بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی
گروه برق
گرایش الکترونیک

کنترل مد لغزشی سیستم تعلیق الکترومغناطیسی

از:
سید عنایت اله تقوی مقدم

استاد راهنما :
دکتر حامد مجللی

استاد مشاور:
دکتر غلامرضا باقرسلیمی

شهریور ۱۳۸۹

تقدیم به:

پدرم و مادرم

که

همه ی هستی ام فدای یک نگاه مهربانانه شان باد.

تقدیر و تشکر

اکنون که به لطف حضرت حق، توفیق انجام این پایان‌نامه نصیبم شده است، بر خود لازم می‌دانم از همه عزیزانی که به نوعی در انجام این پایان‌نامه مدیون آنها هستم تشکر و سپاسگزاری کنم. نخست صمیمانه‌ترین تقدیر و تشکر را از جناب آقای **دکتر حامد مجللی** دارم که در تمامی مراحل این پایان‌نامه مرا راهنمایی و یاری نموده است. باشد که بتوانم الطاف ایشان را قدردان باشم. از زحمات استاد مشاورم جناب آقای **دکتر غلامرضا باقرسلیمی** نیز کمال تشکر را دارم. همچنین از زحمات جناب آقای مهندس **مصطفی اسلامی** قدردانی می‌نمایم. از خانواده‌ی مهربان و فداکارم که همواره پشتیبان و مشوق من بوده‌اند متواضعانه سپاسگذارم.

در نهایت تشکر می‌کنم از همه‌ی اساتیدی که در تمامی مراحل زندگی به من آموختند اندیشه ها را و اندیشیدن را.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... **ح**

چکیده فارسی ..... **د**

چکیده انگلیسی ..... **ذ**

فصل اول مقدمه **۱**

۱-۱- کاربرد سیستم های تعلیق مغناطیسی ۲

۱-۲- مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته ۳

۱-۳- اهداف و نوآوری‌های پایان‌نامه ۴

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم سیستم‌های تعلیق مغناطیسی؛ ساختار و معادلات دینامیکی **۷**

۲-۱- ساختار فیزیکی سیستم های تعلیق مغناطیسی ۸

۲-۲- معادلات دینامیکی ۱۰

فصل سوم کنترل مد لغزشی سیستم تعلیق مغناطیسی **۱۴**

۳-۱- روند طراحی کنترل‌کننده ۱۶

۳-۲- شرط لغزش ۱۸

۳-۲-۱- اصل لیاپانوف ۱۸

۳-۲-۲- روش خطی‌سازی ۱۹

۳-۲-۳- روش مستقیم ۱۹

۳-۳- زمان رسیدن حالت‌های سیستم به سطح لغزش ۲۱

۳-۴- سیگنال کنترل ۲۲
۳-۵- استفاده از لایه مرزی ثابت جهت هموارکردن سیگنال کنترل ۲۳
۳- ۶- کنترل مد لغزشی سیستم تعلیق مغناطیسی ۲۵
فصل چهارم نویز و اثرات آن بر عملکرد سیستم تعلیق مغناطیسی..... ۲۷
۴-۱- سیستم ایده آل ۲۹
۴-۲- مدل سازی نویز ۳۳
۴-۲-۱- سیستم با دینامیک نویزی و اندازه گیری ایده آل ۳۴
۴-۲-۲- سیستم با دینامیک و اندازه گیری نویزی ۳۴
فصل پنجم فیلتر کالمن ۳۸
۵-۱- فیلتر کالمن خطی‌سازی‌شده ۴۰
۵-۲- فیلتر کالمن‌تعمیم‌یافته ۴۳
۵-۳- فیلتر کالمن تعمیم‌یافته‌ی مرکب ۴۴
۵-۴- تخمین آماری ۴۶
۵-۴-۱- تبدیلات بی‌ادراک ۴۷
۵-۴-۲- فیلتر کالمن بی‌ادراک ۴۹
۵-۵- تخمین با اعمال محدودیت ۵۳
۵-۶- جمع‌بندی ۵۳
فصل ششم کنترل ترکیبی سیستم تعلیق مغناطیسی ۵۴
۶-۱- ترکیب HEKF و SMC ۵۷
۶-۲- ترکیب UKF و SMC..... ۵۹
۶-۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۶۶
منابع ۶۸

