برقرار باشد و با سرعت و دقت بالا مقدار تخمین به مقدار واقعی نزدیک شود.

جدول ۳ مقادیر قطب‌های تخمین‌گر

مقدار	پارامتر
$2.56 * 10^{18}$	β_0
$1.024 * 10^{17}$	β_1
$1.792 * 10^{15}$	β_2
$1.792 * 10^{13}$	β_3
$1.12 * 10^{11}$	β_4
$4.48 * 10^8$	β_5

$$\begin{array}{ll} 1.12 * 10^6 & \beta_6 \\ 1.6 * 10^3 & \beta_7 \end{array}$$

با توجه به شکل ۴-۴ مقدار تخمین زده شده بسیار نزدیک به مقدار واقعی است. شکل ۴-۵ مقدار تخمین زده شده در شرایط ورودی پله و کنترل کننده فیدبک خطی ساز را نشان می دهد که در این شکل مشاهده می شود که تخمین در زمان اعمال پله و حرکات با شتاب بالا و تغییرات زیاد کنترل کننده یعنی در واقع در شتاب بالا، تخمین گر با مقداری خطا همراه است که به سرعت جبران می شود.



شکل ۴-۵: تخمین معادله تابع نیرو در حضور شتاب

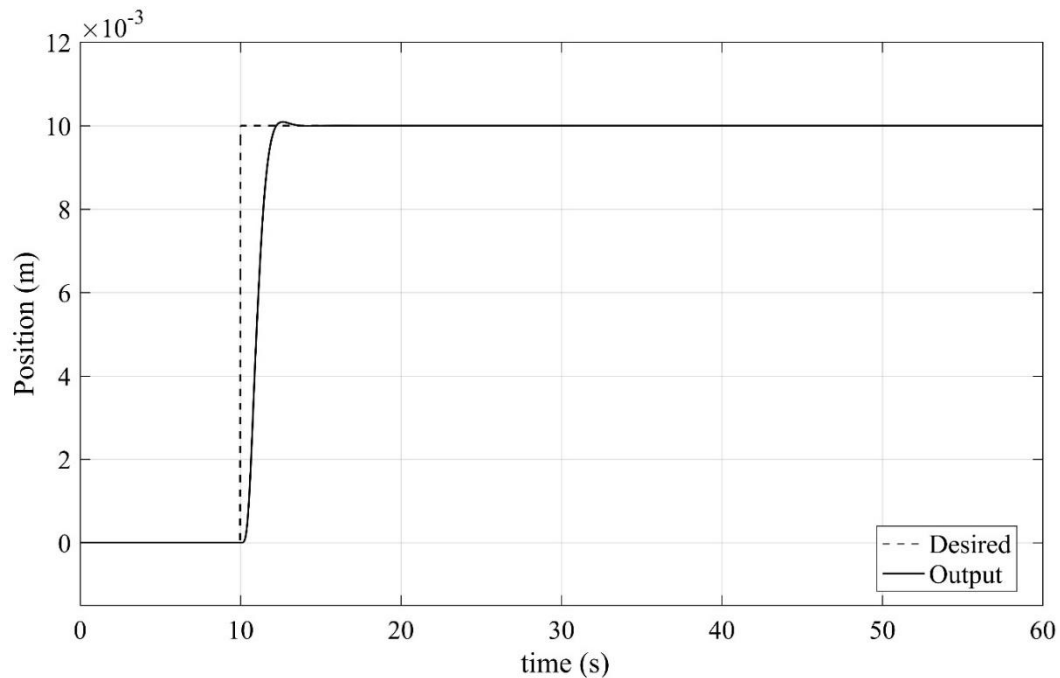
۴-۳- شبیه سازی کنترل

کنترل کننده های فیدبک خطی ساز و مود لغزشی برای دو وضعیت بدون عدم قطعیت و همراه با عدم قطعیت شبیه سازی شده و نحوه کاهش خطا برای ورودی پله به نمایش درآمده است. با نظر به اینکه تخمین گر از ورودی کنترلی و معادلات سیستم برای تخمین تابع ξ استفاده می کند، در صورت وجود

داشتن عدم قطعیت در سیستم این تخمین با خطا همراه خواهد بود و خطای موجود در این تخمین در مقدار کنترل کننده تاثیر خواهد داشت و خطای سیستم را افزایش می دهد.

