

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک

گروه مهندسی برق کنترل

کنترل فازی امپدانس یک سیستم تعلیق مغناطیسی

دانشجو : محمد محسن نیشابوری

اساتید راهنما :

آقای دکتر محمد مهدی فاتح

آقای دکتر محمد علی صدرنیا

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۰۹۳۰/آ.ت.ب

تاریخ: ۹۰/۱۱/۱۶

ویرایش: -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:

محمدحسن نیشابوری رشته: برق گرایش: کنترل

تحت عنوان: کنترل فازی امیدانس یک سیستم تعلیق مغناطیسی

که در تاریخ ۹۰/۱۱/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: خوب امتیاز: ۱۶) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد استادیار	۱- محمد مهدی باقر ۲- محمد علی محمدی	۱- استاد راهنما دوم
	—	—	۲- استاد مشاور
	استادیار	امیر حسن زاده	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	حسن علی زاده	۴- استاد امتحن
	استادیار	علی اکبر زاده	۵- استاد امتحن

رئیس دانشکده:

با تشکر از استاد گرامی

جناب آقای دکتر فاتح

تعهد نامه

اینجانب **محمدحسن شهبازی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق** دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

کنترل فازی امپدانس یک سیستم تعلیق صنعتی

تحت راهنمایی آقای دکتر **محمود مهدی ناصح** متعهد می شوم :

آقای دکتر محمود مهدی ناصح

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 صنعتی شاهرود می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضاء دانشجو

۹۰/۱۱/۱۶

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

تعليق مغناطیسی روشی است که به وسیله آن می‌توان اشیا را بدون هیچ‌گونه نگهدارنده‌ای درون میدان مغناطیسی معلق نگه داشت. از جمله مزایای این سیستم‌ها می‌توان به عدم هرگونه تماس مکانیکی، آلودگی صوتی پایین و توانایی عملکرد در محیط‌های خلا اشاره کرد. این سیستم‌ها اهمیت زیادی در کاربردهای مهندسی از قبیل قطارهای مسافربری فوق سریع، جابجایی کالاها و تجهیزات بدون تماس، از بین بردن لرزش ماشین‌های حساس و مدل تعلیق تونل‌های باد دارند. این سیستم‌ها کاملاً غیر خطی و به طور طبیعی ناپایدارند، بنابراین وجود یک کنترل‌کننده با عملکرد مناسب برای تنظیم فاصله جسم معلق بسیار مهم می‌باشد. در این پایان‌نامه سیستم تعلیق قطار مغناطیسی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ابتدا مدل سیستم تعلیق معرفی می‌شود. سپس این مدل را به فرم همراه یا متعارفی کنترل پذیری تبدیل خواهیم کرد. عدم قطعیت مورد بحث بر روی سیستم تعلیق، جرم قطار می‌باشد که در هنگام پیاده و سوار کردن بارهای سنگین و یا مسافری متغیر خواهد بود. کنترل‌کننده فازی امپدانس، جهت تنظیم فاصله قطار با ریل به کار رفته است. کنترل امپدانس یک روش کنترل نیرو-موقعیت بوده که هدف آن تعیین دقیق موقعیت و تعیین دقیق نیرو نیست، بلکه هدف آن تنظیم رابطه دینامیکی بین حرکت و نیرو است. در حقیقت قانون امپدانس تعیین‌کننده مسیر مطلوب تغییر مکان عمودی قطار با توجه به اغتشاش ناشی از تغییرات جرم می‌باشد. کنترل‌کننده موقعیت فازی نیز موجبات ردگیری مسیر تعیین شده توسط قانون امپدانس را فراهم می‌آورد. سپس یک کنترل‌کننده مود لغزشی به صورت جداگانه بر روی سیستم تعلیق پیاده شده است. در نهایت سیستم تعلیق با هر یک از کنترل‌کننده‌های فازی امپدانس و مود لغزشی شبیه‌سازی گردیده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد پاسخ سیستم به کنترل کننده فازی امپدانس خطای حالت دائم بسیار کمتری در مقایسه با پاسخ کنترل کننده مود لغزشی داراست. اما کنترل کننده مود لغزشی زمان نشست کمتری را موجب می‌شود. بنابراین با توجه به کاربرد سیستم تعلیق مغناطیسی و میزان اهمیت پارامترهای مختلف سیستم مورد نظر (میزان خطای حالت ماندگار و زمان نشست)، می‌توان کنترل کننده مطلوب برای هر سیستم را انتخاب کرد.

کلمات کلیدی: تعلیق مغناطیسی، کنترل امپدانس، کنترل فازی، کنترل مود لغزشی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ سیستم تعلیق مغناطیسی.....	۲
۲-۱ قطار مغناطیسی.....	۳
۳-۱ مروری بر روش های کنترل سیستم تعلیق مغناطیسی.....	۷
۴-۱ طرح کلی پایان نامه.....	۹
فصل دوم: کنترل امپدانس.....	۱۰
۱-۲ معرفی کنترل امپدانس.....	۱۱
۲-۲ کاربردهای کنترل امپدانس.....	۱۲
۳-۲ خطی سازی فیدبکی.....	۱۳
فصل سوم: کنترل مود لغزشی.....	۱۷
۱-۳ اصول اساسی کنترل لغزشی.....	۱۸
فصل چهارم: مدل سازی سیستم کنترل.....	۲۲
۱-۴ مدل سیستم تعلیق مغناطیسی.....	۲۳
۲-۴ سیستم کنترل.....	۲۷
۳-۴ کنترل نیرو.....	۲۷
۴-۴ کنترل امپدانس.....	۲۹

۳۲.....۵-۴ سنسورهای موردنیاز.....

۳۳.....۶-۴ کنترل مود لغزشی.....

۳۵.....فصل پنجم: عملکرد سیستم و نتایج.....

۳۶.....۱-۵ مشخصات سیستم.....

۳۶.....۲-۵ نتایج شبیه سازی.....

۴۸.....فصل ششم: نتیجه گیری.....

۴۹.....۱-۶ نتیجه گیری.....

۵۰.....مراجع.....

فهرست شکل‌ها

فصل اول

- شکل (۱-۱) نمونه آزمایشگاهی یک سیستم تعلیق مغناطیسی..... ۲
- شکل (۲-۱) اولین قطار مغناطیسی تجاری جهان..... ۴
- شکل (۳-۱) تعلیق الکترومغناطیسی..... ۵
- شکل (۴-۱) تعلیق الکترودینامیکی..... ۶
- شکل (۵-۱) تعلیق الکترومغناطیس هیبریدی..... ۷

فصل چهارم

- شکل (۱-۴) نمایی از سیستم تعلیق قطار مغناطیسی..... ۲۳
- شکل (۲-۴) ساختار سیستم کنترل..... ۲۹
- شکل (۳-۴) گروه‌های فازی برای ورودی‌ها..... ۳۱
- شکل (۴-۴) گروه‌های فازی برای خروجی‌ها..... ۳۲
- شکل (۵-۴) نمودار قوانین فازی در فضای کنترل..... ۳۲

فصل پنجم

- شکل (۱-۵) نمودار پیاده‌سازی شده در محیط سیمولینک..... ۳۷
- شکل (۲-۵) سیگنال خطای موقعیت و خطای مطلوب برای $m=11.87g$ ۳۸

شکل (۳-۵) سیگنال خطای موقعیت و خطای مطلوب برای $m=11.87g+25\%$ ۳۹

شکل (۴-۵) سیگنال خطای موقعیت و خطای مطلوب برای $m=11.87g-25\%$ ۴۰

شکل (۵-۵) سیگنال‌های خروجی کنترل‌کننده فازی و جریان سیم‌پیچ برای $m=11.87g$ ۴۱

شکل (۶-۵) سیگنال‌های خروجی کنترل‌کننده فازی و جریان سیم‌پیچ برای

..... $m=11.87g+25\%$ ۴۲

شکل (۷-۵) سیگنال‌های خروجی کنترل‌کننده فازی و جریان سیم‌پیچ برای

..... $m=11.87g-25\%$ ۴۳

شکل (۸-۵) مقایسه پاسخ کنترل‌کننده های فازی امپدانس و مود لغزشی برای

..... $m=11.87g$ ۴۴

شکل (۹-۵) مقایسه پاسخ کنترل‌کننده های فازی امپدانس و مود لغزشی برای

..... $m=11.87g+25\%$ ۴۵

شکل (۱۰-۵) مقایسه پاسخ کنترل‌کننده های فازی امپدانس و مود لغزشی برای

..... $m=11.87g-25\%$ ۴۶

فهرست جدول ها

فصل چهارم

جدول (۱-۴) قوانین فازی.....۳۱

فصل پنجم

جدول (۱-۵) مقایسه نتایج دو کنترل کننده.....۴۷

فصل اول

مقدمه

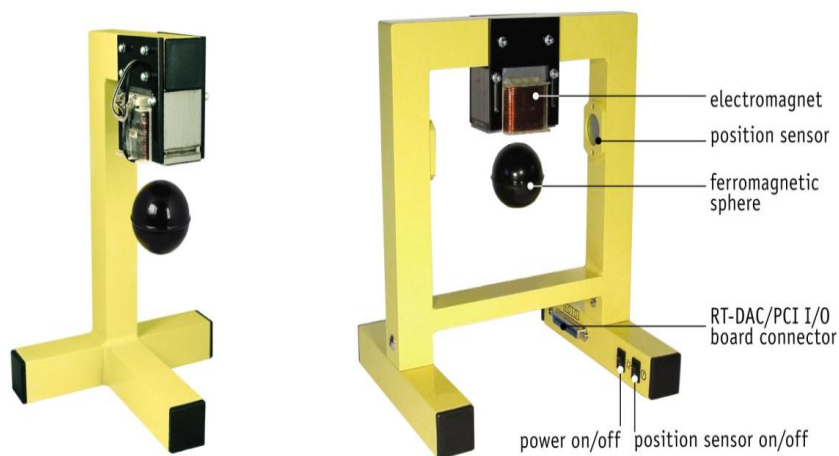
✓ سیستم تعلیق مغناطیسی

✓ قطار مغناطیسی

✓ مروری بر روش‌های کنترل سیستم تعلیق مغناطیسی

۱-۱ سیستم تعلیق مغناطیسی:

تعلیق مغناطیسی روشی است که به وسیله آن می‌توان اشیا را بدون هیچ‌گونه نگهدارنده‌ای درون میدان مغناطیسی معلق نگه داشت [۱] (شکل (۱-۱)). از جمله مزایای این سیستم‌ها می‌توان به عدم هرگونه تماس مکانیکی، آلودگی صوتی پایین و توانایی عملکرد در محیط‌های خلا اشاره کرد [۲]. این سیستم‌ها اهمیت زیادی در کاربردهای مهندسی از قبیل قطارهای مسافربری فوق سریع، جابجایی کالاها و تجهیزات بدون تماس، از بین بردن لرزش ماشین‌های حساس و مدل تعلیق تونل‌های باد دارند [۳].



شکل (۱-۱) نمونه آزمایشگاهی یک سیستم تعلیق مغناطیسی

این سیستم‌ها کاملاً غیر خطی و به طور طبیعی ناپایدارند [۱]. بنابراین وجود یک کنترل‌کننده با عملکرد مناسب برای تنظیم فاصله جسم معلق بسیار مهم می‌باشد [۳].

۱-۲-۱ قطار مغناطیسی^۱:

در این پایان نامه سیستم تعلیق مغناطیسی قطار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از این رو مطالبی پیرامون این گونه قطارها ارائه می‌گردد.

۱-۲-۱ تاریخچه

قطار مغناطیسی نوع جدیدی از حمل و نقل ریلی است. مطالعات بر روی قطارهای مغناطیسی در سال ۱۹۶۲ هنگامی آغاز شد که دولتمردان ژاپن تصمیم گرفتند طی تحقیقاتی قابلیت ساخت قطارهای فوق سریع مغناطیسی را بررسی کنند. اولین نمونه موفق از قطارهای مغناطیسی در سال ۱۹۷۲ ساخته شد. این قطارها توسط موسسه تحقیقات راه‌آهن ملی ژاپن با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت آزمایش شد. در سال ۱۹۷۷ خط‌آهن آزمایشی ۷ کیلومتری در میازاکی^۲ ژاپن ساخته شد. دو سال بعد رکورد سرعت ۵۱۷ کیلومتر بر ساعت توسط این قطارها به ثبت رسید. بصورت موازی پیشرفت‌هایی در کشورهای نظیر آمریکا، انگلیس، چین و آلمان شکل گرفت. اولین قطار مغناطیسی تجاری جهان، که نمایی از آن در شکل (۱-۲) دیده می‌شود، سال ۲۰۰۲ در مسیر فرودگاه شانگهای^۳ چین به طول ۳۰ کیلومتر راه‌اندازی گردیده که حداکثر سرعت آن ۴۳۱ کیلومتر بر ساعت می‌باشد [۴].

¹ The magnetic levitation (maglev) train

² Miyazaki

³ Shanghai



شکل (۲-۱) اولین قطار مغناطیسی تجاری جهان، شانگهای - چین [۴]

۲-۲-۱ انواع سیستم تعلیق قطارهای مغناطیسی

به طور معمول سه نوع سیستم تعلیق موجود است [۵]:

الف) تعلیق الکترومغناطیسی (EMS)

Electro Magnetic Suspension

ب) تعلیق الکترودینامیکی (EDS)

Electro Dynamic Suspension

ج) تعلیق الکترومغناطیس هیبریدی (HEMS)

Hybrid Electro Magnetic Suspension

که به شرح مختصر هر یک می پردازیم.

الف) تعلیق الکترومغناطیسی (EMS)

این روش بر مبنای نیروی جاذبه مغناطیسی بین ریل و آهنربای الکتریکی روی قطار عمل می کند.

این روش اساساً ناپایدار است. اگرچه به لحاظ فنی EMS از EDS آسان تر بوده و می تواند در سرعت صفر هم

به حالت تعلیق باقی بماند (چیزی که در EDS امکان پذیر نیست). (شکل (۳-۱))

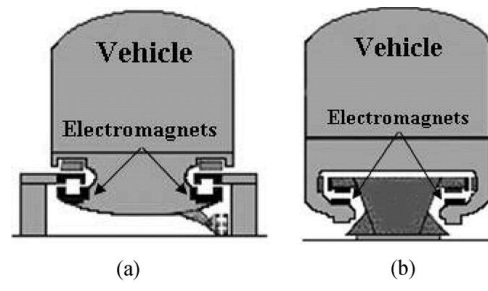
دو نوع تکنولوژی تعلیق در EMS موجود است:

۱- سیستم تعلیق و رانش یک پارچه^۱، مانند قطارهای UTM کره و HSST ژاپن

۲- سیستم تعلیق و رانش مجزا^۲، مانند قطار Transrapid آلمان

سیستم اول جهت سرعت و هزینه پایین تر مناسب است، به این دلیل که تعداد آهنرباهای الکتریکی و کنترل کننده ها کاهش می یابند.