فهرست شکل‌ها

۱-۱ : ساختار و نحوه‌ی ارتباط بخش‌های مختلف پایان‌نامه ۶

۱-۲ : ساختار سیستم تعلیق مغناطیسی؛ الف) ساختار بلوک دیاگرامی، ب) ساختمان فیزیکی ۹

۲-۲ : ساختمان فیزیکی مدل اول ۱۰

۲-۳ : مدل دوم سیستم تعلیق مغناطیسی ۱۳

۱-۳ : مسیر حالت سطح لغزشی در کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۸

۳-۲: سطح لغزشی و پدیده چترینگ به دلیل ناپیوستگی سیگنال کنترل ۲۴

۳-۳ : کاهش چترینگ با استفاده از لایه مرزی؛ الف) لایه مرزی، ب) جایگذاری لایه قانون کنترل در لایه مرزی ۲۴

۴-۱ : موقعیت مکانی جسم معلق با استفاده از تابع $sat(.)$. چترینگ موجود در سیگنال کنترل ۳۰

۴-۲: قانون کنترل با استفاده از تابع $sgn(.)$. چترینگ موجود در سیگنال کنترل ۳۰

۴-۳ : سطح لغزش با استفاده از تابع $sgn(.)$. چترینگ قابل ملاحظه سطح لغزش ۳۱

۴-۴ : موقعیت مکانی جسم معلق با استفاده از تابع $tanh(.)$. کاهش قابل ملاحظه (در حد حذف) چترینگ ۳۱

۴-۵ : قانون کنترل با استفاده از تابع $tanh(.)$. کاهش قابل ملاحظه چترینگ موجود در سیگنال کنترل ۳۲

۴-۶: سطح لغزش با استفاده از تابع $tanh(.)$. چترینگ موجود در سیگنال کنترل. ۳۲

۴-۷ : موقعیت مکانی جسم معلق در حضور نویز دینامیک. لغزش‌های مختصر جسم در اثر نامعینی‌ها بوجود آمده‌اند..... ۳۵

۴-۸ : قانون کنترل در حالت دینامیک نویزدار ۳۵

۴-۹ : موقعیت جسم معلق در حالتی که علاوه بر دینامیک سیستم، اندازه گیری‌ها نیز نویزی باشند. ۳۶

۴-۱۰ : قانون کنترل در حضور نویز اندازه‌گیری و دینامیک سیستم ۳۶

۵-۱ : نحوه‌ی عملکرد فیلتر کالمن ۴۶

۶-۱ : مدل بلوک دیاگرام کنترل ترکیبی. بلوک فیلتر کالمن می‌تواند HEKF یا UKF باشد..... ۵۶

۶-۲: قانون کنترل ترکیبی. ناهمواریهایی در آن دیده می‌شوند. اما در عوض، پایدار بوده و جسم معلق را در مکان مطلوب قرار می‌دهد. ۵۸

۶-۳ : موقعیت مکانی واقعی و موقعیت تخمین‌زده‌شده توسط HEKF. دو منحنی تقریبا روی هم افتادند. هر چه زمان به جلو می‌رود، تخمین بهتر می‌شود. ۵۸

شکل ۶-۴ : موقعیت جسم و تخمین انجام‌شده توسط فیلتر. از ثانیه‌ی دوم به بعد نمودارها تقریبا روی هم افتاده‌اند. .. ۶۳

شکل ۶-۵ : سرعت جسم و تخمین انجام شده توسط فیلتر. از ثانیه‌ی دوم به بعد نمودارها تقریبا روی هم افتاده‌اند..... ۶۳

شکل ۶-۶ : متغیر θ_3 و تخمین مربوطه. ۶۴

شکل ۶-۷ : جریان سیم پیچ و تخمین انجام شده. ۶۴

شکل ۶-۸: قانون کنترل بدون اعمال فیلتر کالمن و با اعمال فیلتر. ناهمواری‌ها کاهش چشمگیری دارند. ۶۵