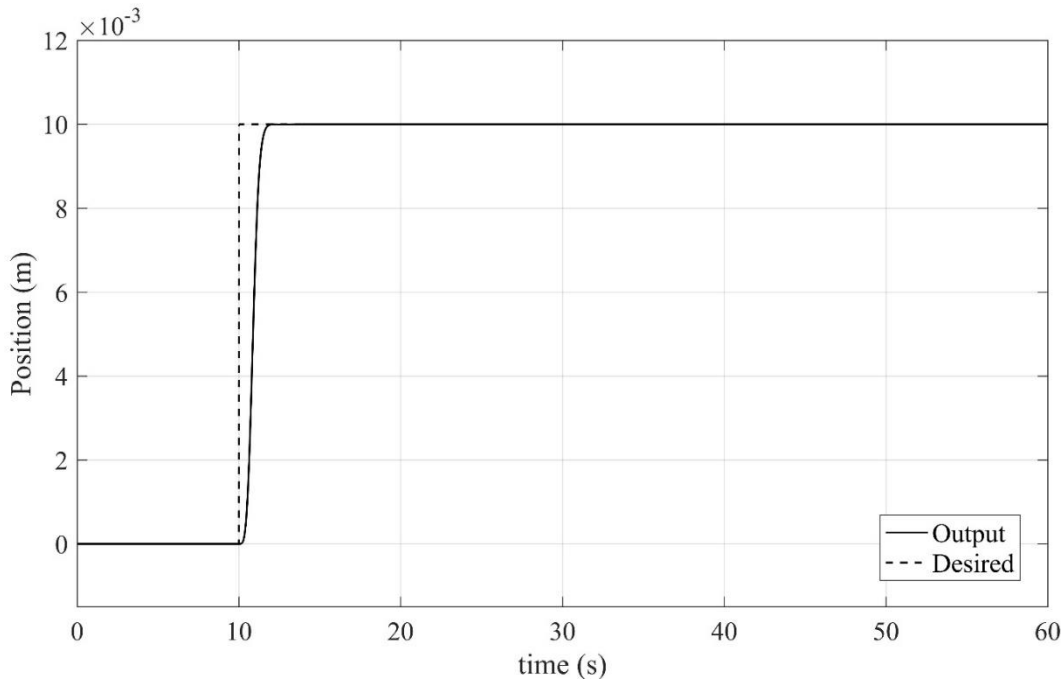
۴-۳-۱- شبیه سازی کنترل بدون عدم قطعیت

کنترل کننده فیدبک خطی ساز به همراه عملگر مغناطیسی با اعمال نیروی کنترلی به جرم جاذب، موقعیت جرم اصلی را کنترل می کند. با اعمال موقعیت، سرعت، شتاب و جرک مطلوب به کنترل کننده و محاسبه نیروی کنترلی توسط کنترل کننده و اعمال نیرو به وسیله عملگر مغناطیسی سیستم رفتار مطلوب از خود نشان خواهد داد. شکل ۴-۶ پاسخ سیستم با کنترل کننده فیدبک خطی ساز را به ورودی پله نشان می دهد. مقادیر ضرایب فیدبک خطی ساز از بهینه سازی توسط الگوریتم ازدحام ذرات برای نمایش سریعترین پاسخ به مقدار $a_0 = 108.93$ و $a_1 = 103.20$ و $a_2 = 41.75$ و $a_3 = 8.07$ به دست آمده و بر روی کنترل کننده اعمال شده است.



شکل ۴-۶: پاسخ پله به کمک کنترل کننده فیدبک خطی ساز بدون عدم قطعیت

کنترل کننده مود لغزشی بدون عدم قطعیت با پاسخ مناسبی همراه است. مقدار λ در این روش کنترل به کمک الگوریتم ازدحام ذرات به دست آمده است. با مقدار $\lambda = 3.84$ پاسخ به صورت شکل ۴-۷ می‌باشد و خروجی کنترل سریع و مناسبی را ایجاد می‌کند.

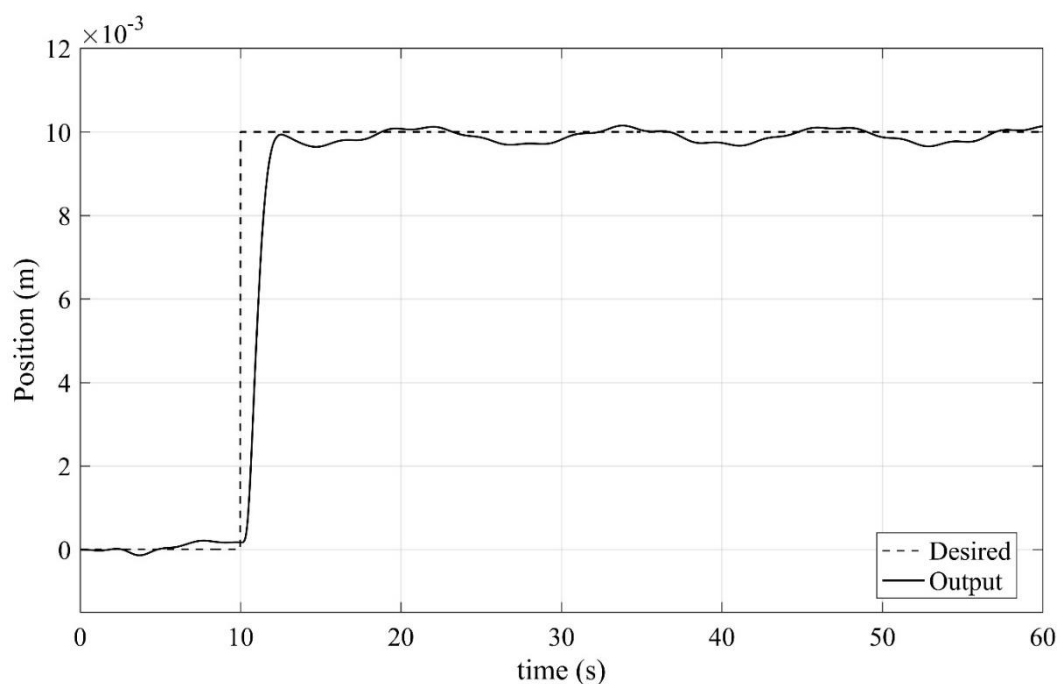


شکل ۴-۷: پاسخ پله به کمک کنترل کننده مود لغزشی بدون عدم قطعیت

شکل ۴-۵ نحوه عملکرد تخمین گر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تخمین گر تنها در زمان اعمال ورودی پله دچار خطا می‌شود. به دلیل کم بودن خطای تخمین گر تاثیر زیادی بر روی خطای سیستم ندارد و سیستم با سرعت و دقت خوبی به مقدار مطلوب می‌رسد.