سیستم دوم برای عملکرد در سرعت های بالا مناسب تر است، به این دلیل که تعلیق و رانش تداخلی با هم ندارند اما تعداد کنترل کننده ها افزایش می یابد.



شکل (۳-۱) تعلیق الکترومغناطیسی. (a) تعلیق و رانش یک پارچه (b) تعلیق و رانش مجزا [۵]

(ب) تعلیق الکترومغناطیسی (EDS)

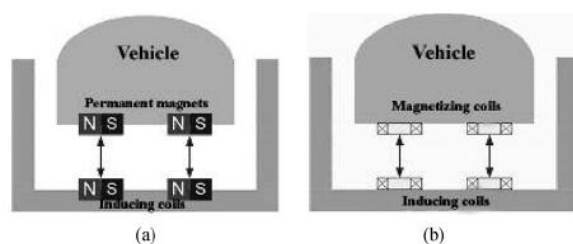
در حالیکه تعلیق الکترومغناطیسی از نیروی جاذبه استفاده می کند، تعلیق الکترومغناطیسی از نیروی دافعه بهره می برد. در این روش ریل ها دارای سیم پیچ القایی بوده که وقتی قطار به حرکت درمی آید، حرکت مغناطیس های روی قطار باعث بوجود آمدن جریان القایی در سیم پیچ های ریل شده و این جریان میدان مغناطیسی دیگری ایجاد می کند. نیروی دافعه بین این میدان و مغناطیس های قطار موجب معلق شدن قطار می شود. EDS از نظر مغناطیسی بسیار پایدار بوده و نیازی به کنترل فاصله هوایی ندارد. بنابراین برای

¹ integrated

² separated

استفاده در بارهای متغیر بسیار قابل اطمینان می‌باشد و در نتیجه در کاربردهای باربری با سرعت بالا مناسب است. البته این سیستم نیازمند به سرعت مناسب برای ایجاد جریان القایی کافی در سیم‌پیچ‌های ریل می‌باشد، بنابراین چرخ‌هایی شبیه تایر لاستیکی در سرعت‌های کمتر از یک میزان مشخص (حدود ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت) بکار می‌روند.

از لحاظ مغناطیسی EDS به دو نوع مغناطیس دائم^۱ و مغناطیس ابررسانا^۲ تقسیم می‌شود. در نوع PM ساختار بسیار ساده است، به این دلیل که نیازی به منبع تغذیه الکتریکی ندارد. اگرچه این نوع تنها برای سیستم‌های کوچک قابل استفاده است و این تنها به خاطر نبود مغناطیس دائم‌هایی با توان بالاست. در نوع SCM علاوه بر ساختار پیچیده با مشکل خنک کردن و تبخیر مایع هلیوم که برای خنک کردن حرارت تولید شده ناشی از جریان‌های القایی ابررساناها بکار می‌رود، روبرو هستیم. (شکل (۴-۱))



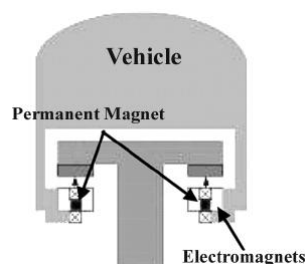
شکل (۴-۱) تعلیق الکترودینامیکی. (a) بکارگیری مغناطیس‌های دائم. (b) بکارگیری مغناطیس‌های ابررسانا [۵]

ج) تعلیق الکترومغناطیس هیبریدی (HEMS)

برای کاهش مصرف توان الکتریکی در EMS، همانگونه که در شکل (۵-۱) دیده می‌شود، علاوه بر آهنرباهای الکتریکی، مغناطیس‌های دائمی به کار می‌روند. در یک فاصله هوایی معین در حالت ماندگار، میدان مغناطیسی ناشی از مغناطیس‌های دائم به تنهایی قادر به نگهداشتن قطار می‌باشند و توان الکتریکی برای الکترومغناطیس‌ها که فاصله هوایی را کنترل می‌کنند می‌تواند تقریباً صفر باشد.

¹ Permanent Magnet(PM)

² Super Conducting Magnet(SCM)



شکل (۵-۱) تعلیق الکترومغناطیس هیبریدی [۵]

۳-۱ مروری بر روش‌های کنترل سیستم تعلیق مغناطیسی

فن‌آوری کنترل سیستم تعلیق مغناطیسی یکی از فن‌آوری‌های کلیدی قطارهای مغناطیسی از نوع تعلیق الکترومغناطیس می‌باشد [۶]. در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری جهت کنترل سیستم‌های تعلیق مغناطیسی در مقالات گزارش شده است. طراحی یک کنترل‌کننده PID برای سیستم ناپایدار یک-ورودی/یک-خروجی تعلیق مغناطیسی در فضای فرکانس^۱ به‌گونه‌ای صورت گرفته که حاشیه فاز مطلوب^۲ تامین گردد [۷]. کنترل‌کننده‌ای بر پایه خطی سازی فیدبکی و رویکرد حالت توسعه‌یافته^۳ طراحی شده، بطوریکه اغتشاش خارجی توسط رویکرد مشاهده شده و پس از آن سیستم خطی حلقه بسته با مقدار رویت شده، جبران گردیده است [۶]. هنگامی که کنترل‌کننده PID خطی به سیستم تعلیق مغناطیسی اعمال شود، مشکل عمده در تضاد بین سختی^۴ و عملکرد^۵ سیستم می‌باشد. بطوریکه راه حل عمومی کنترل PID خطی جهت تامین سختی، افزایش بهره پسخور تناسبی^۶ بوده که این رویکرد باعث عملکرد نامناسب و حتی ناپایداری سیستم خواهد شد. برای غلبه بر تضاد بین سختی و عملکرد سیستم روشی با نام کنترل PID غیر خطی معرفی شده است. این روش مزایای کنترل مقاوم^۷ و تنظیم آسان^۸ را همزمان دارا می‌باشد و بر روی سیستم تعلیق مغناطیسی پیاده سازی گردیده است [۸]. کنترل مود لغزشی جهت تنظیم فاصله جسم معلق

¹ Frequency domain

² Desired phase margin

³ Extended state observer

⁴ Stiffness

⁵ Performance

⁶ Proportion feedback

⁷ Robust control

⁸ Easy tuning

درون میدان مغناطیسی در حضور اغتشاش به کار رفته است. همانگونه که در دیگر کنترل کننده‌های ساختار متغیر^۱ هم شاهد هستیم، این کنترل کننده نیز با پدیده لرزش کنترل^۲ مواجه بوده که برای رفع این مشکل، کنترل مود لغزشی دینامیک^۳ و دینامیک اصلاح شده^۴ معرفی شده و نتایج خوبی ارائه شده است [۳]. یک کنترل کننده فازی ساده جهت کنترل سیستم تعلیق MIMO استفاده شده است. در واقع این سیستم توسط چهار کنترل کننده دو-ورودی / یک-خروجی و بدون حضور اغتشاش کنترل گردیده است [۹]. فاصله هوایی جسم معلق در سیستم تعلیق مغناطیسی به روش فازی-عصبی نیز تنظیم شده است. ابتدا سیستم تعلیق با تکنیک‌های فازی-عصبی جهت دستیابی به سیستم فازی خطی^۵ T-S مدل گردیده، سپس کنترل کننده فازی بهینه خطی^۶ جهت تنظیم سیستم فیزیکی بکار رفته است [۱]. رویکرد جدیدی در بکارگیری روش QFT^۷ جهت طراحی یک کنترل کننده مقاوم با دو درجه آزادی برای سیستم تعلیق مغناطیسی بکار گرفته شده است [۳]. نتایج آزمایشگاهی نیز جهت بررسی قابلیت اطمینان^۸ و مقاوم بودن^۹ سیستم کنترل طراحی شده در مقابل اغتشاش ارائه گردیده است. کنترل کننده خود تنظیم^{۱۰} برای سیستم تعلیق مغناطیسی با تغییرات بار نامشخص پیشنهاد شده است [۱۰].

اما تا کنون روش کنترل امپدانس جهت تنظیم فاصله جسم معلق درون میدان مغناطیسی بکار نرفته است. هدف از پیاده‌سازی این روش بر روی سیستم تعلیق تعیین یک رفتار دینامیکی مطلوب برای جسم معلق می‌باشد، به طوری که در هنگام بروز اختلال جرمی (مثلاً تغییر جرم قطار در هنگام پیاده و سوار شدن مسافران و یا قراردادن بارهای سنگین)، جسم مورد نظر دینامیک مطلوب تعیین شده را ردگیری کند.

¹ Variable structure

² Chattering

³ Dynamic sliding mode

⁴ Modified dynamic sliding mode

⁵ Takagi-Sugeno

⁶ Linear-type optimal fuzzy

⁷ Quantitative feedback theory

⁸ Reliability

⁹ Robustness

¹⁰ Self-tuning

۴-۱ طرح کلی پایان نامه

فصل دوم به بیان تاریخچه و هدف کنترل امپدانس خواهد پرداخت.

فصل سوم به موضوع کنترل مود لغزشی می پردازد، به این دلیل که بنا داریم مقایسه ای بین کنترل امپدانس و کنترل مود لغزشی داشته باشیم. در این فصل ابتدا مقدمه ای بر کنترل مود لغزشی خواهیم داشت، سپس این روش را بر روی سیستم تعلیق مغناطیسی مورد بحث اعمال خواهیم نمود.

فصل چهارم معادلات دینامیکی سیستم را معرفی خواهد کرد و روش کنترل فازی امپدانس پیشنهادی شرح داده خواهد شد.

فصل پنجم دو کنترل کننده فازی امپدانس پیشنهادی و مود لغزشی را به طور جداگانه بر روی سیستم تعلیق مورد مطالعه اعمال کرده و توسط جعبه ابزار شبیه ساز^۱ نرم افزار متلب^۲ شبیه سازی شده و نتایج آن ها را به صورت مقایسه ای ارائه نموده است.

^۱ Simulink

^۲ Matlab

فصل دوم

کنترل امیدانس

✓ معرفی کنترل امیدانس

✓ کاربردهای کنترل امیدانس

۲-۱ معرفی کنترل امپدانس

در این فصل یک روش کنترل نیرو-موقعیت به نام کنترل امپدانس معرفی می‌شود. هدف کنترل امپدانس تعیین دقیق موقعیت و مسیر حرکت و تعیین دقیق نیرو نیست، بلکه هدف آن تنظیم رابطه دینامیکی بین حرکت و نیرو است. به عبارت دیگر کنترل امپدانس همان تنظیم امپدانس مکانیکی سیستم است. با استفاده از دوگان‌های برق-مکانیک که نیرو را با ولتاژ، و سرعت را با جریان متناظر می‌کند، نسبت نیرو به سرعت (گشتاور به سرعت زاویه ای)، به امپدانس مکانیکی سیستم تعبیر می‌شود که در حوزه فرکانس بوسیله رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{F(s)}{V(s)} = Z(s) \quad (2-1)$$

که در آن $F(s)$ ، $V(s)$ و $Z(s)$ به ترتیب تبدیل لاپلاس‌های نیرو، سرعت و امپدانس می‌باشند.

می‌توان این رابطه را بر حسب موقعیت $X(s)$ نیز نوشت:

$$\frac{F(s)}{X(s)} = sZ(s) \quad (2-2)$$

رفتار دینامیکی مطلوب توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F \quad (2-3)$$

که در آن ماتریس‌های M ، B ، K به ترتیب لختی، میرایی و سختی را نشان می‌دهند. معادلات امپدانس به شکل کاملتر در [۱۱] آمده است.

طبق نظریه هوگان ایده اصلی کنترل امپدانس، اجرای رفتار دینامیکی از پیش تعیین شده برای ربات است. با توجه به اینکه ربات متاثر از تداخل با محیط است، این عملکرد با دینامیک عمومی سیستم جرم و فنر نمایش داده می شود. از ویژگی های کنترل امپدانس می توان به سادگی و مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت پارامتری اشاره کرد، اما معمولاً تاکید بر حرکات تقریباً آرام دارد [۱۲]. به منظور تغییر رفتار دینامیکی مطلوب در هنگام انجام کار، در شرایطی که رفتار دینامیکی سیستم در تماس با محیط تغییر کرده است و در مهار عدم قطعیت ها استفاده از کنترل کننده فازی برای تنظیم رفتار دینامیکی مطلوب پیشنهاد می شود [۱۳].

۲-۲ کاربردهای کنترل امپدانس

کنترل امپدانس در فضای دکارتی برای مفاصل دارای انعطاف که معمولاً با عدم قطعیت روبرو هستیم، اجرا شده است [۱۴]. از مهارت کارگر ماهر در انجام کار آسیاب کاری و خرد کردن استفاده می شود و پس از ضبط اطلاعات مربوط، به انجام آن توسط ربات با روش کنترل امپدانس می پردازد [۱۵]. در ربات شبه آدم که برای طراحی و ترسیم ابداع شده است از کنترل امپدانس به طور موثری استفاده شده است. به خاطر طبیعت کار طراحی لازم است موقعیت قلم همیشه روی کاغذ قرار گیرد و در صورت تغییر موقعیت کاغذ و قلم، کاغذ پاره و یا اثر قلم محو نشود [۱۶]. روش کنترل مقاوم امپدانس برپایه کنترل مود لغزشی در بردن اجسام ارائه شده است [۱۷]. کنترل امپدانس به منظور جاسازی میله در سوراخ برای کارهای مونتاژکاری پیشنهاد شده است [۱۸]. کنترل امپدانس روی ربات، برای مونتاژکاری روی اجسام با سرعت بالا، پیاده سازی شده است [۱۹]. تحلیل دینامیکی ربات در یک ماهواره به منظور گرفتن اجسام صلب غیر همگن انجام شده است [۲۰].