چکیده

کنترل مد لغزشی سیستم تعلیق الکترومغناطیسی
سید عنایت اله تقوی مقدم

در این پایان‌نامه روشی جدید مبتنی بر ترکیب فیلتر کالمن و کنترل مد لغزشی جهت کنترل سیستم تعلیق مغناطیسی با در نظر گرفتن نامعینی‌های دینامیک سیستم و نویز سیستم اندازه‌گیری پیشنهاد شده است. ابتدا کنترل‌کننده مد لغزشی به سیستم تعلیق مغناطیسی اعمال شده و برای کاهش پدیده‌ی چترینگ از روش کنترل لایه مرزی کمک گرفته شده است. سپس نامعینی‌ها به صورت نویز گوسی با میانگین صفر مدل‌سازی شده و نشان داده می‌شود که کنترل مد لغزشی در حالتی که دینامیک و اندازه‌گیری دارای نامعینی باشند، قادر به کنترل سیستم نیست. در نهایت برای رسیدن به کارآیی مطلوب کنترل، حالت توسعه یافته‌ی فیلتر کالمن جهت تخمین حالت سیستم به کار گرفته شده و کارآیی مطلوب کنترل‌کننده سیستم تعلیق مغناطیسی با ترکیب فیلتر کالمن و کنترل مد لغزشی با استفاده از شبیه‌سازی بررسی می‌شود.

واژگان کلیدی: سیستم تعلیق مغناطیسی، کنترل مد لغزشی، فیلتر کالمن تعمیم‌یافته.

Abstract

Sliding Mode Control of Electromagnetic Levitation System
Sayyed Enayatollah Taghavi Moghaddam

A new approach using a combination of Kalman Filter (KF) and sliding mode control (SMC) is proposed to control a magnetic levitation system with uncertainty in the system dynamics and the output measurement system. First, the sliding mode controller is applied to the magnetic levitation system. Chattering phenomenon, which appeared in the control law of the SMC, is eliminated using a method according to the Boundary Layer Control. Then, the uncertainties are modeled as Gaussian zero-mean noises and then it is shown that the SMC cannot control the plant in the presence of the uncertainty in both magnetic levitation and output measurement systems. Finally, the Extended Kalman Filter is used to estimate the state of the system and the efficiency of such combined control system is verified by the simulations and the performance parameter.

Keywords — Magnetic levitation (Maglev), Sliding Mode Control (SMC), Extended Kalman Filter (EKF).

فصل اول

مقدمه

فصل اول

مقدمه

یکی از روش‌های معلق نگه داشتن جسم فلزی در فضا بدون اتصال فیزیکی، استفاده از نیروی دافعه یا جاذبه‌ی بین قطب‌های مغناطیسی است. اگر نیروی الکترومغناطیسی بتواند بر وزن جسم غلبه کند، آن جسم در فضا می‌ماند. این روش را تعلیق مغناطیسی[۱] می‌نامند. تعلیق مغناطیسی به دلیل عدم نیاز به هر گونه ارتباط فیزیکی با جسم معلق کارایی بهتری نسبت به تعلیق مکانیکی[۲] دارد. زیرا در تعلیق مغناطیسی جسم تنها با اصطکاک هوا روبروست که در بسیاری از کاربردهای عملی با توجه به ناچیز بودن آن می‌توان از آن صرفنظر کرد. البته یکی از معایب تعلیق مغناطیسی محدود بودن جنس جسم معلق به فلز یا جسم مغناطیسی و نیاز به استفاده از واسطه‌ی فلزی جهت معلق نگه داشتن اجسام غیرفلزی است. در حالیکه در تعلیق مکانیکی چنین محدودیتی وجود ندارد.

۱-۱- کاربرد سیستم های تعلیق مغناطیسی

کارایی سیستم های مهندسی مبتنی بر روش تعلیق مغناطیسی در بسیاری از کاربردهای عملی بررسی و مورد تایید قرار گرفته است. از جمله مهمترین این کاربرد ها می‌توان به قطارهای مغناطیسی موسوم به Maglev اشاره کرد[۱-۲]. در این نوع قطارها هیچ

[۱] Magnetic levitation
[۲] Mechanical levitation

گونه تماسی بین قطار و ریل وجود ندارد و قطار با غلتش چرخ‌ها، با استفاده از نیروی مغناطیسی در فاصله‌ی معینی از ریل و در حالت شناور به طرف جلو رانده می شود. قطارهای مغناطیسی نسبت به قطارهای مرسوم مزایای زیادی دارند که از آن جمله می-توان به ایمنی بالا، ارتعاش کم، سرعت بالا و شعاع کم برای چرخش اشاره کرد. از دیگر کاربردهای سیستم‌های تعلیق مغناطیسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- یاتاقان‌های مغناطیسی[۱] [۳]
- ایزوله سازی لرزش به کمک تعلیق مغناطیسی[۴]
- تعلیق اجسام مورد آزمایش در تونل باد [۵]
- تعلیق مخازن حاوی مواد هسته‌ای در نیروگاه‌های هسته ای[۶]

