۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–مکاترونیک

طراحی و ساخت سیستم گوی معلق مغناطیسی

توسط:

یاسر صفری سیاهکل

استاد راهنما:

دکتر محمد تشنه لب

استاد مشاور:

دکتر مهدی علیاری شوره‌دلی

زمستان ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیّه هیئت داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهایی پایان نامه خانم / آقای: یاسر صفری سیاهکل

را با عنوان: **طراحی و ساخت گوی معلق مغناطیسی**

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی/ کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱ – استاد راهنما	دکتر محمد تشنه لب	استاد	
۲ – استاد مشاور	دکتر مهدی علیاری شوره‌دلی	استادیار	
۳ – استاد مشاور			
٤ – استاد ممتحن	دکتر محمدعلی نکوئی	دانشیار	
٥ – استاد ممتحن	دکتر علیرضا فاتحی	دانشیار	
٦ – نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدعلی نکوئی	دانشیار	

تقدیم به همسرم؛

که با لطف و محبت فراوانش مشقت تحصیل را برایم قابل تحمل کرد

با تشکر و قدردانی فراوان از اساتید محترم؛

جناب آقای دکتر تشنه‌لب

و

جناب آقای دکتر علیاری

به خاطر همراهی و مساعدت بی‌پایانشان در طول تحصیل

چکیده

محققان در روشهای کنترلی، همیشه دنبال ایده های جدید با پیچیدگیهای جالب که در دنیای واقعی با آن روبرو هستند می باشند. یکی از این سیستم های مطرح در مهندسی کنترل، سیستم گوی معلق مغناطیسی می باشد. سیستم گوی معلق مغناطیسی با توجه به عملکرد غیرخطی، سیستمی ایده آل با ویژگیهای خاص برای اعمال کنترل کننده‌های مختلف می‌باشد. در این پایان نامه بعد از طراحی کامل سیستم شامل سیم‌پیچ و مدار الکترونیکی اقدام به ساخت سیستم گوی معلق مغناطیسی گردید. از سنسور مادون قرمز برای اندازه گیری موقعیت استفاده شده است و خروجی کنترل‌کننده نیز با یک طبقه ترانزیستوری به سیستم اعمال شد. در بخش طراحی کنترل کننده نیز کنترل کننده های PID و SVFC مورد شبیه سازی قرار گرفت. در قسمت پیاده سازی عملی کنترل کننده نیز کنترل کننده PID و کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر پیاده سازی شد که جواب آن تقریباً قابل قبول می باشد.

کلید واژه: گوی معلق مغناطیسی، کنترل کننده PID، کنترل کننده SVFC و کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- طرح کلی پایان نامه ۱