جوشکاری در کشتی ها به علت وجود قطعات غیر استاندارد در شکل ها و ابعاد مختلف، کاری پیچیده است. در این نوع کار، ربات انبر جوشکاری را به موقعیت جوشکاری برده سپس حسگر^۱، نیرو و گشتاور اعمال شده

¹ sensor

توسط ربات را حس کرده و با توجه به آن به بازو دستور حرکت می دهد[۲۱]. کنترل امپدانس ربات آدمواره در حالت قدم زدن بررسی شده است[۲۲]. در هنگام راه رفتن ربات بر روی سطوح مختلف نیروهای متفاوتی به سطح تماس پا و زمین وارد می شود و نحوه وارد شدن این نیروها نیز قابل پیش بینی نیست. سنباده- کاری با کنترل امپدانس پیاده سازی شده است[۲۳].

دامنه وسیع کاربردهای کنترل امپدانس نشان می دهد که می توان آن را به عنوان یک روش کنترلی موثر در هدایت سیستمهای دینامیکی بکار برد. کنترل امپدانس که یکی از روشهای کنترل اکتیو محسوب می شود، می تواند رفتار دینامیکی سیستم را مطابق رفتار از پیش تعیین شده تنظیم نماید. از کنترل امپدانس برای کنترل ضریب سختی نیز استفاده می شود. با تعیین پارامترهای آن می توان کنترل موقعیت را نیز انجام داد. در شرایطی که محیط یا نوع کار تغییر می نماید، با تنظیم خودکار پارامترهای امپدانس، رفتار دینامیکی سیستم مطابق با شرایط، بصورت مطلوب هدایت می گردد. همچنین امید می رود در آینده راهبردهای نوین دیگری ارائه دهد.

۲-۳ خطی سازی فیدبکی^۱:

خطی سازی فیدبکی یک روش طراحی کنترل غیر خطی است که در سالهای اخیر علاقه مندی محققین را به خود جلب کرده است. ایده اصلی این روش این است که دینامیک های سیستم غیر خطی (بطور کامل یا جزئی) به خطی تبدیل شوند به طوری که بتوان از روش های کنترل خطی استفاده نمود.

ایده ساده کردن شکل دینامیک های سیستم به وسیله نمایش حالت بطور کامل هم نا آشنا نیست. به عنوان مثال در مکانیک، کاملاً شناخته شده است که شکل و پیچیدگی سیستم به مقدار قابل توجهی

¹ Feedback linearization

بستگی به انتخاب چهارچوب مرجع یا مختصات سیستم دارد. روش‌های خطی‌سازی فیدبکی را می‌توان در تبدیل مدل سیستم به مدل ساده‌تر استفاده نمود.

در عمل، خطی‌سازی فیدبکی به طور موفقیت آمیزی در حل مسائل کنترل بکار گرفته شده است. اما چند نقیصه و محدودیت نیز با روش خطی‌سازی فیدبکی همراه است که هنوز از موضوعات مهم تحقیقاتی می‌باشند و در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

روش خطی‌سازی فیدبکی، یعنی حذف غیر خطی‌ها و اعمال یک دینامیک خطی دلخواه را می‌توان برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی که به اصطلاح به فرم همراه^۱ یا فرم متعارفی کنترل پذیری می‌باشند به کار برد.

سیستمی به فرم همراه است که بتوان رابطه دینامیکی آن را به صورت زیر نمایش داد :

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (۴-۲)$$

در این رابطه u ورودی کنترل اسکالر، x خروجی اسکالر مورد نظر، $x = [x \quad \dot{x} \quad \dots \quad x^{(n-1)}]^T$ بردار حالت، $f(x)$ و $b(x)$ توابع غیر خطی از حالت اند. رابطه فوق شکل خاصی است زیرا اگر چه مشتقات x در معادله ظاهر شده اند، ولی هیچ مشتقی از u وجود ندارد. توجه کنید که در نمایش فضای حالت، رابطه فوق را می‌توان بصورت زیر نوشت :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ f(x) + b(x)u \end{bmatrix} \quad (۵-۲)$$

در سیستم‌هایی که بصورت فرم متعارفی کنترل پذیری یا فرم همراه هستند، با استفاده از ورودی کنترل زیر می‌توان غیر خطی‌های سیستم را حذف نمود (با فرض اینکه $b \neq 0$)

¹ canonical

$$u = \frac{1}{b}(v - f) \quad (۶-۲)$$

و رابطه ورودی - خروجی زیر را بدست آورد :

$$x^n = v \quad (۷-۲)$$

بنابراین قانون کنترل را به اینصورت انتخاب می کنیم :

$$v = -k_0x - k_1\dot{x} - \dots - k_{n-1}x^{(n-1)} \quad (۸-۲)$$

که در آن k_i ها طوری انتخاب شده اند که ریشه های چند جمله ای

$$p^n + k_{n-1}p^{n-1} + \dots + k_0 = 0 \quad (۹-۲)$$

همگی کاملاً در نیمه چپ صفحه مختلط قرار می گیرند و منجر به دینامیک پایدار نمایی زیر می شود

$$x^n + k_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + k_0x = 0 \quad (۱۰-۲)$$

بنابراین هنگامیکه $t \rightarrow \infty$ نتیجه می شود $x(t) \rightarrow 0$. برای وظایفی که شامل ردیابی خروجی دلخواه $x_d(t)$ باشد،

قانون کنترل زیر بکار می رود :

$$v = x_d^{(n)} - k_0e - \dots - k_{n-1}e^{(n-1)} \quad (۱۱-۲)$$

(که در آن $e(t) = x(t) - x_d(t)$ خطای ردیابی است) و به همگرایی نمایی ردیابی منتهی می گردد. توجه

کنید که اگر اسکالر x با یک بردار و اسکالر b با یک ماتریس مربع معکوس پذیر جایگزین شوند نتایج مشابهی بدست خواهد آمد.

به این ترتیب این روش را می توان در پایدار سازی و ردیابی مسائل کنترل، مورد استفاده قرار داد .

از جمله محدودیت های مهم این روش می توان به موارد زیر اشاره نمود :

۱- نمی توان این روش را در همه سیستم های غیر خطی بکار برد .

۲- باید همه متغیرهای حالت فیدبک شوند.

۳- در حالت هایی که عدم قطعیت پارامتری یا دینامیک های مدل نشده وجود داشته باشند، خطی سازی با فیدبک نمی تواند مقاوم بودن را تضمین کند. عدم قطعیت پارامتری یا دینامیک های مدل نشده به سبب این حقیقت است که مدل دقیق سیستم غیر خطی در اعمال خطی سازی فیدبکی قابل دسترس نیست و حساسیت خطاهای مدل سازی ممکن است بخصوص در مواقعی که تبدیل خطی سازی فیدبکی بصورت ضعیفی شکل گرفته است، شدید باشد .

تحقیقات فعالی در حال انجام است تا این نقاط ضعف برطرف شوند. برای مشکل اول، تحقیقات برای تعمیم خطی سازی فیدبکی به سیستم های غیرمی نیمم فاز معطوف شده است. برای مشکل دوم، فعالیتهای بسیاری در حال انجام است تا مشاهده گرهای^۱ در سیستم های غیر خطی ساخته شوند. برای مشکل سوم، کنترل مقاوم^۲ و تطبیقی^۳ در حال تعریف است تا سیستم های قابل خطی سازی فیدبکی با مقاوم بودن نسبت به عدم قطعیت های پارامتری را ارائه نمایند [۲۵].

¹ observers

² Robust control

³ Adaptive control

فصل سوم

کنترل مود لغزشی

✓ اصول اساسی کنترل لغزشی

کنترل لغزشی یک رهیافت قدرتمند در جهت کنترل سیستم های غیر خطی و غیر قطعی می باشد. کنترل لغزشی یک روش کنترل مقاوم است و می تواند با داشتن مدل عدم قطعیت ها و اغتشاش های پارامتر بکار رود، بشرطی که محدوده این عدم قطعیت ها و اغتشاش ها معلوم باشد [۲۴].

۳-۱ اصول اساسی کنترل لغزشی

سیستم غیر خطی SISO زیر را در نظر بگیرید

$$\dot{x}^{(n)} = f(X) + u \quad (۱-۳)$$

که u ورودی کنترل، x خروجی و $X = (x \ \dot{x} \ \dots \ x^{(n-1)})^T$ بردار حالت می باشد. در رابطه (۱-۳) تابع $f(X)$ دقیقاً معلوم نمی باشد اما عدم قطعیت $f(X)$ محدود به یک تابع معلوم $F(X)$ است. یعنی:

$$f(X) = \hat{f}(X) + \Delta f(X) \quad (۲-۳)$$

$$|\Delta f(X)| \leq F(X) \quad (۳-۳)$$

بطوریکه $\Delta f(X)$ نامعلوم بوده ولی $\hat{f}(X)$ و $F(X)$ معلوم می باشند. هدف کنترل عبارت از تعیین یک کنترل فیدبک $u=u(x)$ می باشد به نحوی که حالت X در سیستم حلقه بسته قادر به رهگیری حالت مطلوب

$$X_d = (x_d \ \dot{x}_d \ \dots \ x_d^{(n-1)})^T$$

باشد یعنی خطای ردیابی

$$e = X - X_d = (e \quad \dot{e} \quad \dots \quad e^{(n-1)})^T \quad (4-3)$$

به سمت صفر همگرا گردد که در رابطه اخیر $e=x-x_d$ می باشد.

ایده اساسی کنترل لغزشی بدین ترتیب است. ابتدا یک تابع اسکالر $s(X, t)$ تعریف می شود. در این جا این تابع را این گونه انتخاب می کنیم:

$$s(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e = e^{(n-1)} + c_{n-1}^1 \lambda e^{(n-2)} + \dots + \lambda^{n-1} e \quad (5-3)$$

که λ یک ثابت مثبت می باشد. آنگاه

$$s(X, t) = 0 \quad (6-3)$$

یک سطح وابسته به زمان $s(t)$ را در فضای R^n تعریف می کند. به عنوان مثال اگر $n=2$ باشد آنگاه سطح $s(t)$ عبارت است از:

$$s(X, t) = \dot{e} + \lambda e = \dot{x} + \lambda x - \dot{x}_d - \lambda x_d = 0 \quad (7-3)$$

که یک خط مستقیم در صفحه فاز می باشد. از آنجا که $x_d, \dot{x}_d$ معمولاً توابع متغیر با زمان می باشند لذا $s(t)$ نیز متغیر با زمان خواهد بود. اگر حالت اولیه $X(0)$ با حالت اولیه مطلوب $X_d(0)$ مساوی باشد یعنی اگر $e(0)=0$ باشد آنگاه از روابط (5-3) و (6-3) مشاهده می گردد در صورتی که بردار حالت X روی سطح $s(t)$ برای تمام $t \geq 0$ باقی بماند آنگاه ما $e(t)=0$ را برای تمامی $t \geq 0$ خواهیم داشت. در حقیقت $s(X, t) = 0$ یک معادله دیفرانسیل خطی را نشان می دهد که پاسخ یکتای آن $e(t)=0$ برای شرایط اولیه $e(0)=0$ می باشد. بنابراین مساله کنترل ردیابی ما معادل با قراردادن تابع اسکالر $s(X, t)$ در صفر خواهد بود. برای رسیدن به این هدف ما می توانیم کنترل u را چنان انتخاب کنیم که رابطه زیر برقرار گردد

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (8-3)$$

اگر حالت خارج از $s(t)$ باشد، و η یک ثابت مثبت می باشد. رابطه (۸-۳) به عنوان شرایط لغزشی نامیده می شود و این شرط کاهش $|s(X, t)|$ را در صورتی که X روی سطح $s(t)$ نباشد تضمین می نماید، یعنی مسیر حالت به سمت سطح $s(t)$ انتقال خواهد یافت. سطح $s(t)$ سطح لغزشی، سیستم روی سطح، مود لغزشی و کنترلی که عبارت (۸-۳) را تضمین می نماید، کنترل مود لغزشی یا کنترل لغزشی نامیده می شود. با جمع بندی بحث بالا لم زیر را خواهیم داشت.

لم ۱-۳: سیستم غیر خطی (۱-۳) را در نظر بگیرید و فرض کنید $s(X, t)$ همانند رابطه (۵-۳) تعریف گردد. اگر ما بتوانیم یک کنترل کننده u را چنان طراحی کنیم که شرط لغزشی (۸-۳) برآورده گردد، آنگاه:

(a) حالت به سطح لغزشی $s(t)$ در زمان محدودی خواهد رسید.

(b) هنگامی که حالت بر روی سطح لغزشی قرار گیرد بر روی آن باقی خواهد ماند.

(c) اگر حالت بر روی سطح لغزشی باقی بماند خطای رد یابی $e(t)$ به سمت صفر همگرا خواهد شد.

بنابراین هدف ما طراحی یک کنترل کننده u می باشد بطوری که سیستم حلقه بسته شرط لغزشی (۸-۳) را برآورده نماید.

ما در این جا جزییات کنترل لغزشی را برای یک سیستم مرتبه دوم بررسی می کنیم. یعنی سیستم (۱-۳) که $n=2$ می باشد. در این حالت رابطه (۸-۳) به صورت زیر خواهد شد.

$$s[f(X) + u - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e}] \leq -\eta |s| \quad (9-3)$$

که از روابط (۵-۳) و (۱-۳) استفاده کردیم. اگر ما

$$u = -\hat{f}(X) + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k(x, \dot{x}) \operatorname{sgn}(s) \quad (10-3)$$

را انتخاب کنیم آنگاه رابطه (۹-۳) بصورت زیر خواهد شد

$$\operatorname{sgn}(s)[f(X) - \hat{f}(X) - k(x, \dot{x})\operatorname{sgn}(s)] \leq -\eta \quad (۱۱-۳)$$

بطوریکه اگر $s > 0$ آنگاه $\operatorname{sgn}(s) = 1$ و اگر $s < 0$ آنگاه $\operatorname{sgn}(s) = -1$ خواهد بود و $\hat{f}(x)$ هم تخمینی از $f(x)$ مطابق با رابطه (۲-۳) می باشد. علاوه بر این رابطه (۱۱-۳) معادل است با

$$k(x, \dot{x}) \geq \eta + \operatorname{sgn}(s)[\Delta f(X)] \quad (۱۲-۳)$$

بنابراین اگر

$$k(x, \dot{x}) = \eta + F(X) \quad (۱۳-۳)$$

را انتخاب کنیم، آنگاه از (۳-۳) مشاهده می گردد که برقراری (۱۲-۳) تضمین شده است که در این صورت نتیجه خواهد داد که شرط لغزش (۸-۳) برآورده شده است. بنابراین کنترل کننده لغزشی برابر رابطه (۳-۱۰) داده می شود که در آن $k(x, \dot{x})$ به وسیله معادله (۱۳-۳) مشخص می گردد.