۱-۲- مروری بر پژوهش های انجام گرفته

با توجه به گسترش روزافزون کاربردهای سیستم تعلیق در زمینه های مختلف صنعت، به طور طبیعی اهمیت کنترل این سیستم‌ها نیز افزایش می‌یابد. طراحی، شبیه سازی و پیاده سازی کنترل‌کننده‌هایی که موقعیت جسم معلق را در سیستم تعلیق مغناطیسی در یک وضعیت خاص نگه دارد یا اینکه جسم معلق را در یک مسیر مرجع از پیش تعیین شده قرار دهد، در سال های اخیر موضوع بسیاری از مقالات و پژوهش های صورت گرفته بوده است. این نوع سیستم‌ها، معمولا به صورت حلقه باز ناپایدارند و مدل دینامیکی آنها با معادلات غیرخطی مرتبه‌ی بالا توصیف می‌شود که باعث مشکل کردن عمل کنترل در آنها می‌شود.

در برخی از پژوهش‌ها، تکنیک خطی سازی فیدبک در طراحی قانون کنترل بکار گرفته شده است [۷]. از آنجا که در این روش مدل ساده شده‌ی سیستم جهت کنترل به کار گرفته شده، فقط پارامترهای نامی در فرایند طراحی شرکت داده می‌شوند و این معمولا مشکلاتی را در میزان کارایی کنترل کننده بوجود می آورد. در برخی دیگر از پژوهش‌ها دینامیک غیرخطی سیستم با استفاده از بسط سری تیلور تقریب زده شده و از جملات مرتبه‌ی بالای بسط صرفنظر کرده و در نهایت معادله دینامیکی سیستم به یک معادله‌ی مرتبه‌ی دوم ساده سازی شده است [۸]. لذا در این حالت نیز بدلیل تقریب صورت گرفته، طراحی کنترل کننده با کارایی بالا بسیار دشوار است زیرا به‌رغم آنکه پایداری سیستم به طور تئوری تضمین شده است، اما آزمایش های عملی حاکی از عملکرد نامطلوب حالت گذرای سیستم (نوسان و فراجهش زیاد پاسخ گذرا) می‌باشد که باعث می‌شود کاربرد عملی این کنترل کننده در عمل ناممکن شود. کنترل‌کننده‌های خطی مقاوم مانند کنترل بهینه H_∞ و سنتز μ_∞ نیز به سیستم تعلیق مغناطیسی اعمال

[۱] Magnetic bearings

شده‌اند [۹-۱۰]. طراحی قانون کنترل بر اساس صفحه‌ی فاز[۱۱]، و استفاده از سیستم‌های با ساختار متغیر از دیگر روش‌های کنترلی پیشنهاد شده است[۱۲]. کنترل فازی[۱۳] و کنترل مبتنی بر شبکه های عصبی [۱۴] نمونه های دیگری از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه هستند.

به طور کلی دو مسئله اساسی در طراحی کنترل‌کننده برای سیستم تعلیق الکترومغناطیسی، پایداری و کارایی کنترل در حضور نامعینی‌ها[۱] و اختلالات خارجی است. کنترل مد لغزشی[۱] (SMC) یکی از موثرترین روش‌های کنترل مقاوم[۲] است. زیرا در این روش وقتی سیستم در مد لغزش قرار می‌گیرد، در برابر نامعینی‌ها و اختلالات خارجی مقاوم و بدون تغییر خواهد ماند[۱۵].

در این پایان نامه از کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی استفاده شده است. زیرا خاصیت مقاوم بودن کنترل‌کننده و تضمین پایداری آن با استفاده از اصل قدرتمند لیاپانوف سبب شده است تا این روش کنترلی در کاربردهای عملی بسیاری از جمله کنترل ارتفاع ماهواره [۱۶]، کنترل موشک های هدایت شونده [۱۷] و رباتیک [۱۸] مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۳- اهداف و نوآوری های پایان نامه

هدف از تدوین این پایان‌نامه، ارائه‌ی یک روش جدید جهت کنترل سیستم تعلیق مغناطیسی است به گونه‌ای که در عین داشتن کارایی مطلوب در قرار دادن جسم معلق در یک موقعیت دلخواه، ملاحظات مربوط به استفاده از کنترل‌کننده را در کاربردهای عملی شامل شود.