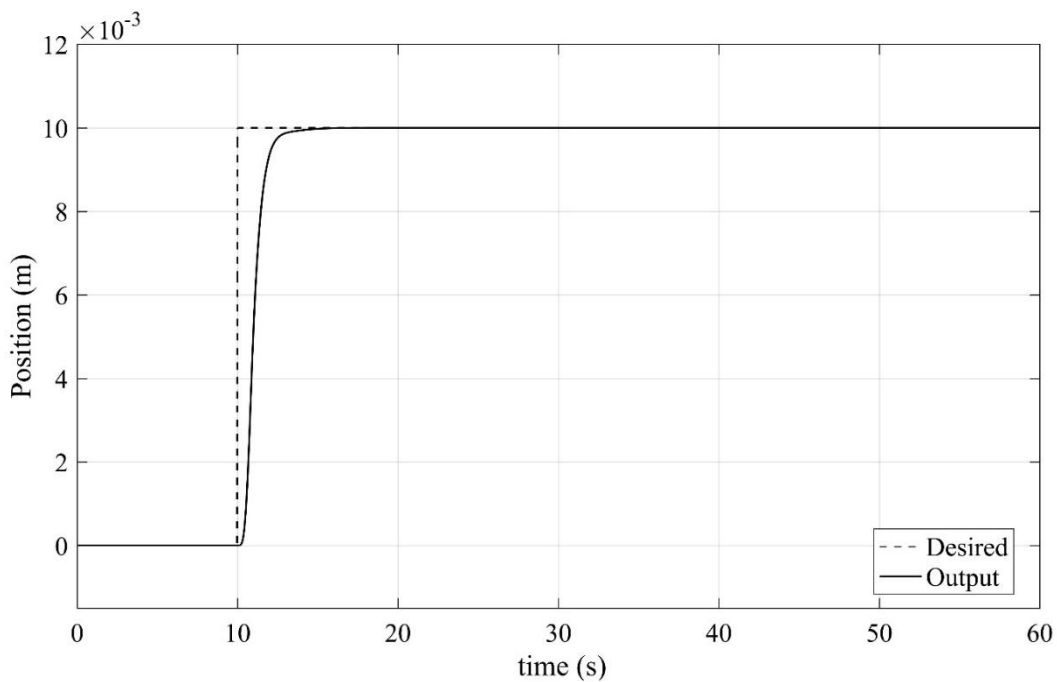
۴-۳-۲- شبیه سازی کنترل در حضور عدم قطعیت

کنترل کننده فیدبک خطی ساز با ضرایب بهینه شده در با عدم قطعیت پارامتری با نوسان و کمی خطا همراه است و پاسخ مناسبی به ورودی پله نمی‌دهد. شکل ۴-۸ پاسخ سیستم به کمک کنترل کننده فیدبک خطی ساز را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۸: پاسخ پله به کمک کنترل کننده فیدبک خطی ساز با عدم قطعیت

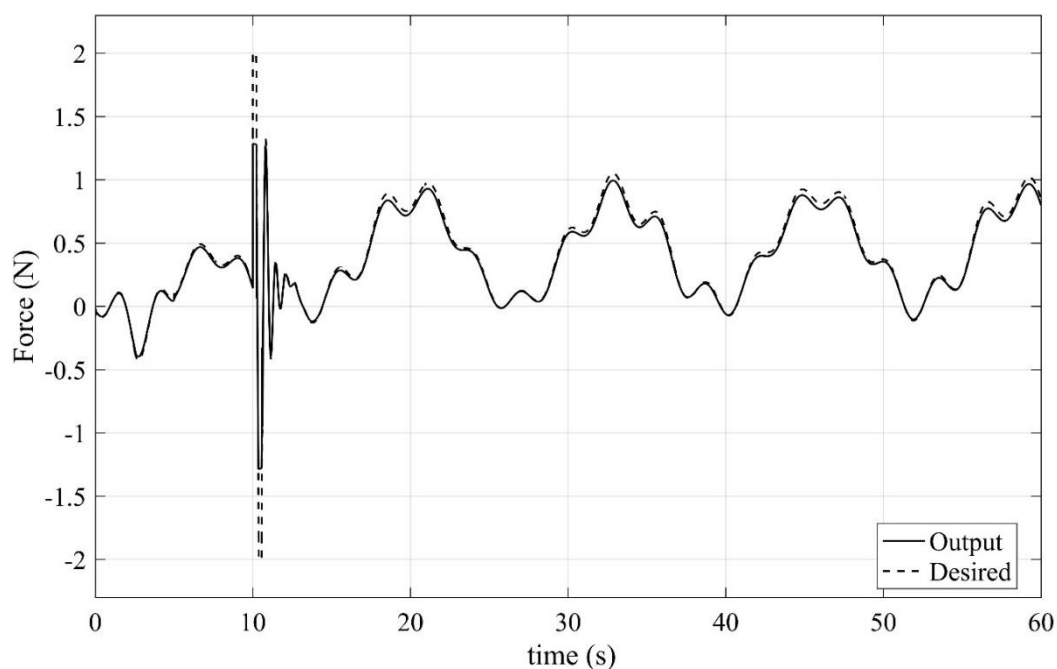
برای جبران خطا و نوسان در حضور عدم قطعیت از کنترل کننده‌ی مود لغزشی استفاده شد که پاسخ مناسب اما کندتری دارد. این کنترل کننده نوسانات و خطای ناشی از عدم قطعیت را به خوبی جبران کرده است. شکل ۴-۹ پاسخ سیستم با کنترل کننده مود لغزشی به همراه عدم قطعیت می‌باشد.