در پیوست دو مطالب بیشتری پیرامون کنترل مود لغزشی بیان خواهد گردید.

فصل چهارم

مدل سازی سیستم کنترل

✓ مدل سیستم تعلیق مغناطیسی

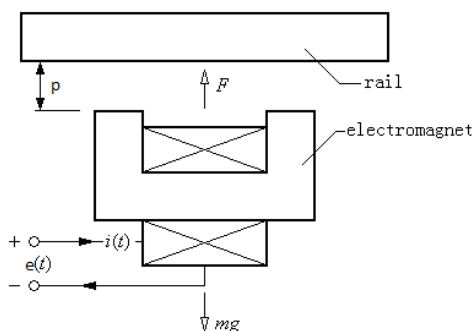
✓ سیستم کنترل

✓ کنترل امپدانس

✓ سنسورهای مورد نیاز

✓ کنترل مود لغزشی

فناوری کنترل سیستم تعلیق مغناطیسی یکی از فناوری‌های کلیدی قطارهای مغناطیسی از نوع تعلیق الکترومغناطیس می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۱-۴) ملاحظه می‌شود، کنترل سیستم تعلیق قطار مغناطیسی می‌تواند به یک مسئله کنترل سیستم تعلیق منفرد^۱، ساده شود [۶]. در اینجا تنها حرکت عمودی قطار مورد توجه خواهد بود. هدف سیستم کنترل عبارت از نگه‌داشتن قطار در یک فاصله معین از ریل می‌باشد.



شکل ۱-۴ نمایی از سیستم تعلیق قطار مغناطیسی [۶]

۱-۴ مدل سیستم تعلیق مغناطیسی:

می‌توان مدل دینامیکی سیستم را به این صورت بیان کرد [۳]:

$$\frac{dp}{dt} = v \quad (۱-۴)$$

$$Ri + \frac{d(L(p)i)}{dt} = e \quad (۲-۴)$$

¹ single

$$m \frac{dv}{dt} = mg_c - C \left(\frac{i}{p} \right)^2 \quad (3-4)$$

بطوری که p نشان دهنده موقعیت، v سرعت، i جریان سیم پیچ الکترومغناطیس، e ولتاژ سیم پیچ، R مقاومت سیم پیچ، L اندوکتانس سیم پیچ، g_c ثابت گرانشی، C ثابت نیروی مغناطیسی، m جرم جسم معلق بوده و اندوکتانس L تابعی غیر خطی از موقعیت می باشد که به صورت تقریبی از رابطه

$$L(p) = L_1 + \frac{2C}{p} \quad (4-4)$$

محاسبه خواهد شد.

متغیرهای حالت و ورودی کنترلی را این گونه در نظر می گیریم :

$$x_1 = p$$

$$x_2 = v$$

$$x_3 = i$$

$$u = e$$

و بردار حالت بصورت $x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ خواهد بود . بنابراین مدل فضای حالت سیستم تعلیق مغناطیسی بصورت زیر نوشته می شود :

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (5-4)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = g_c - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \quad (6-4)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} u \quad (7-4)$$

اگر x_{1d}, x_{2d}, x_{3d} را به ترتیب به عنوان مقادیر مطلوب x_1, x_2, x_3 در نظر بگیریم، هدف کنترل همگرایی متغیرهای حالت x_1, x_2, x_3 بسوی مقادیر مطلوبشان x_{1d}, x_{2d}, x_{3d} می باشد. از روابط (۴-۵) تا (۴-۷) نقطه

$$\text{تعالل سیستم بصورت } x_e = [x_{1e} \quad 0 \quad x_{3e}]^T \text{ بوده که } x_{3e} = \sqrt{\frac{g_c m}{c}} x_{1e} \text{ می باشد.}$$

برای نوشتن معادلات حالت سیستم به فرم همراه تغییر متغیر زیرا را انجام می دهیم :

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (۴-۸)$$

$$z_2 = x_2 \quad (۴-۹)$$

$$z_3 = g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \quad (۴-۱۰)$$

بدیهی است اگر با افزایش زمان z_1, z_2, z_3 به صفر میل کنند x_1 به مقدار مطلوبش یعنی x_{1d}, x_2 به صفر و

$$x_3 \text{ به } x_{3e} = \sqrt{\frac{g_c m}{c}} x_{1e} \text{ میل خواهند کرد.}$$

مدل دینامیکی سیستم با جایگذاری متغیرهای جدید اینگونه است :

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (۴-۱۱)$$

$$\dot{z}_2 = z_3 \quad (۴-۱۲)$$

$$\dot{z}_3 = f(z) + g(z)u \quad (۴-۱۳)$$

بطوریکه

$$f(z) = 2(g_c - z_3) \left(\left(1 - \frac{2c}{L(z_1 + x_{1d})} \right) \frac{z_2}{(z_1 + x_{1d})} + \frac{R}{L} \right) \quad (۴-۱۴)$$

$$g(\mathbf{z}) = \frac{-2}{L(z_1 + x_{1d})} \sqrt{\frac{c}{m} (g_c - z_3)} \quad (۱۵-۴)$$

توابع $f(\mathbf{z})$ و $g(\mathbf{z})$ بر حسب متغیرهای اصلی به این شکل می باشند :

$$f_1(\mathbf{x}) = \frac{2C}{m} \left(\left(1 - \frac{2C}{Lx_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R x_3^2}{L x_1^2} \right) \quad (۱۶-۴)$$

$$g_1(\mathbf{x}) = -\frac{2Cx_3}{Lmx_1^2} \quad (۱۷-۴)$$

بطوریکه

$$f_1(\mathbf{x}) = f(\mathbf{z}), g_1(\mathbf{x}) = g(\mathbf{z}) \quad (۱۸-۴)$$

اگر اثر اغتشاش را در معادلات سیستم وارد کنیم، خواهیم داشت:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (۱۹-۴)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = g_c \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + \frac{1}{m} f_{dis} \quad (۲۰-۴)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} u \quad (۲۱-۴)$$

و معادلات بر حسب متغیرهای جدید این گونه اند:

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2 \quad (۲۲-۴)$$

$$\frac{dz_2}{dt} = z_3 \quad (۲۳-۴)$$

$$\frac{dz_3}{dt} = f(\mathbf{z}) + g(\mathbf{z})(\eta + u) \quad (۲۴-۴)$$

در حالی که $f(\mathbf{z})$ و $g(\mathbf{z})$ طبق (۱۴-۴) و (۱۵-۴) تعریف شده و η عبارتست از:

$$\eta = \frac{2\left(\frac{1}{m}f_{dis}\right)\left(\left(1-\frac{2C}{L(z_1+x_{1d})}\right)\frac{z_2}{(z_1+x_{1d})}+\frac{R}{L}\right)}{\frac{-2}{L(z_1+x_{1d})}\sqrt{\frac{C}{m}(g_c-z_3)}} \quad (25-4)$$

۲-۴ سیستم کنترل:

فرض می کنیم در این قطار تکنولوژی جریان حلقه با سرعت بالا^۱ به کار رفته [۸] و این بدان معناست که جریان سیم پیچ می تواند به صورت لحظه ای تغییر کند.

هدف اصلی سیستم کنترل فراهم کردن یک رفتار دینامیکی مطلوب برای قطار در برابر اختلال تغییر جرم آن می باشد. رفتار دینامیکی مطلوب توسط قانون امپدانس^۲ مشخص می گردد. بنابراین سیستم کنترل به گونه ای طراحی می شود که بتواند خروجی قانون امپدانس را دنبال کند. خروجی کنترل کننده موقعیت، نیروی مطلوبی خواهد بود که باید بوسیله سیم پیچ فراهم گردد.

۳-۴ کنترل نیرو

رابطه (۴-۱۰) را بازنویسی می کنیم:

$$z_3 = g_c - \frac{f_m}{m} \quad (26-4)$$

بنابراین اگر نیروی مطلوب سیم پیچ را در اختیار داشته باشیم، مقدار مطلوب متغیر z_3 این گونه محاسبه خواهد شد:

¹ High speed current-loop technology

² Impedance rule

$$z_{3d} = g_c - \frac{f_{mdes}}{m} \quad (27-4)$$

بنابراین اگر با افزایش زمان $z_3 \rightarrow z_{3d}$ می‌توان نتیجه گرفت $f_m \rightarrow f_{md}$

قانون کنترل را به این صورت می‌نویسیم:

$$u = \frac{1}{g(z)} [-f(z) + \dot{z}_{3d} - k_p(z_3 - z_{3d})] \quad (28-4)$$

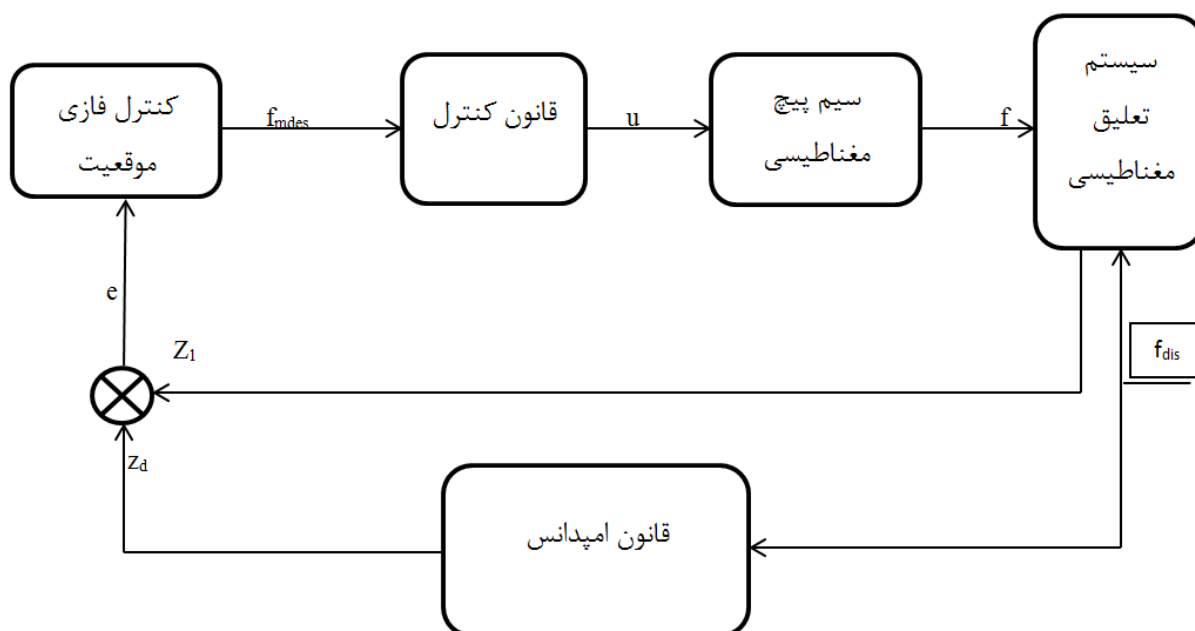
درحالی‌که $k_p > 0$ می‌باشد. با جایگذاری (28-4) در (24-4) خواهیم داشت :

$$(\dot{z}_3 - \dot{z}_{3d}) + k_p(z_3 - z_{3d}) = 0 \quad (29-4)$$

در نتیجه با انتخاب مناسب k_p ($k_p = \frac{2R}{L}$)، هنگامیکه $t \rightarrow \infty$ نتیجه می‌شود $z_3 \rightarrow z_{3d}$ و $f_m \rightarrow f_{md}$

بنابراین ولتاژ ورودی سیم پیچ از رابطه ی (28-4) محاسبه خواهد شد و $f(z)$ و $g(z)$ به ترتیب از (14-4) و (15-4) محاسبه می‌شوند.

ساختار سیستم کنترل در شکل (2-4) نشان داده شده است .



شکل (۴-۲) ساختار سیستم کنترل

۴-۴ کنترل امپدانس:

هدف کنترل امپدانس تامین یک رفتار دینامیکی مطلوب برای جابجایی جسم معلق (در اینجا قطار)، در مقابل نیروی وارد شده بوسیله اختلال جرمی می باشد. قانون امپدانس بصورت یک سیستم مرتبه دوم تعریف می شود:

$$f_{dis} = M(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_{d1}) + L(\dot{x}_1 - \dot{x}_{d1}) + K(x_1 - x_{d1}) \quad (۴-۳۰)$$

با بکارگیری (۴-۸) خواهیم داشت:

$$f_{dis} = M\ddot{z}_{d1} + L\dot{z}_{d1} + Kz_{d1} \quad (۴-۳۱)$$

بطوریکه M معادل لختی مطلوب، L ضریب میرایی مطلوب، K ضریب سختی مطلوب، x_d جابجایی مطلوب و f_{dis} نیروی حاصل از اختلال جرمی می باشد.

موقعیت جسم معلق باید مقدار مطلوب زیر که از رابطه (۴-۳۱) نتیجه می شود را دنبال کند:

$$Z_d(s) = \frac{F_{dis}(s)}{Ms^2 + Ls + K} \quad (۴-۳۲)$$

بنابراین یک کنترل کننده موقعیت جهت ردگیری مسیر مطلوب رابطه (۴-۳۲) مورد نیاز می باشد .

یک کنترل کننده موقعیت فازی می تواند جهت پیاده سازی قانون امپدانس بکار رود . از آنجا که کنترل کننده فازی بر پایه مدل نمی باشد براحتی قابل طراحی بوده [۲۶] و برای نوشتن قوانین فازی به دانش دقیق مدل نیازی نیست . این کنترل کننده یک سیستم هوشمند با بکارگیری قواعد فازی زبانی بوده که از دانش فرد خبره استفاده می کند .

یک کنترل کننده فازی شبه PD^۱ اینگونه پیشنهاد می شود :

$$U_F = K_u F(K_e e, K_{de} de) \quad (۴-۳۳)$$

بطوریکه u_f ضربی از خروجی^۲ کنترل کننده فازی ، e خطای موقعیت جسم معلق که بصورت $e = x_d - x$ تعریف شده، de مشتق e ، F خروجی فازی ، k_e, k_{de}, k_u به ترتیب ضرایب e, de, f می باشند.