در تحقیقات انجام گرفته در حوزه‌ی کنترل سیستم‌های تعلیق مغناطیسی، طراحی کنترل‌کننده بر این اساس صورت گرفته که حالت دقیق سیستم (موقعیت مکانی و سرعت حرکت جسم معلق) در دسترس است و سپس قانون کنترل محاسبه شده است. به عبارت دیگر سیستم اندازه‌گیری ایده‌آل فرض شده است. اما همان گونه که می‌دانیم، سیستم‌های اندازه‌گیری واقعی که در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسته به میزان دقت آنها، همواره تحت تاثیر نویز هستند. به عبارت دیگر دارای مقادیری از نامعینی و عدم دقت هستند که روی هم رفته به آنها خطای اندازه گیری می‌گویند. در این پایان نامه تلاش شده است تا اثر نامطلوب نویزهای سیستم اندازه گیری بر کارایی کنترل کننده‌ی مد لغزشی سیستم تعلیق مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته و سپس جهت کم کردن این اثر نامطلوب از یک روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب دو اصل تخمین وکنترل استفاده گردد. بدین معنی که ابتدا حالت سیستم، که توسط سیستم اندازه گیری تعیین شده است، به کمک فیلتر کالمن تخمین زده می شود تا اثر نویز سیستم اندازه‌گیری

[۱] Sliding Mode Control
[۲] Robust Control

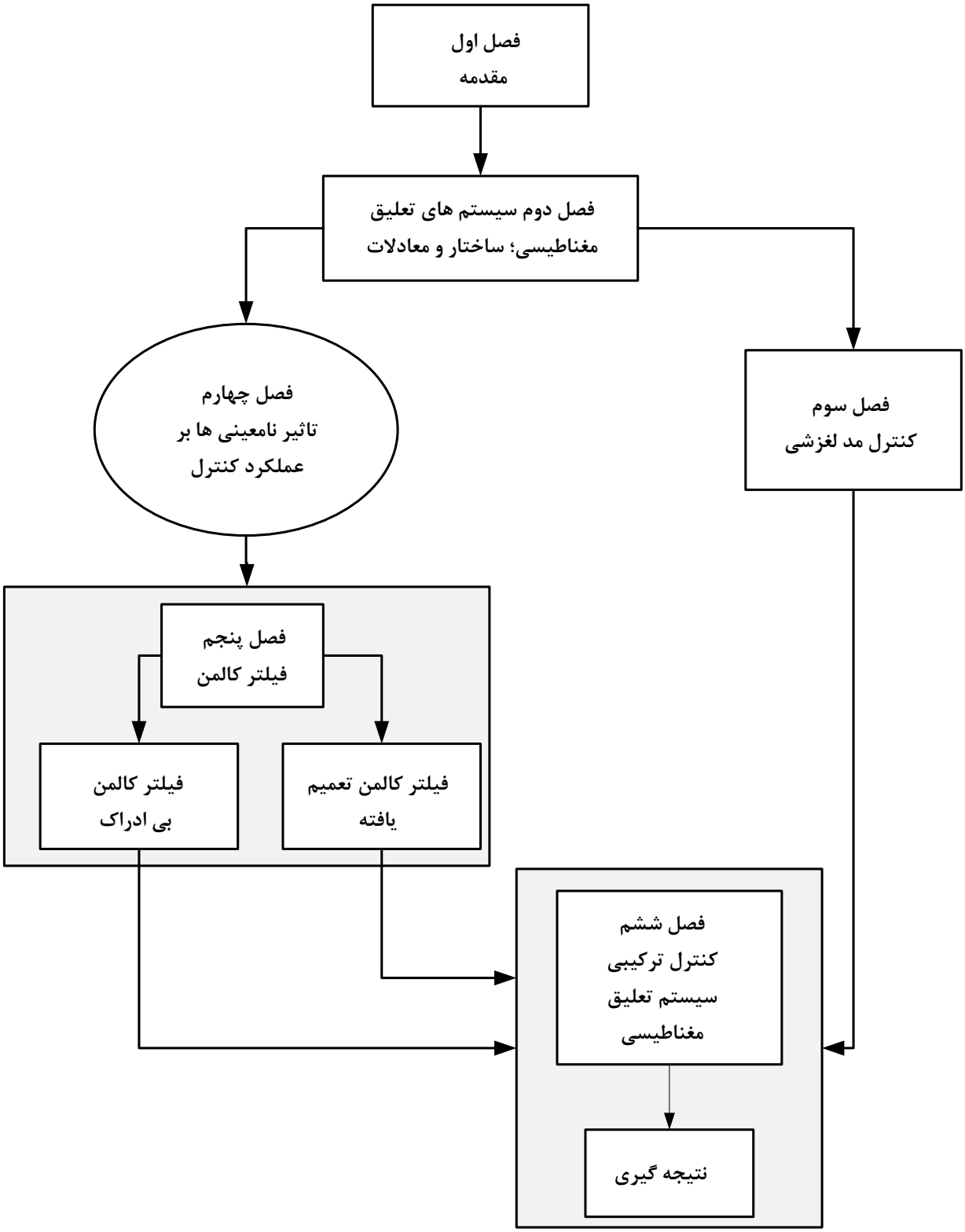
تا حد امکان کاهش یابد و در مرحله‌ی بعد از حالت تخمین زده شده جهت کنترل مد لغزشی سیستم تعلیق مغناطیسی استفاده شده است. در نهایت کارایی رهیافت کنترلی پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی های کامپیوتری و محاسبه‌ی پارامتر کارایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۴- ساختار پایان نامه