۱-۲-۱- تعریف مسئله ۱

۱-۲-۲- مزایای طراحی سیستم گوی معلق مغناطیسی ۴

۱-۲-۳- هدف ۴

۱-۳- تاریخچه ۵

۱-۳-۱- شرکت Quanser ۵

1-3-2- شرکت Bytronic ۷

۱-۳-۳- شرکت تحقیقاتی Barry's Coilgun ۸

۱-۳-۴- دانشگاه MIT ۱۰

۱-۳-۵- دستگاه Maglev دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ۱۱

۱-۴- جمع بندی ۱۲

فصل ۲- ساخت سیستم Maglev ۱۳

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- ساخت بدنه ۱۳

2-3- گوی‌های فلزی ۱۴

۲-۴- طراحی مدار الکترونیکی ۱۵

۲-۴-۱- مدار تغذیه ۱۵

۲-۴-۲- مدار اندازه گیر موقعیت ۱۶

۲-۴-۳- مدار قدرت ۱۷

۲-۴-۴- مدار محافظت اضافه ولتاژ ۱۹

۲-۴-۵- مدار ارتباط با کامپیوتر ۲۰

۲-۴-۶- مدار الکتریکی نهایی ۲۰

۲-۴-۷- سیم‌پیچ (آهنربای الکتریکی) ۲۴

۲-۵- جمع بندی ۳۱

فصل ۳- مدل‌سازی سیستم ۳۲
۳-۱- مقدمه ۳۲
۳-۲- مدل‌سازی ریاضی ۳۲
۳-۲-۱- مدل مکانیکی ۳۳
۳-۲-۲- مدل الکتریکی ۳۴
۳-۲-۳- مدل کلی سیستم ۳۶
۳-۳- مدل خطی سیستم ۳۷
فصل ۴- طراحی کنترل‌کننده ۴۰
۴-۱- مقدمه ۴۰
۴-۲- تعریف مسئله کنترلی ۴۰
۴-۳- پاسخ سیستم حلقه باز به ورودی ضربه ۴۱
۴-۴- محل قطب‌های حلقه باز سیستم ۴۱
۴-۵- کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی ۴۲
۴-۶- شبیه سازی اعمال کنترل کننده PID بر روی سیستم ۴۳
۴-۷- طراحی کنترل کننده با کنترل فیدبک بردار حالت – جایابی قطب ۴۴
۴-۷-۱- جایابی قطب برای داشتن قطب‌های مشخص ۴۵
۴-۷-۲- جایابی قطب برای داشتن زمان نشست و فرا جهش مشخص ۴۸
۴-۸- نتیجه گیری ۵۱
فصل ۵- نتایج، پیاده سازی و پیشنهادات ۵۲
۵-۱- مقدمه ۵۲
۵-۲- پیاده سازی کنترل کننده PID ۵۲
۵-۳- کنترل فیدبک بردار حالت ۵۲
۵-۴- کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر ۵۲
۵-۵- نتیجه گیری ۵۷
فصل ۶- پیشنهادات ۵۸
ضمیمه أ -نقشه برش و مونتاژ بدنه ۵۹
ضمیمه ب -نقشه تغذیه ۶۴

فهرست مراجع..... ۶۵

واژه نامه فارسی به انگلیسی..... ۶۶

واژه نامه انگلیسی به فارسی..... ۶۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: مشخصات Maglev ساخته شده توسط شرکت Quanser[۳] ۶
جدول ۱-۲: مشخصات ظاهری سیستم گوی معلق مغناطیسی ساخت Bytronic ۸
جدول ۱-۳ مشخصات سیستم Maglev ساخت شرکت Barry's Coilgun [۵] ۱۰
جدول ۲-۱: مشخصات سیم‌پیچ ساخته شده ۳۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: شکل ساده سیستم گوی معلق مغناطیسی [۱] ۲
شکل ۱-۲: یک نمونه از اندازه گیری موقعیت گوی معلق مغناطیسی [۲] ۳
شکل ۱-۳: نمونه Maglev ساخت شرکت Quanser [۳] ۵
شکل ۱-۴: سیستم Maglev ساخت شرکت Bytronic [۴] ۷
شکل ۱-۵: سیستم Maglev آزمایشگاهی ساخت شرکت Barry's Coilgun [۵] ۹
شکل ۱-۶: نمونه های دیگری از سیستم Maglev ساخته شده توسط Barry's Coilgun [۵] ۹
شکل ۱-۷: نمونه ساخته شده در دانشگاه MIT در حال کار ۱۱
شکل ۱-۸: سیستم ساخته شده در پروژه Maglev دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ۱۱
شکل ۲-۱: طرح شبیه سازی بدنه در نرم افزار Catia ۱۴
شکل ۲-۲: گوی‌های مختلف با اندازه های متنوع برای آزمایش عملکرد سیستم ۱۵
شکل ۲-۳: طرح شماتیک اولیه برای مدار فرستنده و گیرنده مادون قرمز ۱۶
شکل ۲-۴: طرح اصلاح شده مدار گیرنده و فرستنده مادون قرمز ۱۷
شکل ۲-۵: طرح اولیه مدار راه انداز سیم‌پیچ (PWM) ۱۸
شکل ۲-۶: طرح اصلاح شده مدار راه انداز سیم پیچ ۱۸
شکل ۲-۷: طرح اصلاح شده مدار راه انداز سیم پیچ ۱۹
شکل ۲-۸: دیود هرز گرد برای حذف ولتاژ برگشتی ۲۰
شکل ۲-۹: مدار نهایی کنترل کننده و واسط کامپیوتر با AVR ۲۱
شکل ۲-۱۰: مدار کنترل کننده و واسط کامپیوتر با میکروکنترلر ARM ۲۱
شکل ۲-۱۱: برد الکترونیکی رابط بین سخت افزار و میکروکنترلر ۲۲
شکل ۲-۱۲: برد الکترونیکی رابط بین میکروکنترلر و راه انداز ۲۲
شکل ۲-۱۳: برد نهایی کنترل کننده و واسط کامپیوتر با ARM ۲۳
شکل ۲-۱۴: طرح شبیه سازی شده سیم‌پیچ در نرم افزار Flux ۲۵
شکل ۲-۱۵: توزیع میدان الکترومغناطیسی اطراف هسته شبیه سازی شده در نرم افزار Flux ۲۶
شکل ۲-۱۶: تغییر جهت میدان الکترومغناطیسی از حالت افقی به عمودی در نزدیکی گوی فلزی شبیه سازی شده در نرم افزار Flux ۲۶