جدول (۴-۱) نشان دهنده قوانین فازی بوده و متغیرهای فازی عبارتند از دو متغیر ورودی شامل

$e, \dot{e}$ و متغیر خروجی f .

^۱ PD like fuzzy controller

^۲ Scaled output

جدول (۴-۱) قوانین فازی

		de		
		P	Z	N
e	P	Z	mg-L	mg
	Z	mg-L	mg	mg-H
	N	mg	mg-H	H

نه قانون فازی را به این شکل می نویسیم:

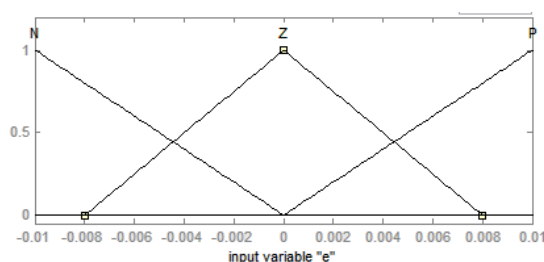
If e is MF_i & de is MF_j then F is MF_{ij} for $i=1,2,3$ & $j=1,2,3$

همانگونه که در شکل (۴-۳) دیده می شود سه تابع تعلق^۱ جهت خطای موقعیت e و مشتق آن de

به نام های P^2, Z^3, N^4 و در محدوده $[-0.01, 0.01]$ تعیین گردیده اند. پنج تابع تعلق مثلثی به نام های 0, mg-

L, mg, mg-H, H نیز همانگونه که در شکل (۴-۴) نشان داده شده در محدوده $[0, 0.2328]$ جهت خروجی

انتخاب شده اند. این سیستم فازی از نوع ممدانی با غیرفازی ساز میانگین مراکز می باشد.



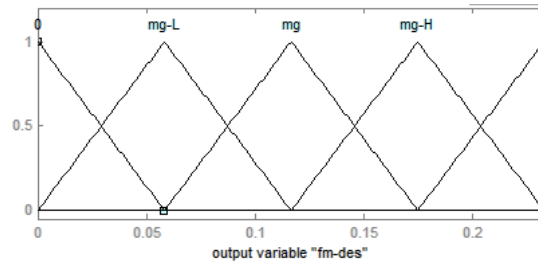
شکل (۴-۳) گروه های فازی برای ورودی ها

¹ Membership function

² Positive

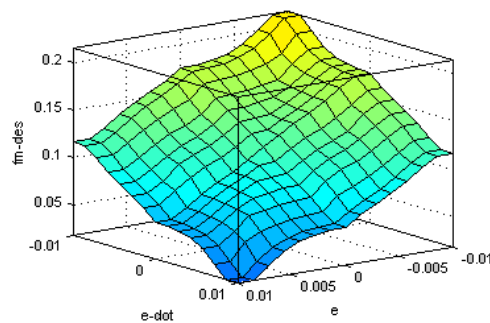
³ Zero

⁴ Negative



شکل (۴-۴) گروه های فازی برای خروجی

شکل (۵-۴) نیز رویه قوانین فازی در صفحه کنترل را نشان می دهد .



شکل (۵-۴) نمودار قوانین فازی در فضای کنترل

۵-۴ سنسورهای مورد نیاز

برای محاسبه جابجایی مطلوب مطابق رابطه (۴-۳۲) به مقدار f_{dis} که برابر نیروی حاصل از اختلال جرمی می باشد نیاز داریم. با توجه به این که اندازه گیری f_{dis} به طور مستقیم امکان پذیر نمی باشد، با اعمال قانون نیوتن بر روی جسم معلق خواهیم داشت:

$$\sum F = ma \quad (۴-۳۴)$$

$$ma = mg_c + f_{dis} - f_m \quad (۴-۳۵)$$

$$f_{dis} = ma - mg_c + f_m \quad (۴-۳۶)$$

به طوری که m جرم اولیه جسم معلق (مثلا قطار بدون مسافر)، a شتاب عمودی، g_c ثابت گرانش و f_m نیروی مغناطیسی سیم پیچ می باشد. برای محاسبه f_{dis} از رابطه (۴-۳۶)، مقدار a می تواند مستقیماً توسط

حسگرهای شتاب که به جسم معلق متصل شده اند اندازه گیری گردد. f_m نیز از رابطه $f_m = C \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2$ محاسبه خواهد گردید. برای محاسبه f_m و اعمال قانون کنترل (۴-۲۸) به مقادیر x_1, x_2, x_3 نیازمندیم. با توجه به این که x_1 فاصله جسم معلق و x_2 سرعت آن می باشد محاسبه آن ها بوسیله حسگرهای معمول در صنعت کنترل به راحتی انجام می پذیرد. جریان سیم پیچ x_3 نیز به آسانی اندازه گیری می گردد.

۴-۶ کنترل مود لغزشی

نظر به این که بنا داریم روش کنترل فازی امیدانسی ارائه شده را با روش مود لغزشی مقایسه نماییم، در این بخش یک کنترل کننده مود لغزشی اعمال شده بر روی سیستم تعلیق مغناطیسی [۳] را ارائه می دهیم.

قدم اول در طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم، طراحی سطح لغزش می باشد. سطح لغزش را این گونه در نظر می گیریم

$$\varphi = \ddot{y} + \lambda_1 \dot{y} + \lambda_2 y = \ddot{z}_1 + \lambda_1 \dot{z}_1 + \lambda_2 z_1 = z_3 + \lambda_1 z_2 + \lambda_2 z_1 \quad (۴-۳۷)$$

در حالی که λ_1, λ_2 ثابت های مثبت هستند.

با استفاده از روابط (۴-۵)، (۴-۶) و (۴-۷) سطح لغزش می تواند به عنوان تابعی از x_1, x_2, x_3 ارائه گردد.

$$\varphi = g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + \lambda_1 x_2 + \lambda_2 (x_1 - x_{1d}) \quad (۴-۳۸)$$

توجه شود انتخاب این سطح لغزش تضمین می کند که وقتی $t \rightarrow \infty$ ، $y = z_1 = x_1 - x_{1d}$ به صفر می - گراید.

گزاره ۴-۶-۱ هنگامی که کنترل کننده ناپیوسته

$$u = \frac{1}{g_1} \left[f_1 - \lambda_1 \left(g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) - \lambda_2 x_2 - W \operatorname{sign} \left(g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + \lambda_1 x_2 + \lambda_2 (x_1 - x_{1d}) \right) \right] \quad (4-39)$$

به سیستم تعلیق مغناطیسی (۴-۵) تا (۴-۷) اعمال شود، وقتی که $t \rightarrow \infty$ ، x_1, x_2, x_3 بطور نمایی به مقادیر مطلوبشان میل خواهند کرد. پارامترهای کنترل کننده در شبیه سازی به این صورت انتخاب شده اند:

$W=350, \lambda_1 = 61, \lambda_2 = 930$

فصل پنجم

عملکرد سیستم و نتایج

✓ مشخصات سیستم

✓ نتایج شبیه سازی

در این فصل ابتدا سیستم تعلیق نشان داده شده در شکل (۱-۴) را به روش فازی امپدانس پیشنهادی در بخش‌های (۲-۴) ، (۳-۴) و (۴-۴) شبیه سازی نموده و سپس نتایج آن را با روش مود لغزشی بخش (۶-۴) مورد مقایسه قرار خواهیم داد. شکل (۱-۵) نمودار کنترلی سیستم با روش فازی امپدانس را نشان می‌دهد.

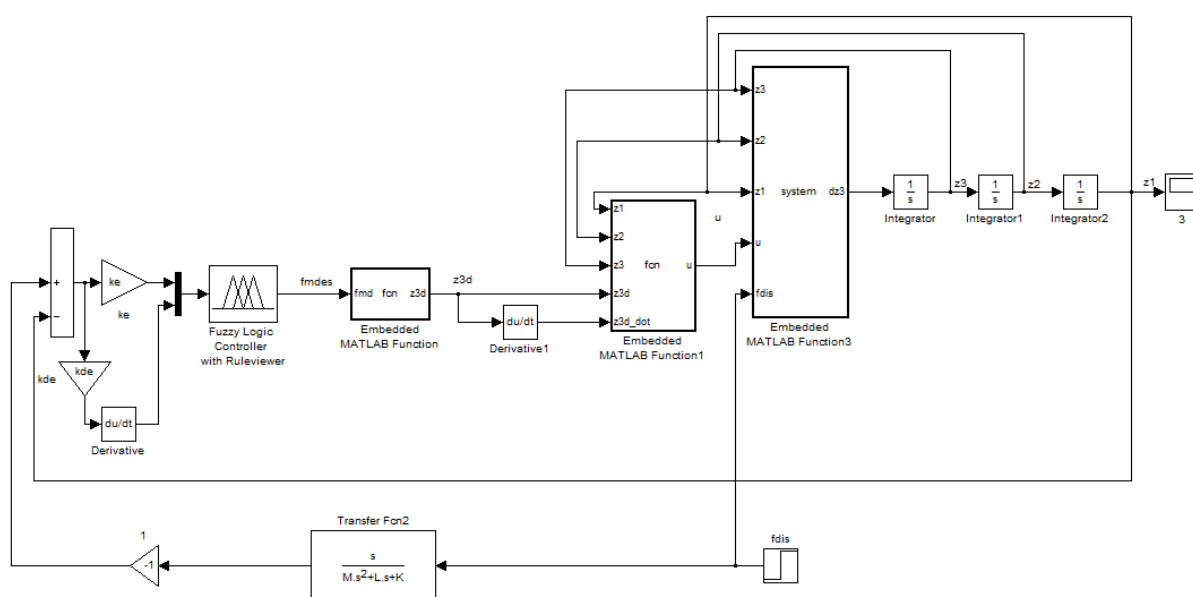
۱-۵ مشخصات سیستم

پارامترهای سیستم تعلیق مغناطیسی بدین گونه اند [۳]: مقاومت سیم پیچ $R=28.7\Omega$ ، اندوکتانس $L_1=0.65H$ ، ثابت گرانش $g_c=9.81$ ، ثابت نیروی مغناطیسی $C=1.4 \times 10^{-4}$ و جرم جسم معلق $m=11.87g$ ضرایب کنترل کننده های فازی امپدانس این گونه انتخاب شده اند: $k_U=1$ ، $k_{de}=0.2$ ، $k_e=40$ و $M=1$ ، $L=80$ ، $K=2000$.

۲-۵ نتایج شبیه سازی

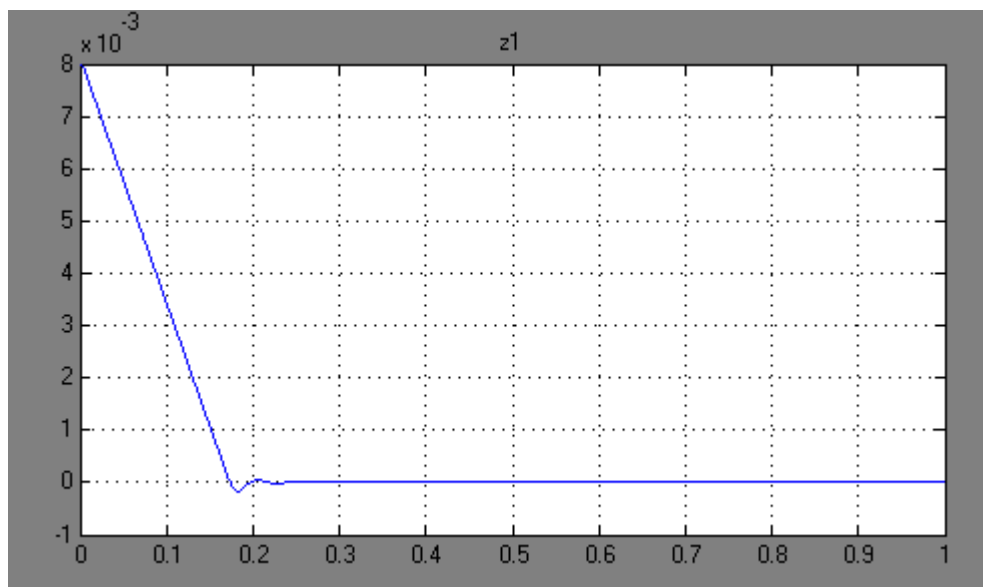
سیستم تعلیق را در سه حالت مورد بررسی قرار می‌دهیم. در حالت اول جرم جسم معلق برابر با مقدار اصلی آن بوده و جسم را از فاصله ۱۸ میلی متری از نقطه مرجع رها می‌کنیم (با توجه به اینکه فاصله مطلوب ۱۰ میلی متر می‌باشد). در حالت دوم وزن جسم ۲۵ درصد بیش از مقدار اصلی آن بوده و در حالت

سوم ۲۵ درصد کمتر از مقدار اصلی آن می باشد. نتایج شبیه سازی ها به صورت مقایسه ای ارائه گردیده اند. نمودار پیاده سازی شده در محیط سیمولینک در شکل (۵-۱) مشاهده می شود.

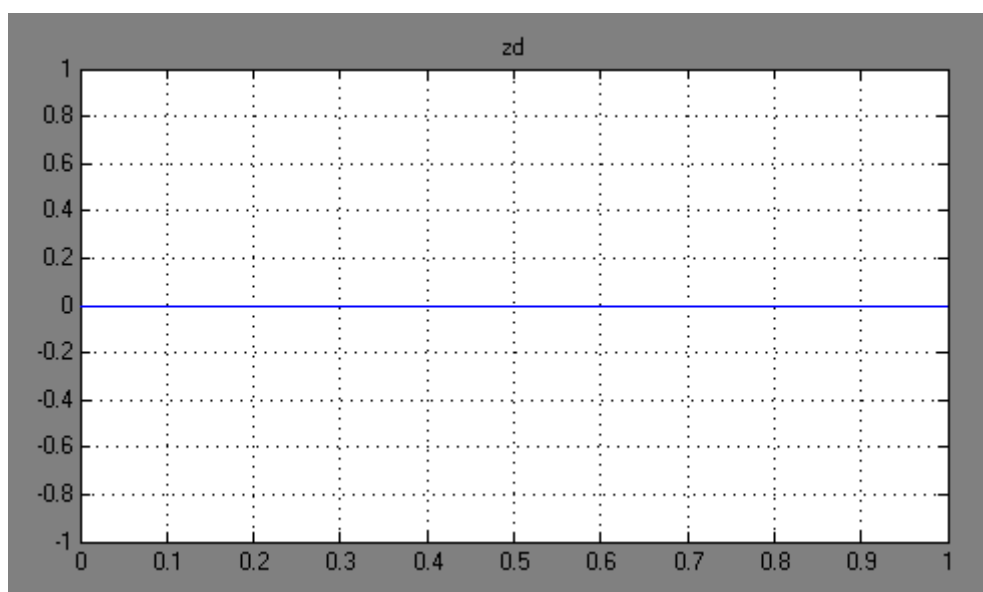


شکل (۵-۱) نمودار پیاده سازی شده سیستم در محیط سیمولینک – کنترل شده به روش فازی امپدانس

دینامیک موقعیت جسم معلق در کنار رفتار مطلوب تعیین شده توسط قانون امپدانس برای سه حالت پیش گفته در شکل های (۵-۲) تا (۵-۴) نشان داده شده است.