به طور اجمالی می‌توان ساختار پایان‌نامه را چنین بیان کرد:

فصل دوم به بررسی ساختار فیزیکی و معادلات ریاضی بیان کننده‌ی رفتار دینامیکی سیستم‌های تعلیق مغناطیسی می‌پردازد. دو مدل از مدل‌های سیستم تعلیق مغناطیسی ارائه شده در پژوهش‌ها و مقالات در پایان نامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل سوم اصول کنترل مد لغزشی و نحوه‌ی استفاده از آن در سیستم تعلیق مغناطیسی بیان می‌شود. بررسی نویزهای دینامیک سیستم و اندازه‌گیری و اثرات آن‌ها بر کارایی عمل کنترل در مدل اول سیستم تعلیق مغناطیسی موضوع بحث فصل چهارم است. نحوه‌ی تخمین حالت دینامیک سیستم‌های تحت تاثیر نویز توسط فیلتر کالمن تعمیم یافته[۱] (EKF) و فیلتر کالمن بی‌ادراک[۲] (UKF) در فصل پنجم مورد بحث قرار می‌گیرند. فصل ششم به معرفی روش کنترل ترکیبی پیشنهاد داده شده (ترکیب فیلتر کالمن به عنوان یک ابزار تخمین زننده و کنترل مد لغزشی) پرداخته و ضمن تشریح روند انجام عملیات مربوط به کنترل ترکیبی، کارایی روش ارائه شده را با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و محاسبه مقدار موثر خطای عمل کنترل را بررسی می‌کند. برای آنکه فصل ششم، به نوعی خلاصه‌ای از تمامی مباحث انجام شده در این تحقیق باشد، در این فصل طراحی کنترل کننده‌ی مد لغزشی، بررسی اثرات نویز و نحوه‌ی استفاده از فیلتر کالمن در تخمین حالت سیستم با تکیه بر مدل دوم آورده شده است. لازم بذکر است که بررسی‌های و تحقیقات انجام گرفته‌ی مولف در فصول چهارم و ششم آورده شده اند. در پایان فصل ششم، پیشنهاداتی جهت توسعه و بهبود روش پیشنهاد شده ذکر شده است. شکل ۱-۱ ساختار و نحوه‌ی ارتباط بخش های مختلف پایان‌نامه را نشان می‌دهد.