شکل ۲-۱۷: زیاد شدن میدان الکترومغناطیسی با زیاد کردن ولتاژ شبیه سازی شده در نرم افزار Flux..... ۲۷
شکل ۲-۱۸: نمودار تغییر جریان در سیم‌پیچ شبیه سازی شده در نرم افزار Flux..... ۲۸
شکل ۲-۱۹: نمودار تغییر نیرو با زمان شبیه سازی شده در نرم افزار Flux..... ۲۸
شکل ۲-۲۰: توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته و اطراف آن شبیه سازی شده در نرم افزار Flux..... ۲۹
شکل ۲-۲۱: توزیع چگالی شار الکترومغناطیسی بین گوی و هسته شبیه سازی شده در نرم افزار Flux..... ۲۹
شکل ۲-۲۲: شکل نهایی سیم‌پیچ ساخته شده در پروژه Maglev..... ۳۰
شکل ۳-۱: سیستم خلاصه شده گوی معلق مغناطیسی [۱]..... ۳۲
شکل ۳-۲: مدل قسمت مکانیکی سیستم گوی معلق مغناطیسی..... ۳۳
شکل ۳-۳: مدل قسمت الکتریکی سیستم گوی معلق مغناطیسی..... ۳۵
شکل ۴-۱: شمای بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته گوی معلق مغناطیسی..... ۴۰
شکل ۴-۲: پاسخ ورودی ضربه به سیستم گوی معلق مغناطیسی..... ۴۱
شکل ۴-۳: مکان هندسی ریشه های سیستم حلقه باز..... ۴۲
شکل ۴-۴: نمودار بلوک دیاگرامی سیستم و کنترل کننده PID..... ۴۳
شکل ۴-۵: خروجی حاصل از اعمال کنترل کننده PID به سیستم..... ۴۴
شکل ۴-۶: نحوه پیاده سازی کنترل کننده تنظیم برای ورودی مرجع ثابت غیر صفر بدون استفاده از متغیرهای افزایشی[۱۰]..... ۴۵
شکل ۴-۷: نمودار موقعیت گوی با اعمال کنترل فیدبک بردار حالت (قطب‌های ۵-)..... ۴۷
شکل ۴-۸: نمودار سرعت گوی با اعمال کنترل فیدبک بردار حالت (قطب‌های ۵-)..... ۴۷
شکل ۴-۹: نمودار موقعیت گوی با اعمال کنترل فیدبک بردار حالت (زمان نشست ۰/۳ ثانیه و فرا جهش ۹/۵٪)..... ۴۹
شکل ۴-۱۰: نمودار سرعت گوی با اعمال کنترل فیدبک بردار حالت (زمان نشست ۰/۳ ثانیه و فرا جهش ۹/۵٪)..... ۵۰
شکل ۴-۱۱: نمودار سرعت گوی با اعمال کنترل فیدبک بردار حالت (زمان نشست ۰/۳ ثانیه و فرا جهش کمتر)..... ۵۰
شکل ۵-۱: نمودار بلوک دیاگرامی کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر..... ۵۳
شکل ۵-۲: کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر پیاده سازی شده بر روی سیستم..... ۵۳
شکل ۵-۳: اعمال کنترل کننده PID بین خروجی کنترل کننده و سیستم..... ۵۴
شکل ۵-۴: خروجی واقعی و خروجی مرجع با اعمال کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر..... ۵۵
شکل ۵-۵: خروجی کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر..... ۵۶