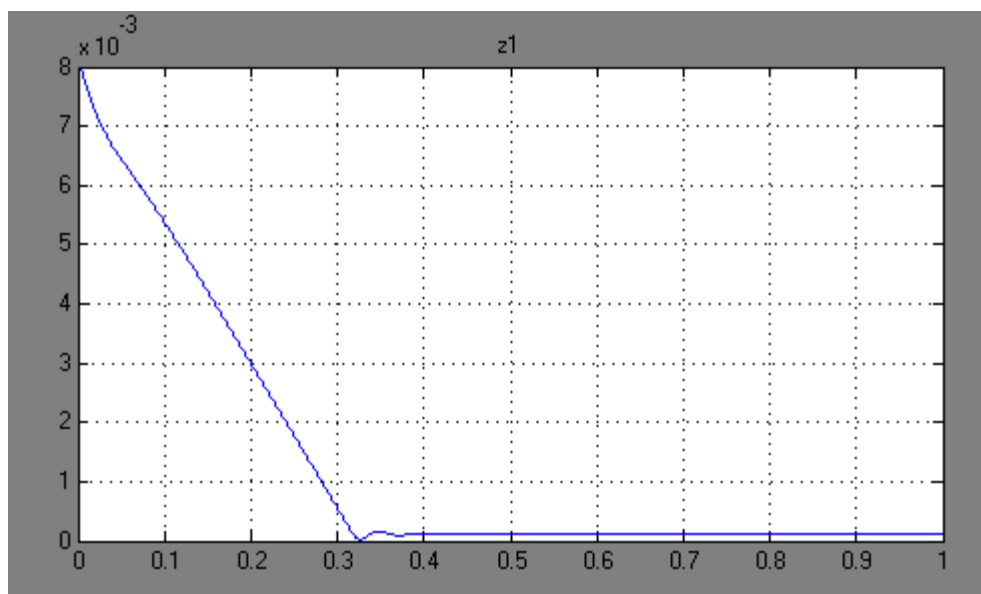
الف



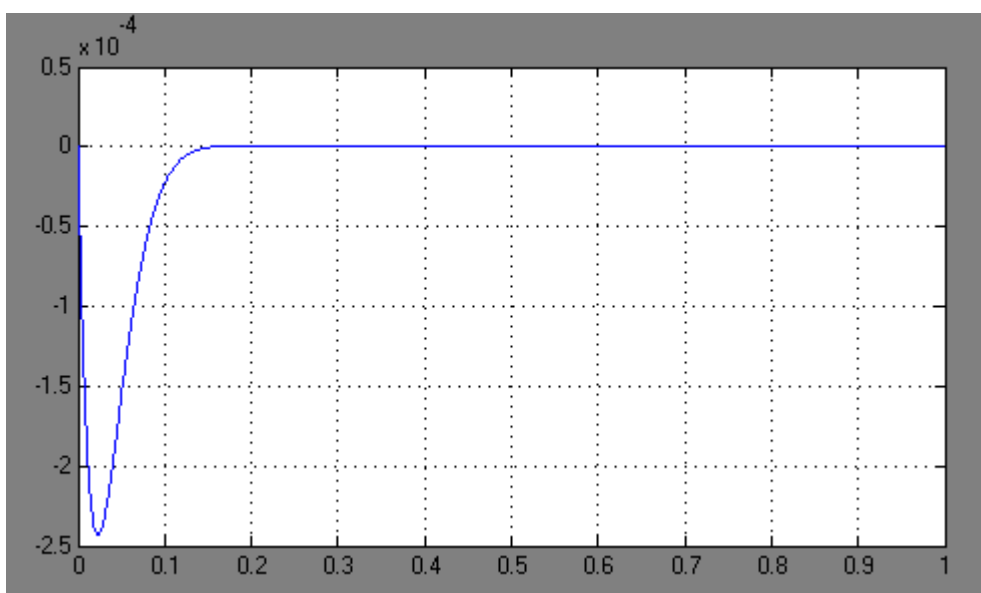
ب

شکل (۵-۲) الف) سیگنال خطای موقعیت (z_1) برای $m=11.87g$

ب) سیگنال خطای مطلوب (z_d) برای $m=11.87g$



الف

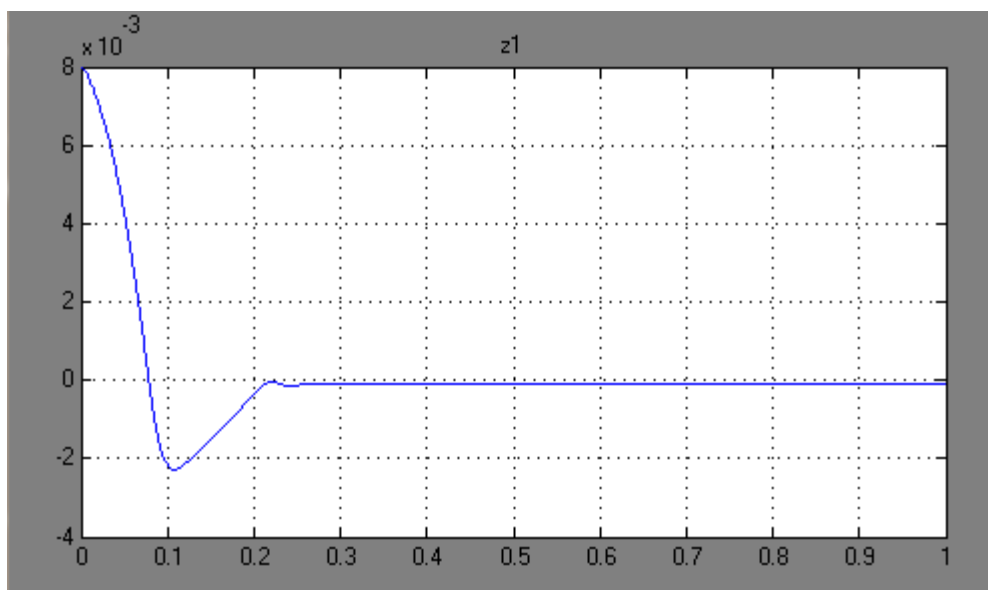


ب

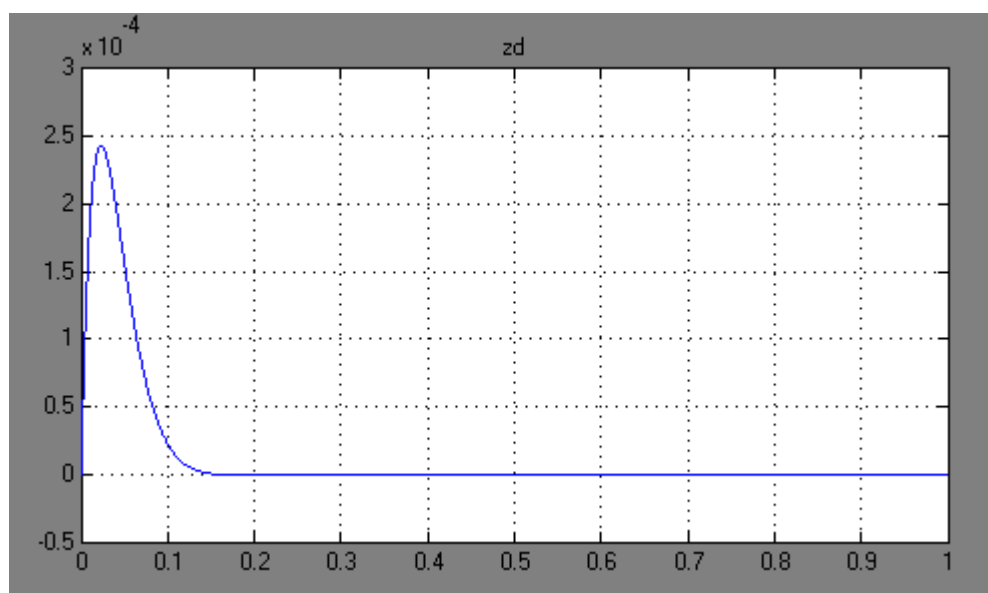
شکل (۳-۵) الف) سیگنال خطای موقعیت (z_1) برای $m=11.87g+25\%$

ب) سیگنال خطای مطلوب (z_d) برای $m=11.87g+25\%$

در شکل (۳-۵) ملاحظه می شود در حالتی که اغتشاش مثبت بوده و جرم جسم معلق بیش از مقدار اصلی آن است، مسیر مطلوب به گونه ای تعیین می گردد که در لحظات اول خطای بین موقعیت و مقدار مطلوب بیشتر گردیده که این باعث همگرایی سریع تر z_1 می شود. در حالی که وقتی اغتشاش منفی



الف

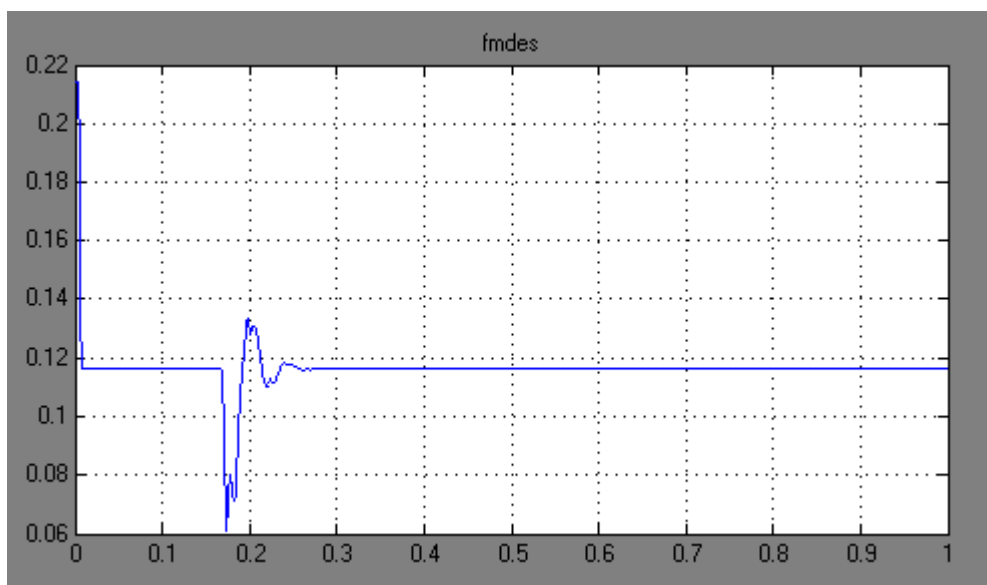


ب

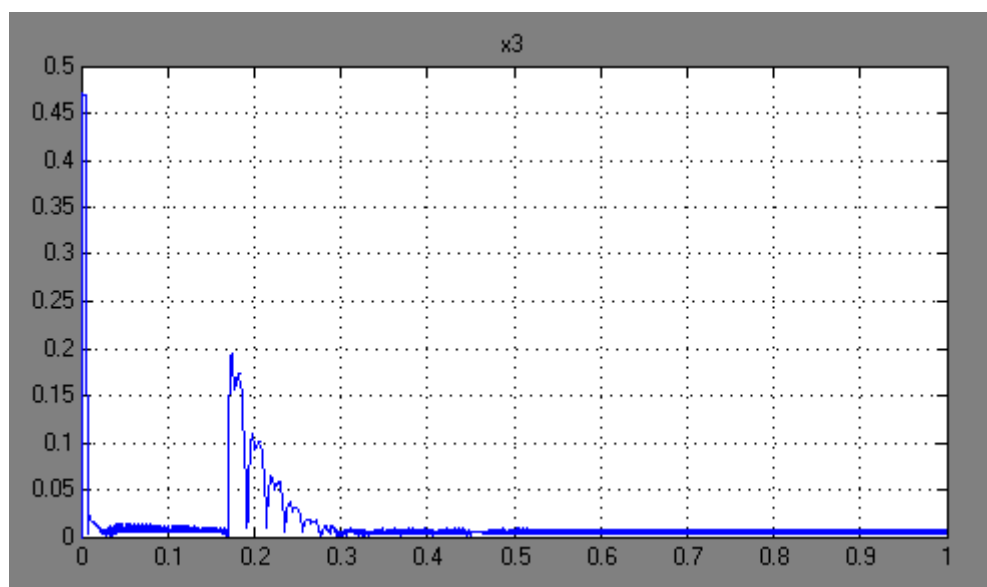
شکل (۴-۵) الف) سیگنال خطای موقعیت (z_1) برای $m=11.87g-25\%$

ب) سیگنال خطای مطلوب (z_d) برای $m=11.87g-25\%$

می باشد مسیر مطلوب به گونه ای است که در لحظات اول خطا کمتر گردیده تا از نیروی اضافی که سیم پیچ به دلیل وجود خطای موقعیت اولیه (8^{mm}) ایجاد خواهد کرد -و باعث فروجهش خواهد شد- کمی کاسته شده و قدری بتوان اثر فروجهش را کاهش داد، اگر چه اثر آن کاملاً حذف نمی شود (شکل ۴-۵).