شکل ۴-۹: پاسخ پله به کمک کنترل کننده مود لغزشی با عدم قطعیت

۴-۴- کنترل عملگر مغناطیسی

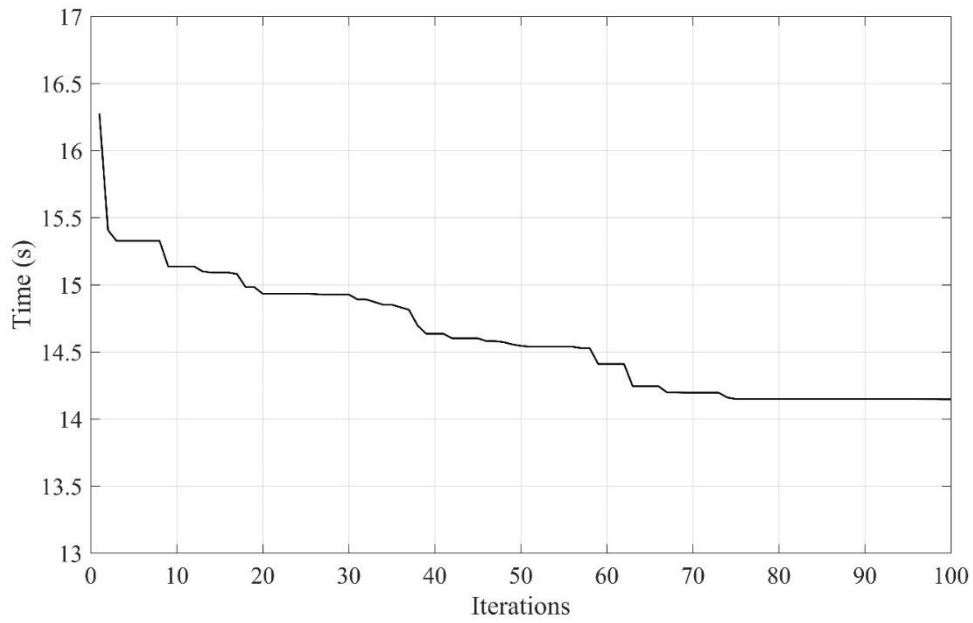
با وجود در نظر نگرفتن سرعت جرم جاذب در کنترل عملگر مغناطیسی و حذف تاثیر اندوکتانس خودی در این سیستم، عملگر مغناطیسی و کنترل کننده‌ی آن پاسخ مناسبی به مقدار نیروی تعیین شده از طرف کنترل کننده اصلی داده‌اند. حتی در صورت وجود عدم قطعیت در سیستم عملگر، کنترل کننده‌ی مود لغزشی میزان خطای کل سیستم را به خوبی جبران کرده و سیستم را به پاسخ مطلوب سوق می‌دهد. شکل ۴-۱۰ مقدار نیروی تعیین شده از سوی کنترل کننده‌ی فیدبک خطی ساز و پاسخ عملگر و کنترل کننده به آن را نمایش داده است.



شکل ۴-۱۰: پاسخ عملگر به ورودی مقدار مطلوب کنترل کننده اصلی

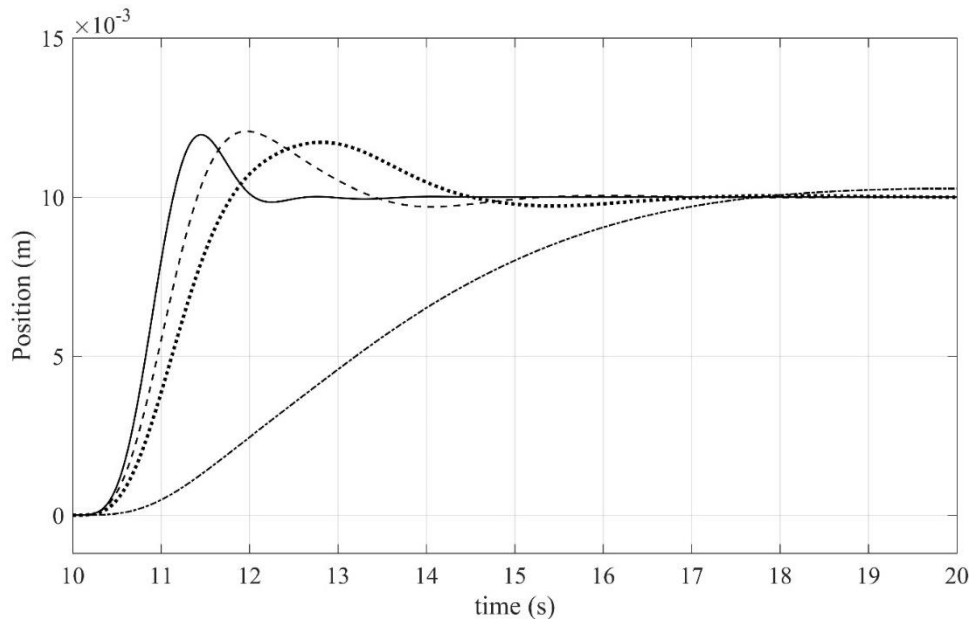
۴-۵- بهینه سازی ضرایب کنترل کنندها

ضرایب کنترل کننده فیدبک خطی ساز تعیین کننده عملکرد سیستم است. بهینه سازی این ضرایب با اهداف خاصی صورت می گیرد. برای بهینه سازی زمان نشست سیستم، از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است که می تواند با محاسبه زمان رسیدن به مقدار مطلوب و تغییر ضرایب کنترل کننده زمان نشست را به حداقل رساند. شکل ۴-۱۱ نشان می دهد که الگوریتم ازدحام ذرات زمان نشست سیستم با کنترل کننده فیدبک خطی ساز را کاهش می دهد.