شکل ۵-۶: سیگنال واقعی جریان در مقایسه با سیگنال خروجی کنترل کننده تناسبی با بهره متغیر ۵۶
شکل ۵-۷: خروجی کنترلی PID جریان ۵۷
شکل أ-۱: قسمت پایین بدنه ۵۹
شکل أ-۲: قسمت بالای بدنه ۶۰
شکل أ-۳: قسمت‌های چپ و راست بدنه ۶۱
شکل أ-۴: قسمت پایین میانی ۶۲
شکل أ-۵: قسمت بالای میانی ۶۳
شکل أ-۶: قسمت‌های چپ و راست میانی ۶۴

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

می‌دانیم که اگر دو ماده مغناطیسی را در نزدیکی یکدیگر قرار دهیم یکی از آن‌ها با قدرت زیاد به سمت دیگری می‌پرد و یا از آن دور می‌شود. قدرت جذب یا دفع دو ماده مغناطیسی به اندازه دو ماده و شدت نیروی الکترومغناطیسی موجود در آن‌ها بستگی دارد. در سال ۱۸۴۲ میلادی، ساموئل ارنشا[1] انحراف اشیاء مغناطیسی را در نظریه خود تشریح کرد. او در نظریه خود نشان داد که هیچ‌گاه نمی‌توان یک آهنربا را بالا یا پایین یک آهنربای دیگر به صورت معلق نگه داشت. حتی ترکیب آهنرباها نیز نمی‌توانند این مشکل را برطرف کنند. با این حال یک مدار کنترلی فعال می‌تواند با تنظیم سریع قدرت مغناطیسی بر این مشکل غلبه کند.

۱–۲– طرح کلی پایان نامه

پروژه گوی معلق مغناطیسی پروژه ای بسیار جالب و البته محبوب برای حرکت در راستای قائم یک گوی فلزی می‌باشد که هدف ثابت نگه داشتن گوی فلزی است. در حالت‌های پیشرفته تر می‌توان موقعیت، سرعت و شتاب گوی را کنترل کرد که در این پایان نامه هدف کنترل موقعیت گوی است. اساس کار یک مسئله دینامیکی تعادلی است و در این بخش به معرفی آن می‌پردازیم.

۱–۲–۱– تعریف مسئله

می‌دانیم که زمین بر هر جسمی نیروی کششی وارد می‌کند که با جرم آن جسم رابطه مستقیم دارد. این نیرو از رابطه (۱-۱) بدست می‌آید.

$$F_g = M_b g \qquad (۱-۱)$$

که در آن F_g نیروی گرانش، M_b جرم جسم و g شتاب گرانش زمین است. بنابراین هیچ جسمی نمی‌تواند به صورت معلق در فضا بماند مگر اینکه بر نیروی گرانش زمین غلبه کند.