الف

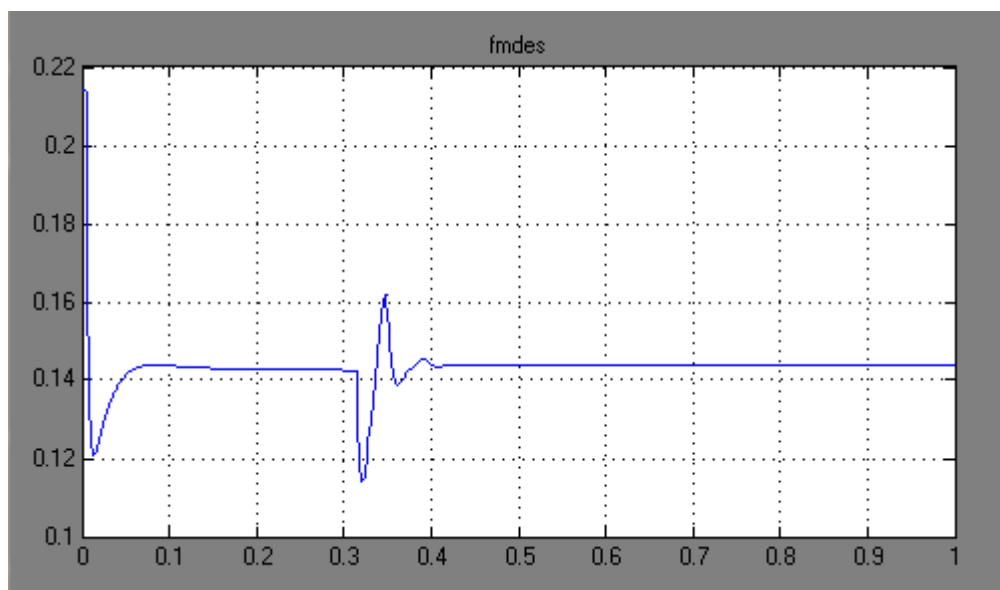


ب

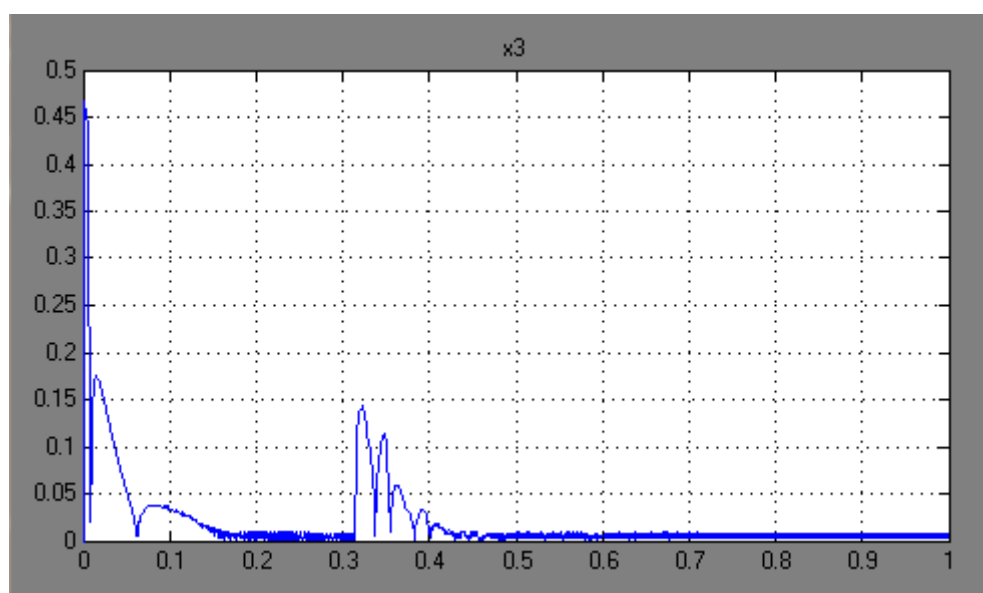
شکل (۵-۵) الف) سیگنال خروجی کنترل کننده (نیروی مغناطیسی مطلوب) برای $m=11.87g$

ب) جریان سیم‌پیچ برای $m=11.87g$

التبه وقتی اغتشاش نداشته باشیم، مسیر مطلوب برای سیگنال خطا همان صفر خواهد بود (شکل ۵-۲).



الف



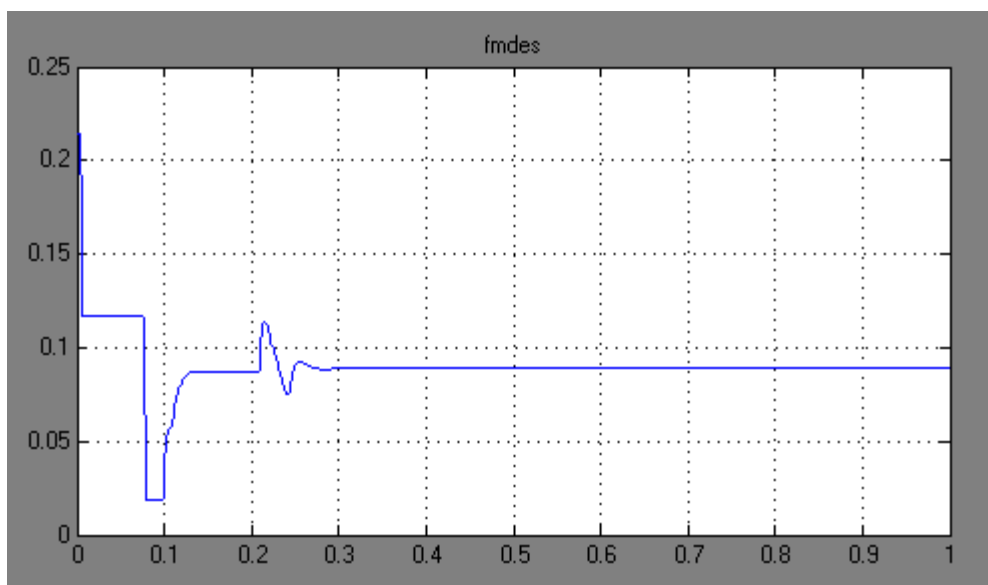
ب

شکل (۵-۶) الف) سیگنال خروجی کنترل کننده (نیروی مغناطیسی مطلوب) برای $m=11.87g+25\%$

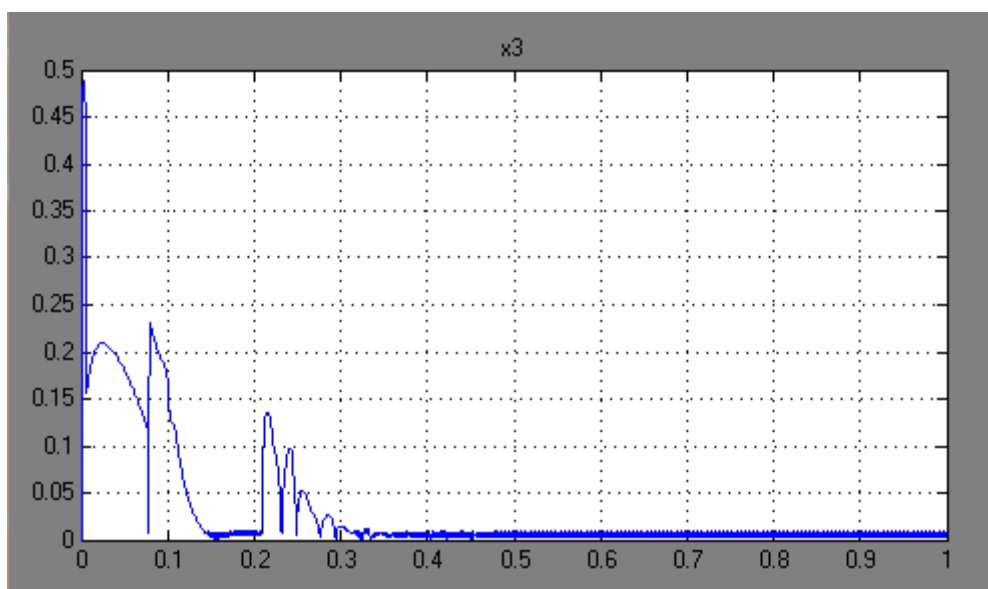
ب) جریان سیم پیچ برای $m=11.87g+25\%$

در شکل های (۵-۵) تا (۷-۵) سیگنال های خروجی کنترل کننده فاز f_{mdes} و جریان سیم پیچ

نشان داده شده اند.



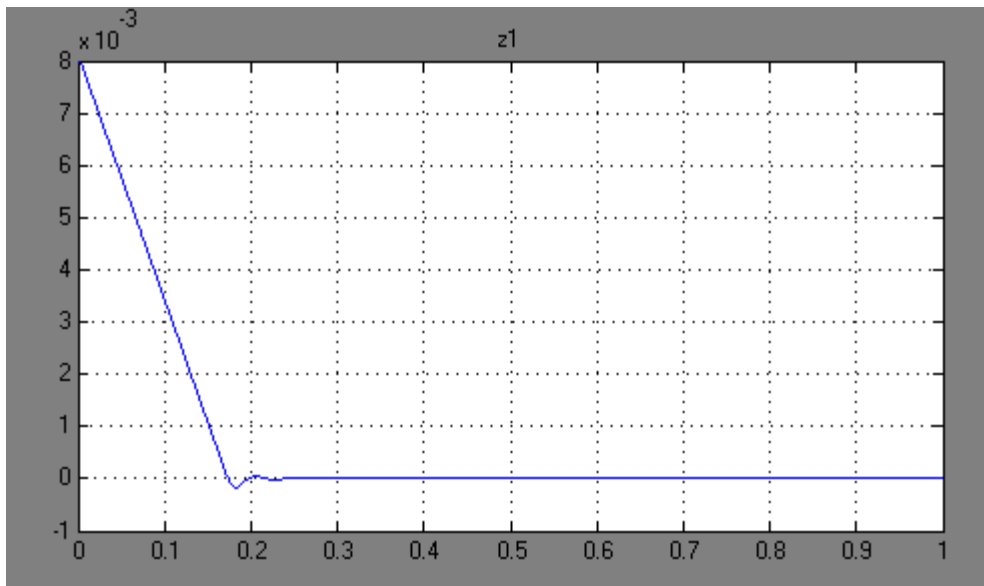
الف



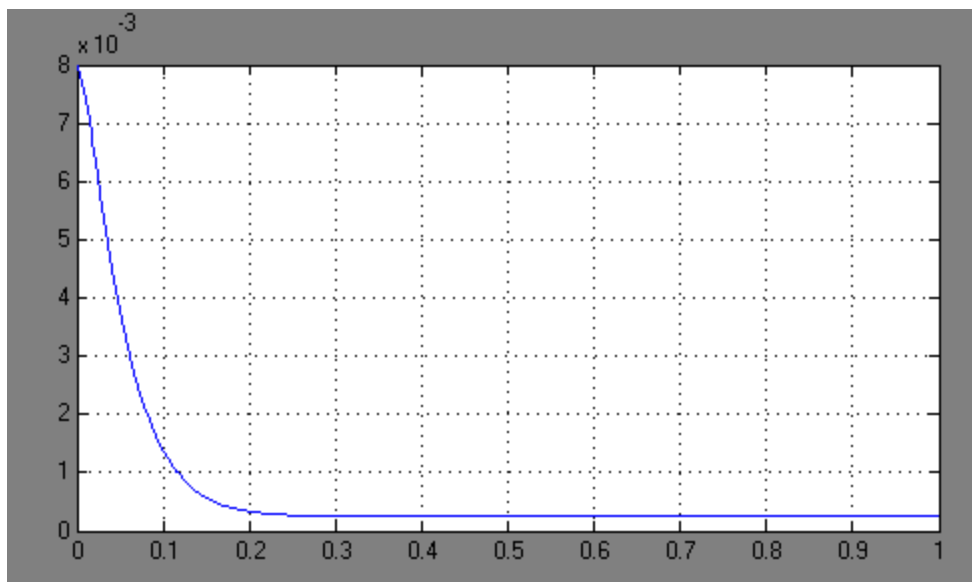
ب

شکل (۷-۵) الف) سیگنال خروجی کنترل کننده (نیروی مغناطیسی مطلوب) برای $m=11.87g-25\%$

ب) جریان سیم‌پیچ برای $m=11.87g-25\%$

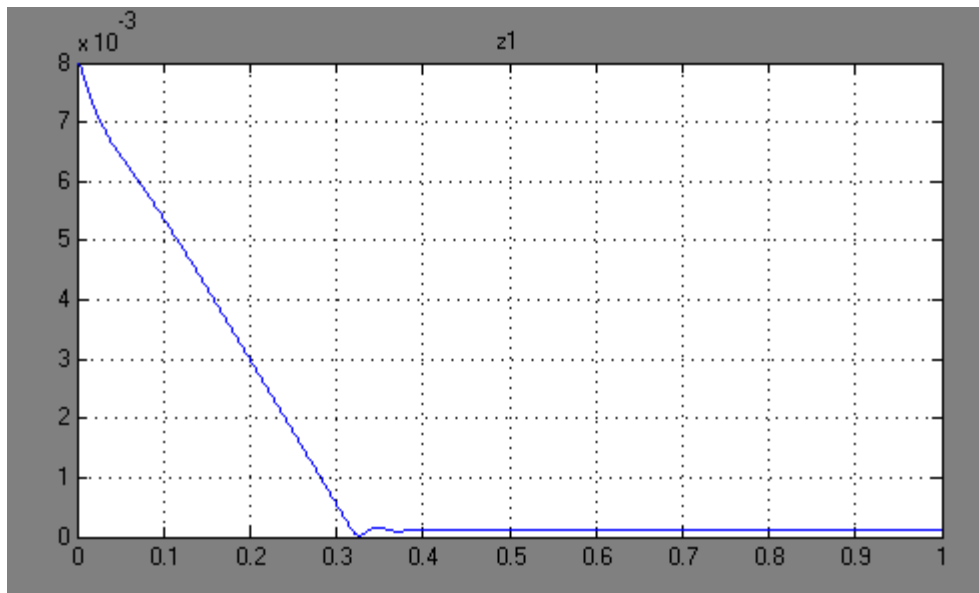


الف

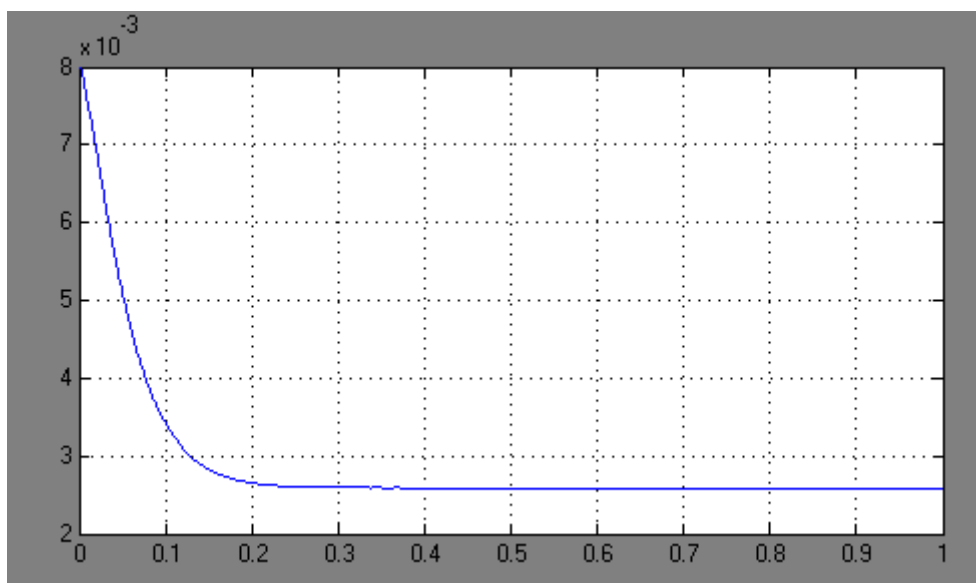


ب

شکل (۸-۵) مقایسه پاسخ کنترل کننده های فازی امپدانس و مود لغزشی. الف) سیگنال خطای موقعیت (z_1) با بکارگیری روش کنترل فازی امپدانس و برای $m=11.87g$ ب) سیگنال خطای موقعیت (z_1) با بکارگیری روش کنترل مود لغزشی برای $m=11.87g$