[۱] Extended Kalman Filter
[۲] Unscented Kalman Filter



شکل ۱-۱: ساختار و نحوه‌ی ارتباط بخش‌های مختلف پایان‌نامه

فصل دوم

سیستم های تعلیق مغناطیسی؛

ساختار و معادلات دینامیکی

فصل دوم

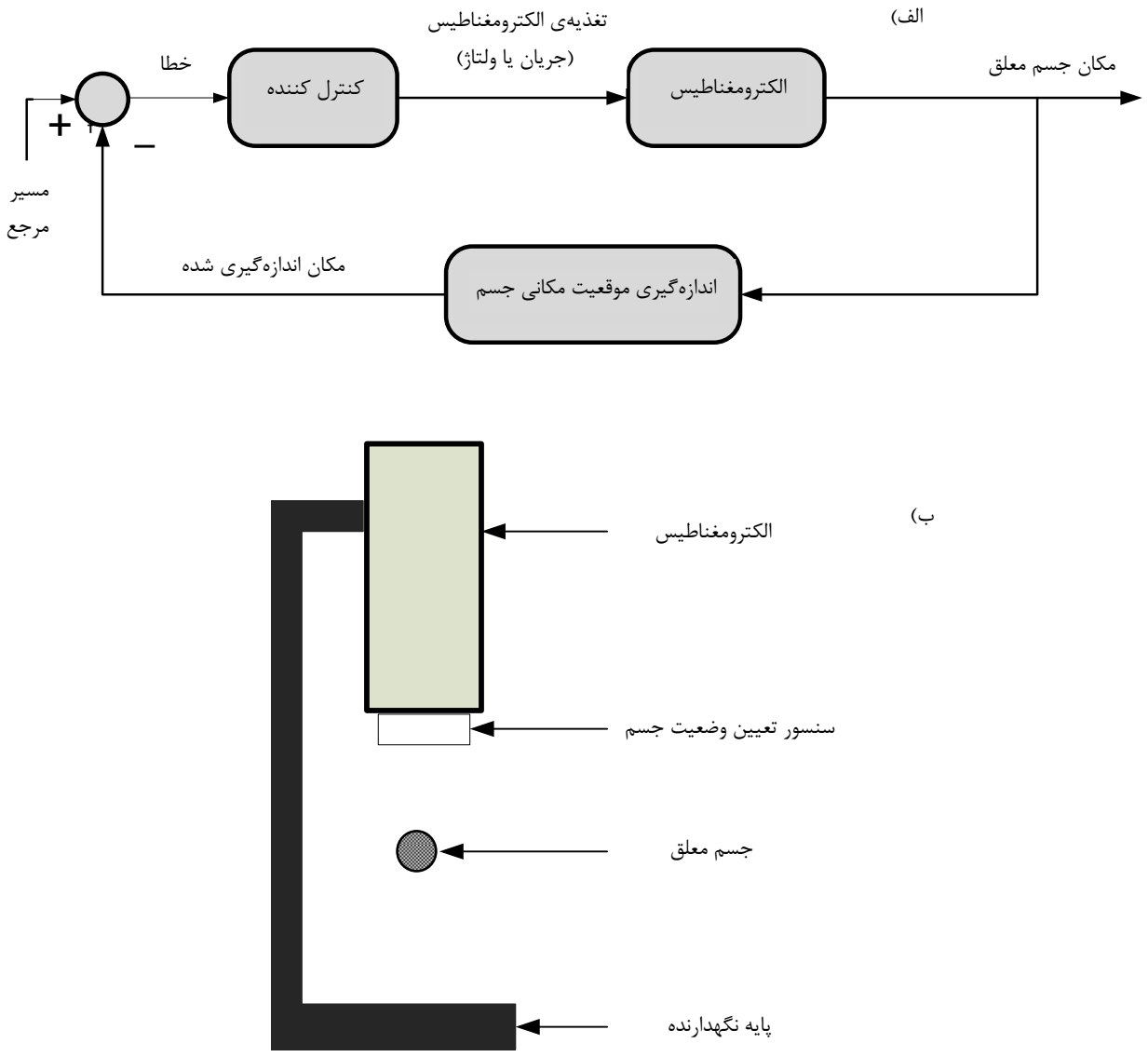
۲-۱- ساختار فیزیکی سیستم های تعلیق مغناطیسی

همان‌گونه که در فصل پیش بیان شد، سیستم تعلیق مغناطیسی بر مبنای استفاده از نیروی مغناطیسی جهت غلبه بر وزن جسم و معلق نگه داشتن آن در فضا کار می‌کند. با توجه به نوع نیروی الکترو مغناطیسی به کار رفته، می‌توان این سیستم‌ها را به دو نوع جذبی[۱] (استفاده از نیروی جاذبه مغناطیسی) و دفعی[۲] (استفاده از نیروی دافعه مغناطیسی) تقسیم بندی کرد. ساختار نمادین سیستم به صورت فیزیکی و بلوک دیاگرامی در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل نمایش داده شده است، سیستم تعلیق مغناطیسی شامل سه بخش عمده است:

- الکترومغناطیس
- اندازه‌گیری موقعیت مکانی جسم
- کنترل‌کننده

نیروی مغناطیسی لازم در در بخش الکترومغناطیس تولید می‌شود. این نیرو می‌تواند توسط یک آهن ربا یا سیم پیچ حامل جریان نیز تولید شود.