در پروژه گوی معلق برای غلبه بر این نیرو از یک آهنربای الکتریکی استفاده می‌شود که از یک سیم‌پیچ و یک مدار راه انداز تشکیل شده است. آهنربای الکتریکی نیز به جرم M_b نیرویی وارد می‌کند

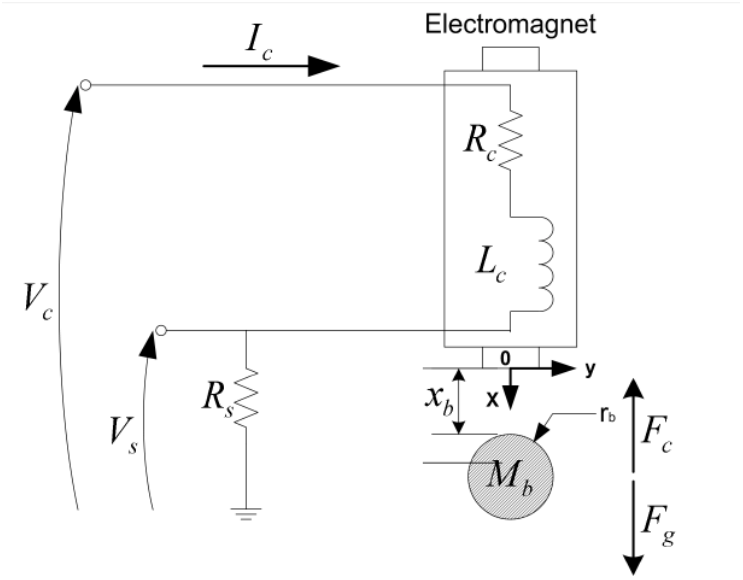
[1] Samuel Earnshaw

که مقدار آن با توان دوم جریان عبوری از سیم‌پیچ رابطه مستقیم و با توان دوم فاصله گوی از آهنربا نسبت عکس دارد. این نیرو از رابطه (۱-۲) بدست می‌آید.

$$F_c = K_m \frac{{I_c}^2}{(x_b - d)^2} \qquad (۲-۱)$$

که در آن F_c نیروی الکترومغناطیسی آهنربای الکتریکی است که توسط کنترل‌کننده تنظیم می‌شود، I_c جریان عبوری از سیم پیچ، K_m ثابت نیروی مغناطیسی ، x_b فاصله گوی از سیم‌پیچ و d یک ثابت تجربی است که در محاسبات صفر در نظر گرفته شده است.

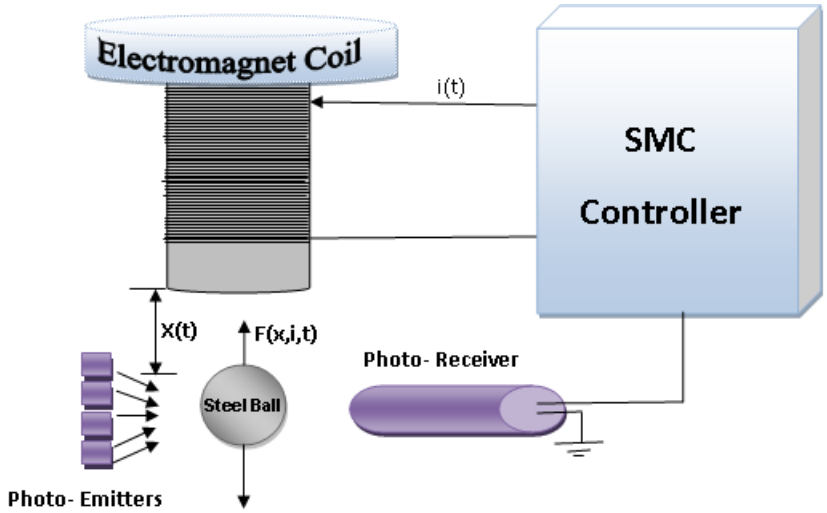
شرط تعادل طبق قوانین استاتیک این است که برآیند نیروهای وارده بر گوی مغناطیسی برابر صفر شود. این نیروها عبارتند از نیروی وزن به سمت پایین و نیروی الکترومغناطیسی به سمت بالا و در خلاف جهت نیروی وزن. شکل ساده و خلاصه شده عملکرد سیستم به همراه مقاومت فیدبک جریان در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: شکل ساده سیستم گوی معلق مغناطیسی [۱]

در این شکل R_c مقاومت سیم پیچ، R_s مقاومت سری با سیم‌پیچ برای اندازه گیری جریان، L_c خاصیت سلفی سیم پیچ، V_s ولتاژ فیدبک و V_c ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ است.