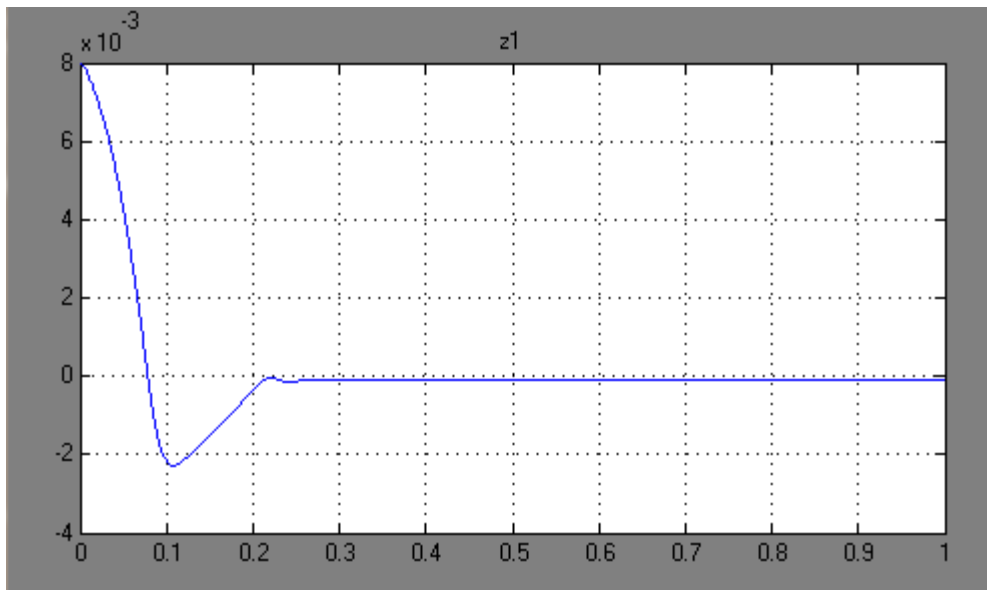
الف



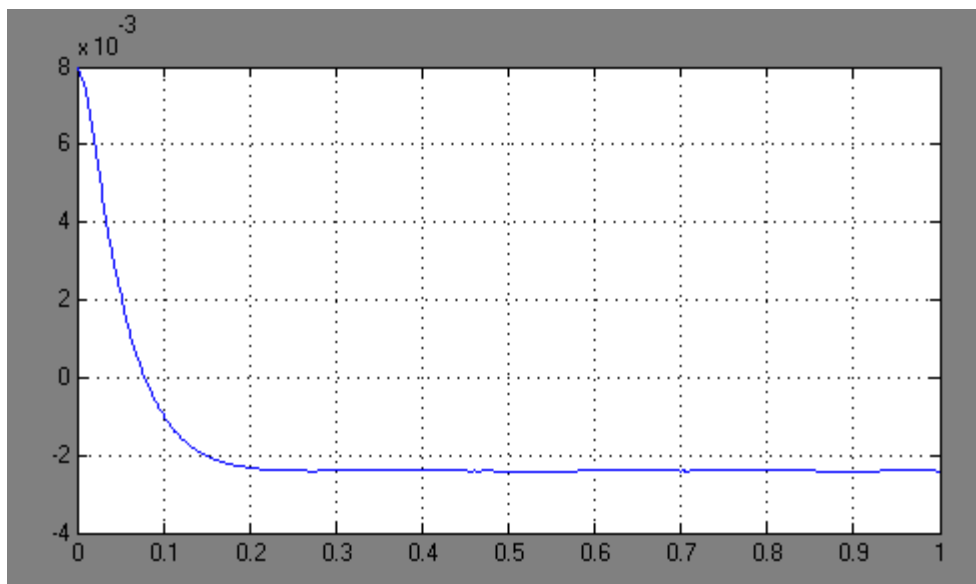
ب

شکل (۵-۹) مقایسه پاسخ کنترل کننده های فازی امپدانس و مود لغزشی. الف) سیگنال خطای موقعیت (z_1) با بکارگیری روش کنترل فازی امپدانس و برای $m=11.87g+25\%$ ب) سیگنال خطای موقعیت (z_1) با بکارگیری روش کنترل مود لغزشی برای $m=11.87g+25\%$

در شکل های (۵-۸) تا (۵-۱۰) سیگنال خطای موقعیت حاصل از دو کنترل کننده فازی امپدانس و مود لغزشی در حالت های مختلف در کنار هم نمایش داده شده اند.



الف



ب

شکل (۵-۱۰) مقایسه پاسخ کنترل کننده های فازی امپدانس و مود لغزشی. الف) سیگنال خطای موقعیت (z_1) با بکارگیری روش کنترل فازی امپدانس و برای $m=11.87g-25\%$ ب) سیگنال خطای موقعیت (z_1) با بکارگیری روش کنترل مود لغزشی برای $m=11.87g-25\%$

نتایج شبیه سازی ها بطور خلاصه در جدول (۵-۱) دیده می شود.

جدول (۱-۵) مقایسه نتایج دو کنترل کننده اعمال شده بر روی سیستم تعلیق مغناطیسی

	m=11.87g			m=11.87g+25%			m=11.87g-25%		
	درصد خطای ماندگار	درصد فروجهش	زمان نشست (s)	درصد خطای ماندگار	درصد فروجهش	زمان نشست (s)	درصد خطای ماندگار	درصد فروجهش	زمان نشست (s)
کنترل فازی امپدانس	۰	٪۲	۰,۱۸	٪۱	۰	۰,۳۱	٪۱	٪۲۳	۰,۲
کنترل مود لغزشی	٪۲	۰	۰,۱۵	٪۲۶	۰	۰,۱۵	٪۲۴	۰	۰,۱۵

فصل ششم

نتیجه گیری

✓ نتیجه گیری

۱-۶ نتیجه گیری

هدف روش کنترل فازی امپدانس ارائه شده در این پایان نامه نگه داشتن جسم معلق درون میدان مغناطیسی در یک فاصله معین می باشد. این کنترل کننده بایستی در مقابل تغییر جرم جسم معلق، ولتاژ سیم پیچ را به گونه ای کنترل کند که جسم پس از طی کردن یک مسیر مطلوب، با حداقل خطای ماندگار در فاصله معین از پیش تعیین شده قرار گیرد. ملاحظه گردید که روش فازی امپدانس این مهم را به خوبی انجام می دهد.

اگر نگاهی مقایسه ای بین روش های کنترل فازی امپدانس و کنترل مود لغزشی داشته باشیم مشاهده می کنیم در روش کنترل فازی امپدانس میزان خطای حالت ماندگار به مراتب کمتر می باشد. اما زمان نشست کمی بیشتر شده، و به خصوص در حالت اغتشاش منفی فروجهش قابل ملاحظه ای داریم. اما در روش مود لغزشی در ازای از دست دادن دقت، به زمان نشست کوتاه تر و عدم هرگونه فروجهش دست پیدا می کنیم.

بنابراین با توجه به کاربرد سیستم تعلیق مغناطیسی و میزان اهمیت پارامترهای مختلف سیستم مورد نظر (میزان خطای حالت ماندگار و زمان نشست)، می توان کنترل کننده مطلوب برای هر سیستم را انتخاب کرد.

مراجع

- [1] Wu S. J., Wu C. T. & Chang Y. C. (2008), "Neural-Fuzzy Gap Control for a Current/Voltage-Controlled 1/4-Vehicle MagLev System", *IEEE Transaction on intelligent transportation systems*, Vol. 9, No.1, pp. 122-136.
- [2] Nataraj P. S. V. & Patil M.D.(2008), "Robust control design for nonlinear magnetic levitation system using Quantitative Feedback Theory (QFT)", 978-1-4244-2746-8/08/c 2008 IEEE.
- [3] Al-Muthairi N. F. & Zribi M.(2004), "Sliding mode control for a magnetic levitation system", *Mathematical Problems in Engineering*, 2, pp. 93-107.
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/maglev_train
- [5] Lee H.W., Kim K.C. & Lee J.(2006),"Review of maglev train technologies", *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 42, No. 7, pp. 1917-1925.
- [6] Peng C., Jie L., Kun Z., &Wensen C.(2010), "Design of the suspension controller based on compensating feedback linearization", International conference on measuring technology & mechatronics automation, pp. 1056-1059.
- [7] Hupiusova M., Osusuky J.(2010), "PID controller design for magnetic levitation model", International conference, Cybernetics And Informatics, Slovak Republic.
- [8] Liu H. Zhng X. & Chng W.(2009),"PID control to maglev train system", International Conference on Industrial and Information Systems, pp. 341-343.
- [9] Wong H. L., Hu C. & Wan F.(2009), "A simple fuzzy controller for the magnetic suspension system", FUZZ_IEEE Conference Competition, pp. 682-687, Korea.

- [10] Lee S.H., Sung H. K., Lim J. T. & Bien Z.(2000), "Self-tuning control of electromagnetic levitation systems", *Control engineering practice*, Elsevier science.
- [11] Seul J. Hsia T. C. & Bonits Robert G.(2004), "Force Tracking Impedance Control OF Robot Manipulators Under Unknown Environment", *IEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 12, No. 3.
- [12] Asada H. & Slotin E., "*Robot analysis & control*", John Wilay & Sons Inc.
- [13] Li Z. & Fang G. "Fuzzy impedance control for robots in complex spatial edge following", UN. Western Sydney.
- [14] Ott C., Albu-Schaffer A., Kugi A., Stramigioli S. & Hirzinger G., "A Passivity Based Cartesian Impedance Controller for Flexible Joint Robots- Part1: Torque Feedback and Gravity Compensation", Institute of Robotics and Mechatronics, Germany.
- [15] Asada H. & Asari Y.(1998), "The direct teaching of tool manipulation skills via the impedance identification of human motions", Department of applied system science, Kyoto, UN
- [16] Spong M. W., Hutchinson S. & Vidyasagar M.(2004), "*Robot dynamics and control*", 2nd edition, John Wilay & Sons, Inc.
- [17] Hacı A., Jezernic K. & Uran S.(1998), "Robot impedance control", Control applications, Proceedings of the 1998 IEEE International conference on, Vol. 1, pp. 583-587.
- [18] Brruzzone L. E., Molfino R. M., Zoppi M., "Mechatronics design of a parallel robot for high-speed, impedance controlled manipulation", University of Genova.
- [19] Brruzzone L. E., Molfino R. M.(2002), "Modeling and control of pen-in hole assembly performed by a translational robot", PMAR Robot design research group- University of Genova.
- [20] Yoshida K., Nakanishi H., Ueno H., Inaba N., Nishimaki T. & Oda M.(2004), "Dynamics, Control and Impedance Matching For Robotic Capture Of A Non-Cooperative Sattelite", *Advanced Robotics*, Vol. 18, No. 2, pp. 175-198.
- [21] Marcelo H., Jir A., Lin W. & Lim S. Y.(1999), "A Walk-Through Programmed Robot For Welding on Shipyards", *Industrial Robotic Journals*, Vol. 26, No. 5, pp. 377-388.

[22] Lim H-O., Setiawan Takanishi S. A.(2004), "Position-Based Impedance Control of a Biped Humanoid Robot", *Advanced Robotics*, Publisher: VSP, Vol. 18, No.4, pp.415-435.

[23] Nagata F., Watanabe K., Hashino S., Tanaka H., Matsuyama T. & Hara K.(2000), "Polishing robot using a joystick Controlled teaching system", Industrial Electronics Society, IECON 2000, 26th Annual Conference of the IEEE, Vol. 1, pp. 632-637.

[24] وانگ ل.(۱۳۸۸)، "سیستم های فازی و کنترل فازی"، تشنه لب م، صفارپور ن، افیونی د، چاپ پنجم،

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران-ایران

[25] اسلوتین ژ. ژ. ا.، لی و.(۱۳۸۹)، "کنترل غیرخطی کاربردی"، هاشمی گلپایگانی م. ر.، احمدوند م.،

جعفری ا. ه.، چاپ دوم، مرکز نشر دانشگاهی، تهران-ایران.

[26] Fateh M. M., Alavi S. S.(2009), "Impedance control of an active suspension system", *Mechatronics 19*, Elsevier, pp. 134-140.

Abstract

Magnetic levitation systems have practical importance in many engineering systems such as in high-speed maglev passenger trains, frictionless bearings, levitation of wind tunnel models, vibration isolation of sensitive machinery, levitation of molten metal in induction furnaces, and levitation of metal slabs during manufacturing. The maglev systems can be classified as attractive systems or repulsive systems based on the source of levitation forces. These kind of systems are usually open-loop unstable and are described by highly nonlinear differential equations which present additional difficulties in controlling these systems. Therefore, it is an important task to construct high-performance feedback controllers for regulating the position of the levitated object. In recent years, a lot of works have been reported in the literature for controlling magnetic levitation systems. In this thesis we use two control methods include sliding mode control and fuzzy- impedance control on a typical train magnetic levitation system and compare the performance of two controllers on it.

Keywords: *Magnetic levitation, Impedance control, Fuzzy control, Sliding mode control*