[۱] Attraction type
[۲] Repulsion type



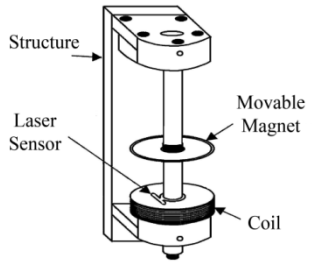
شکل ۲-۱ :ساختار سیستم تعلیق مغناطیسی؛ الف) ساختار بلوک دیاگرامی ، ب) ساختار فیزیکی

با توجه به مشکلات ساخت مغناطیس دائم و نیاز به نیروی مغناطیسی زیاد، در کاربردهای عملی معمولا از سیم پیچ حامل جریان استفاده می‌شود. جسم معلق نیز می تواند آهن ربا یا فلز باشد. توجه کنید که شکل ۲-۱ به صورت نمادین ترسیم شده است. در حالت کلی، با توجه به جذبی یا دفعی بودن سیستم و همچنین آهن‌ربا یا فلز بودن جسم معلق، الکترومغناطیس می‌تواند در بالا یا پایین جسم معلق قرار گیرد. برای جلوگیری از چسبیدن جسم به الکترومغناطیس یا سقوط جسم به زمین و نگه داشتن جسم در یک ارتفاع دلخواه قابل تنظیم، لازم است وضعیت مکانی جسم نسبت به الکترومغناطیس اندازه‌گیری شده و به صورت فیدبک به مدار کنترل اعمال شود تا فرمان لازم صادر شود. در این سیستم پارامتر کنترل، جریان (یا ولتاژ) ورودی به سیم پیچ و ورودی مدار

کنترل عبارتست از اختلاف بین وضعیت مطلوب و وضعیت فعلی جسم معلق است. تغییر جریان باعث تغییر میدان مغناطیسی سیم پیچ و لذا تغییر نیروی الکترومغناطیسی می‌شود. لذا با تنظیم میزان جریان ورودی به سیم پیچ می‌توان وضعیت جسم معلق را کنترل کرد. تعیین موقعیت جسم معلق به طرق مختلفی می‌تواند صورت گیرد. یکی از این روش‌ها استفاده از روش نوری است. در این روش یک پرتو نوری از بالا به پایین همراستا با الکترومغناطیس تابانده می‌شود و درست زیر الکترومغناطیس یک سنسور نوری قرار داده می‌شود. هر چه جسم معلق به سنسور نزدیکتر شود، نور کمتری به سنسور می‌رسد و بالعکس. از خروجی سنسور برای کنترل میزان نیروی الکترومغناطیسی جهت کنترل وضعیت جسم معلق استفاده می‌شود. عیب این روش حساس بودن سنسور به شکل جسم معلق و دشواری‌های مربوط به تنظیم دقیق راستای پرتو تابشی با جسم و سنسور است. روش دیگر، اندازه‌گیری خازنی است. یک ورقه‌ی کوچک فلزی زیر الکترومغناطیس قرار داده شده و از ظرفیت خازنی بین جسم و صفحه فلزی جهت اندازه‌گیری فاصله استفاده می‌شود. مزیت این روش در خطی بودن رابطه‌ی خازن وفاصله (فارغ از شکل جسم معلق) است. همان‌گونه که می‌دانیم :

$$C = \varepsilon_0 \epsilon_r \, A/d \qquad (۱-۲)$$

که در آن C ظرفیت خازنی، ε_0 و ϵ_r به ترتیب قابلیت گذردهی خلا و ثابت نسبی دی الکتریک ، A سطح موثر و d فاصله‌ی بین جسم و الکترومغناطیس است. عیب این روش، اثر نامطلوبیست که صفحه قرار گرفته در زیر الکتروومغناطیس بر رفتار مغناطیسی سیستم دارد. روش‌های دیگری مانند استفاده از سنسور اثر هال[۱] و فرستنده مافوق صوت[۲] نیز وجود دارند.



شکل ۲-۲ : ساختمان فیزیکی مدل اول

۲-۲- معادلات دینامیکی

چندین مدل دینامیکی در مدل‌سازی ریاضی رفتار سیستم تعلیق مغناطیسی پیشنهاد شده است [۱۹-۲۱]. در اینجا، تنها مدل‌هایی که شبیه سازی‌ها بر مبنای آن‌ها انجام گرفته‌اند، مورد بررسی قرار می گیرند (البته تمامی مدل های ریاضی سیستم‌های تعلیق

[۱] Hall effect
[۲] Ultrasonic