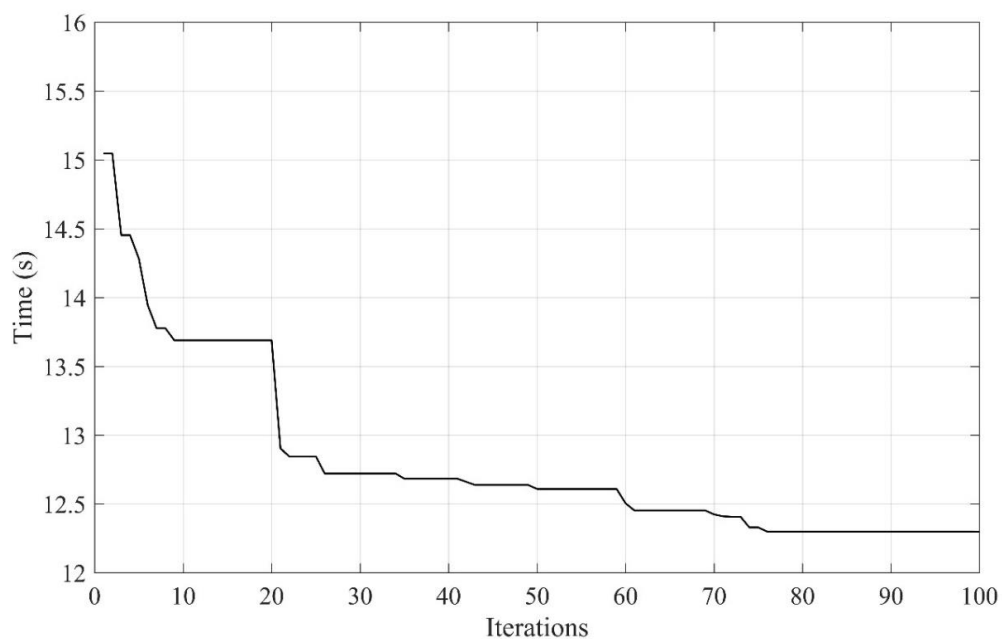
شکل ۴-۱۱: کاهش زمان نشست در کنترل کننده فیدبک خطی ساز با الگوریتم PSO

شکل ۴-۱۲: تاثیر تغییر ضرایب کنترل کننده فیدبک خطی ساز را برای ورودی پله برای چند نمونه از ورودی‌های الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد که باعث کاهش زمان نشست می‌شود.

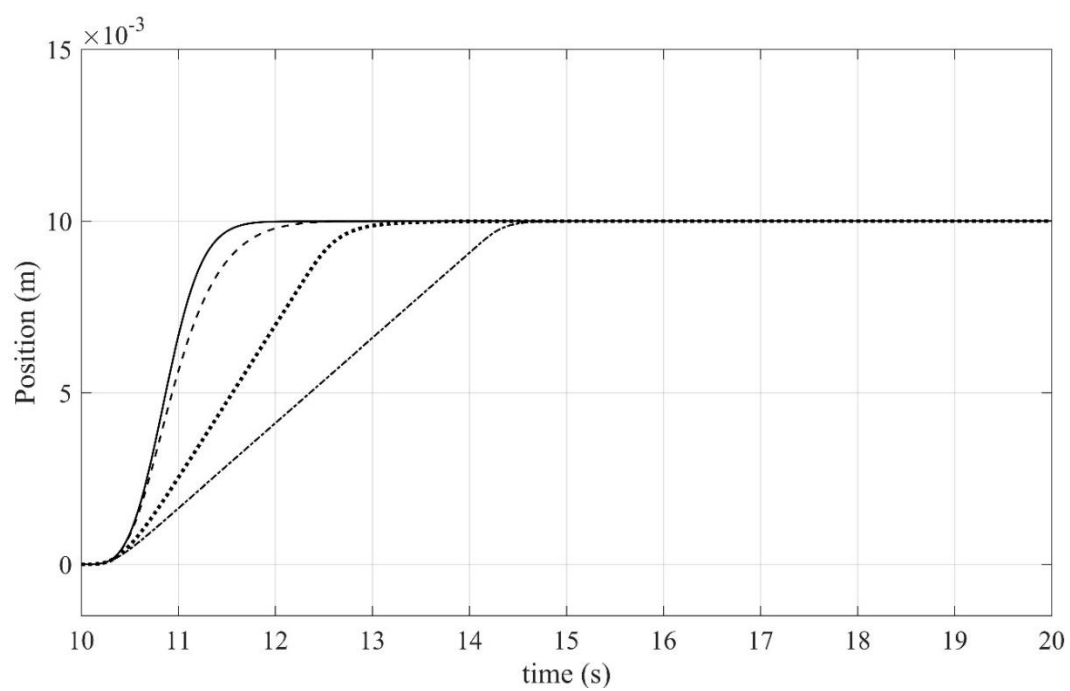


شکل ۴-۱۲: تاثیر تغییر ضرایب کنترل کننده فیدبک خطی ساز به کمک الگوریتم PSO

بهینه سازی ضریب کنترل کننده ی مود لغزشی نیز همانند بهینه سازی ضرایب فیدبک خطی ساز صورت می گیرد. شکل ۴-۱۳ کاهش خروجی الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می دهد و شکل ۴-۱۴ تاثیر تغییر ضریب مود لغزشی را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۳: کاهش زمان نشست در کنترل کننده مود لغزشی با الگوریتم PSO



شکل ۴-۱۴: تاثیر تغییر ضرایب کنترل کننده مود لغزشی به کمک الگوریتم PSO

فصل ۵ نتیجه گیری

۵-۱- بررسی خروجی‌های کنترلی

بررسی نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده‌ی فیدبک خطی ساز در صورت نبود عدم قطعیت پاسخ مناسب و سریعی به همراه خواهد داشت. اما در صورت وجود عدم قطعیت در مدل سیستم این کنترل کننده با خطا همراه بود و برای جبران خطا از روش‌های کنترل مقاوم باید استفاده کرد. روش مود لغزشی در صورت نبود عدم قطعیت، پاسخ بسیار سریع و مناسبی به ورودی پله می‌دهد. اما در صورت وجود عدم قطعیت در سیستم پاسخ این کنترل کننده کندتر می‌شود ولی برخلاف کنترل کننده فیدبک خطی ساز، خطای مود لغزشی صفر است.

بهینه‌سازی ضرایب کنترل کننده‌ها با هدف کاهش زمان نشست، سرعت و دقت پاسخگویی سیستم را افزایش می‌دهد. اما با توجه به غیرخطی بودن سیستم، اعمال ضریب بهینه می‌تواند باعث ناپایداری سیستم در تمامی پاسخ‌ها گردد. به همین دلیل برای یافتن ضرایب بهینه شده می‌بایست برای سخت‌ترین (با توجه به غیرخطی بودن سیستم) ورودی مطلوب پاسخ بهینه ضرایب را یافت.

۵-۲- تخمین‌گر نیروی اغتشاشی

تخمین‌گر نیروی اغتشاشی در صورت تغییرات کم، سرعت مناسبی را در شناسایی اغتشاش دارد. اما در صورت وجود نیروهای مشتق‌ناپذیر این تخمین‌گر با خطا همراه می‌شود. برای ورودی‌های مشتق‌ناپذیر نیز این تخمین‌گر با نوسانات زیادی همراه است اما به سرعت خطای تخمین را جبران می‌کند.

۵-۳- عملگر مغناطیسی

عملگر مغناطیسی ارائه شده می‌تواند نیروی کنترلی را به خوبی به سیستم اعمال نماید. برای کنترل عملگر نیاز به سرعت جرم جاذب است که با کاهش جریان سیم‌پیچ‌ها می‌توان از تاثیر قانون فارادی بر روی عملگر صرف نظر کرد.

۴-۵- پیشنهادات

- استفاده از روش‌های کنترلی دیگر نظیر کنترل تطبیقی
- استفاده از تخمین گرهای دیگر
- طراحی نوع دیگری از عملگر مغناطیسی
- تغییر دادن محل اعمال نیروی کنترلی
- بهینه سازی ضرایب تخمین گر
- توسعه دادن مدل به یک مدل واقعی



ISME2018-1339

بیست و ششمین همایش سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران

کنترل فعال سیستم جرم-فنر-دمپر شامل جاذب ارتعاشی و تخمین گر نیروی اغتشاشی

مسعود عبدالمحمدی^۱، حبیب احمدی^۲، سید مجتبی واردی کولایی^۳

دانشجوی کارشناسی ارشد، مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، masoud.abdol@gmail.com

هیات علمی دانشگاه صنعتی شاهرود، دینامیک و ارتعاشات، دانشگاه صنعتی شاهرود، habibahmadif@shahroodut.ac.ir

هیات علمی دانشگاه صنعتی شاهرود، دینامیک و ارتعاشات، دانشگاه صنعتی شاهرود، varedi@shahroodut.ac.ir

1-

در گذشته برای کاهش ارتعاشات وسایل نقلیه، از فنرهای تخت استفاده می‌کردند که امروزه نیز استفاده از این فنرها در خودروها مرسوم است. برای کاهش ارتعاشات از جاذب ارتعاشی نیز استفاده می‌شود که استفاده-ی آن در برچها و پلها مرسوم است، در این روش، انرژی ارتعاشات به جسم دوم منتقل می‌شود لذا دامنه‌ی ارتعاشات جسم اصلی کاهش می‌یابد. این کاهش دامنه در فرکانس‌های خاصی چشمگیرتر است. امروزه از روش‌های کنترلی برای کاهش ارتعاشات استفاده می‌گردد، در این روش به وسیله‌ی یک عملگر به جسم مرتعش نیرو وارد شده و مقدار این نیرو توسط کنترلر تنظیم می‌شود که ارتعاشات جسم را به میزان زیادی کاهش می‌دهد. در حال حاضر برای کاهش ارتعاشات از تلفیق روش‌های گفته‌شده استفاده می‌گردد.

یکی از روش‌های معمول کاهش ارتعاشات، استفاده از جاذب ارتعاشی می‌باشد. جاذب ارتعاشی در پلها، ساختمانها، دستگاهها و ماشین‌آلات صنعتی کاربرد دارد. [۱-۳] کنترل ارتعاشات به روش فعال نیز صورت می‌گیرد؛ بدین شکل که سیستم ارتعاشی مستقیماً به عملگر و سیستم کنترلی متصل می‌گردد و عملگر با اعمال نیرو بر جسم مرتعش، میزان ارتعاشات جسم و سیستم ارتعاشی را کنترل می‌کند. [۴] استفاده از جاذب ارتعاشی فعال که شکل پیچیده‌تری دارد از تلفیق دو روش ذکر شده انجام می‌پذیرد. ارتعاشات به وسیله‌ی جاذب ارتعاشی دریافت می‌گردد و عملگر به جاذب ارتعاشی متصل است، این روش نسبت به روش کنترل بدون جاذب، به عملگر کوچکتری نیاز دارد و کاهش ارتعاشات نیز بهتر محقق می‌شود. [۴-۶]

کارباخال و ناوارو روی کاهش ارتعاشات به وسیله جاذب ارتعاشی و کنترل به وسیله کنترل فیدبک خطی سازپژوهشی را در سال ۲۰۱۴ انجام دادند. [۶] تحقیقات انجام شده در این حوزه، فراوان می‌باشد که پارامترهای متفاوتی را در سیستم در نظر می‌گیرند و یا عملگر کنترلی را در مکان‌های مختلفی از سیستم قرار می‌دهند. [۵،۷]

روش‌های کنترلی مرسوم برای کنترل ارتعاشات شامل روش‌های خطی، مانند PID و همچنین شامل روش‌های غیرخطی، مانند فیدبک خطی‌ساز می‌باشد. باتوجه به اینکه تخمین پارامترهای این سیستم‌ها

چکیده

در این مقاله برای یک سیستم یک‌درجه آزادی غیرخطی با تحریک هارمونیک چند فرکانسی نامشخص، جاذب ارتعاشی غیر فعال ارائه شده است. سپس تابعی از نیروی اغتشاشی وارد شده به سیستم شامل خود نیرو و مشتقات اول و دوم آن تخمین زده می‌شود و به وسیله‌ی کنترلر فیدبک خطی‌ساز و کنترلر مود لغزشی که با اعمال نیرو به جسم جاذب، موقعیت این جسم کنترل می‌شود. یک سیستم جرم- فنر- دمپر با فنر غیرخطی به وسیله‌ی چند تحریک هارمونیک ناشناخته در چند فرکانس به ارتعاش درآمده است. برای کنترلر موقعیت این سیستم، مقدار تابعی از نیروی اغتشاشی و مشتقات آن در هر زمان مورد نیاز است. مقدار این تابع به وسیله‌ی مشاهده‌گر لیونبرگر تخمین زده و به وسیله‌ی کنترلر فیدبک خطی‌ساز و مود لغزشی موقعیت جرم سیستم اصلی کنترل می‌شود. نتایج تخمین گر با مقدار واقعی مقایسه شده و جاذب ارتعاشی فعال به وسیله‌ی کنترل فیدبک خطی‌ساز و کنترلر مقاوم مود لغزشی شبیه-سازی شده است.

کلیدواژگان

سیستم TMD، جاذب ارتعاشی فعال، مشاهده‌گر لیونبرگر، کنترلر فیدبک خطی‌ساز، کنترلر مود لغزشی.

مقدمه

کنترل ارتعاشات در بسیاری از موارد کاربرد دارد، در مواردی کاهش ارتعاشات و در موارد دیگری افزایش ارتعاشات، مورد نیاز است. کاهش ارتعاشات به روش‌های مختلفی انجام می‌گردد. از اولین روش‌های کاهش ارتعاشات، اتصال جسم مرتعش به جسم ثابت دیگر است که در واقع جرم سیستم ارتعاشی را افزایش می‌دهد و با تغییر فرکانس طبیعی سیستم از افزایش دامنه‌ی حرکت در فرکانس تحریک نزدیک به فرکانس طبیعی جلوگیری می‌کند. به منظور کاهش ارتعاشات از روش‌های متنوعی استفاده می‌شود که در طول زمان روش‌های جدیدتر با کاربردهای متفاوت به این روش‌ها اضافه شده است. از ابتدایی‌ترین روش‌های کاهش ارتعاشات، ایزوله کردن ارتعاشات، به وسیله‌ی فنر و دمپر می‌باشد، مثلاً

منبعها

- [1] E. Caetano, Á. Cunha, C. Moutinho, and F. Magalhães, "Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers," *Engineering Structures*, vol. 32, no. 4, pp. 1082-1091, 2010.
- [2] X. Chen and A. Kareem, "Efficacy of tuned mass dampers for bridge flutter control," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, no. 10, pp. 1291-1300, 2003.
- [3] P. Bonello, "Adaptive tuned vibration absorbers: Design principles, concepts and physical implementation," in *Vibration Analysis and Control-New Trends and Developments*: InTech, 2011.
- [4] J. B. Hunt and J.-C. Nissen, "The broadband dynamic vibration absorber," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 83, pp. 573-578, 1982.
- [5] M. Cartmell, *Introduction to linear, parametric, and nonlinear vibrations*. Chapman and Hall, 1990.
- [6] F. Sadek, B. Mohraz, A. W. Taylor, and R. M. Chung, "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 26, no. 6, pp. 617-635, 1997.
- [7] A. H. Nayfeh and D. T. Mook, *Nonlinear oscillations*. John Wiley & Sons, 2008.
- [8] T. Taniguchi, A. Der Kiureghian, and M. Melkumyan, "Effect of tuned mass damper on displacement demand of base-isolated structures," *Engineering Structures*, vol. 30, no. 12, pp. 3478-3488, 2008.
- [9] J. Ji and N. Zhang, "Suppression of the primary resonance vibrations of a forced nonlinear system using a dynamic vibration absorber," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, no. 11, pp. 2044-2056, 2010.
- [10] S. Chatterjee, "On the efficacy of an active absorber with internal state feedback for controlling self-excited oscillations," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, no. 7, pp. 1285-1299, 2011.
- [11] A. Baz, "A neural observer for dynamic systems," *Journal of sound and vibration*, vol. 152, no. 2, pp. 227-243, 1992.
- [12] J.-S. Bae, J.-H. Hwang, J.-H. Roh, J.-H. Kim, M.-S. Yi, and J. H. Lim, "Vibration suppression of a cantilever beam using magnetically tuned-mass-damper," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, no. 26, pp. 5669-5684, 2012.
- [13] E. El Behady and E. El-Zahar, "Vibration reduction and stability study of a dynamical system under multi-excitation forces via active absorber," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 7, no. 48, pp. 6203-6209, 2013.
- [14] F. Beltran-Carbajal and G. Silva-Navarro, "Active vibration control in Duffing mechanical systems using dynamic vibration absorbers," *Journal of sound and vibration*, vol. 333, no. 14, pp. 3019-3030, 2014.
- [15] T. Bailey and J. E. Hubbard, "Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 8, no. 5, pp. 605-611, 1985.

- [16] R. Zhang and C. Tong, "Torsional vibration control of the main drive system of a rolling mill based on an extended state observer and linear quadratic control," *Journal of Vibration and Control*, vol. 12, no. 3, pp. 313-327, 2006.
- [17] F. Beltrán - Carbajal and G. Silva - Navarro, "Adaptive - Like Vibration Control in Mechanical Systems with Unknown Parameters and Signals," *Asian Journal of Control*, vol. 15, no. 6, pp. 1613-1626, 2013.
- [18] N. Al-Holou, T. Lahdhiri, D. S. Joo, J. Weaver, and F. Al-Abbas, "Sliding mode neural network inference fuzzy logic control for active suspension systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 234-246, 2002.
- [19] Z. Xianmin, S. Changjian, and A. G. Erdman, "Active vibration controller design and comparison study of flexible linkage mechanism systems," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 37, no. 9, pp. 985-997, 2002.
- [20] S.-B. Choi and Y.-M. Han, "Vibration control of electrorheological seat suspension with human-body model using sliding mode control," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 303, no. 1-2, pp. 391-404, 2007.
- [21] C. Hansen, S. Snyder, X. Qiu, L. Brooks, and D. Moreau, *Active control of noise and vibration*. CRC press, 2012.
- [22] S. Thenozhi and W. Yu, "Stability analysis of active vibration control of building structures using PD/PID control," *Engineering Structures*, vol. 81, pp. 208-218, 2014.
- [23] Y. Pi and H. Ouyang, "Vibration control of beams subjected to a moving mass using a successively combined control method," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, no. 5-6, pp. 4002-4015, 2016.
- [24] D. Howe, "Magnetic actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 81, no. 1-3, pp. 268-274, 2000.
- [25] N. Mikhaeil-Boules, "Design and analysis of linear actuator for active vibration cancellation," in *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95., Conference Record of the 1995 IEEE*, 1995, vol. 1, pp. 469-475: IEEE.
- [26] S.-M. Jang, J.-Y. Choi, S.-H. Lee, H.-W. Cho, and W.-B. Jang, "Analysis and experimental verification of moving-magnet linear actuator with cylindrical Halbach array," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 40, no. 4, pp. 2068-2070, 2004.
- [27] S. Evans, I. Smith, and J. Kettleborough, "Permanent-magnet linear actuator for static and reciprocating short-stroke electromechanical systems," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 6, no. 1, pp. 36-42, 2001.
- [28] Q. Li, F. Ding, and C. Wang, "Novel bidirectional linear actuator for electrohydraulic valves," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 41, no. 6, pp. 2199-2201, 2005.
- [29] J. Kim and J. Chang, "A new electromagnetic linear actuator for quick latching," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1849-1852, 2007.
- [30] A. E. Rundell, S. V. Drakunov, and R. A. DeCarlo, "A sliding mode observer and controller for stabilization of rotational motion of a vertical shaft magnetic bearing," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 598-608, 1996.
- [31] C. Van Lierop, J. Jansen, A. Damen, E. Lomonova, P. Van den Bosch, and A. Vandenput, "Model-based commutation of a long-stroke magnetically levitated linear actuator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 6, pp. 1982-1990, 2009.

-
- [32] H. Guckel, T. Earles, J. Klein, J. Zook, and T. Ohnstein, "Electromagnetic linear actuators with inductive position sensing," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 53, no. 1-3, pp. 386-391, 1996.
- [33] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*. Pearson Education India, 1989.

Abstract

In this study, an active vibration absorber is utilized for a nonlinear 1 DOF system with unknown multi harmonic frequency disturbance. At first, we estimate a function of disturbance force consist of itself and first and second derivative of that. Then the position of the main system is controlled by feedback linearization and sliding mode controllers. For applying of controller force, a magnetic actuator is used which is controlled by a sub controller. Liunberger observer estimates force function value and by means of this estimation the feedback linearization and sliding mode controller regulate position of main system. Controller's coefficients are obtained by particle swarm optimization algorithm (PSO) to minimize settling time and errors. Magnetic actuators are designed by Faraday and Lorentz law for applying the controlling force to system. Simulation results of observer is compared to real value and the results show the proper effective of active vibration absorber on vibration suppression. The optimization of controller coefficient show the improvement of settling time and error.

Keywords: Active vibration absorber, Liunberger observer, Feedback linearization controller, Sliding mode controller, Magnetic actuators, Particle swarm optimization algorithm.



**Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical & Mechatronic Engineering**

M.Sc Thesis in Mechatronics Engineering

Using a Magnetic Actuator for Active Control of a Mass-Spring-Damper System including a Vibrating Absorber

By: Masoud Abdolmohammadi

Supervisors

Habib Ahmadi

Seyed Mojtaba Varedikolaie

Advisor

Javad Ghalibafan

September 2018