برای اندازه گیری موقعیت گوی معمولاً از سنسورهای فرستنده و گیرنده نوری استفاده می‌شود. یک نمونه از این اندازه گیری در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. در این طرح از چند فرستنده و یک گیرنده نوری برای تشخیص فاصله گوی فلزی و سیم‌پیچ استفاده شده است.



شکل ۱-۲: یک نمونه از اندازه گیری موقعیت گوی معلق مغناطیسی [۲]

نحوه عملکرد سیستم به این گونه است که هنگامی که فاصله گوی مغناطیسی از سیم‌پیچ بسیار زیاد است، سنسور موقعیت همه نور ارسالی از فرستنده را دریافت می‌کند؛ در نتیجه آهنربای الکتریکی گوی فلزی را به سمت بالا می‌کشد تا وقتی که لبه بالایی گوی در راستای مسیر نور اندازه‌گیری موقعیت قرار بگیرد. قدرت مغناطیسی آهنربا با استفاده از موقعیت گوی تنظیم می‌شود.

هر گاه نور کمی در گیرنده آشکار شد، مدار الکتریکی قدرت مغناطیسی را با استفاده از کاهش جریان عبوری از سیم‌پیچ کاهش می‌دهد. با کم شدن جریان سیم‌پیچ قدرت بالا کشیدن سیم‌پیچ کم می‌شود و گوی به سمت پایین می‌آید تا وقتی که کمترین نور ارسالی از فرستنده به گوی برخورد نماید. به عبارت دیگر هنگامی که بیشترین نور در گیرنده دریافت شد یعنی گوی پایین‌تر از وضعیت معمول قرار دارد. بنابراین همیشه گوی در مرکز آشکارساز قرار می‌گیرد. یک فاصله کوچک یک تا دو میلی‌متر ممکن است در راستای آشکارساز ایجاد شود اما این فاصله برای اندازه‌گیری تغییرات کوچک موقعیت بسیار مناسب است. البته اگر گوی فلزی وجود نداشته باشد یا کاملاً افتاده باشد آهنربا به اشباع کامل رفته و با تمام قدرت کار می‌کند و چنانچه مسیر نور قطع باشد سیم‌پیچ به طور کامل خاموش می‌شود.

۱-۲-۲- مزایای طراحی سیستم گوی معلق مغناطیسی

چرا باید یک گوی معلق مغناطیسی بسازیم؟ دلایل بسیار زیادی وجود دارد که ساخت یک سیستم گوی معلق مغناطیسی را توجیه می‌کند. در اینجا به مواردی از سوالات ساخت سیستم گوی معلق مغناطیسی اشاره شده است.

- سرگرمی و سعی در شناسایی رفتار الکترومغناطیسی،
- بشقاب پرنده‌ها از جاذبه الکتریکی استفاده می‌کنند،
- نحوه کار یک قطار یا خودروی Maglev چگونه است،
- می‌توان بر نیروی گرانش غلبه کرد،
- منظور از معلق نگه داشتن اجسام در فضا چیست،
- یک چالش مناسب برای آزمایش انواع سیستم‌های کنترلی،
- نیاز به اندازه‌گیری دقیق نیرو یا وزن،
- اندازه‌گیری تغییرات کوچک در گرانش،
- استفاده از Maglev به عنوان یک مجموعه آزمایشگاهی کنترل.

دستگاه Maglev از نگاه سیستمی یک دستگاه یک ورودی و یک خروجی[1] است که ورودی آن موقعیت گوی فلزی و خروجی آن نیز قدرت یا جریان سیم‌پیچ است. بنابراین می‌توان کنترل کننده‌های مختلفی را بر روی این سیستم پیاده سازی کرد و مورد آزمایش قرار داد. در طراحی مدار سعی شده است تا با استفاده از سیگنال آنالوگ و یا مدولاسیون عرض پالس[2] بتوان مقدار جریان عبوری از آهنربا و در نتیجه قدرت آهنربا را تنظیم کرد.

۱-۲-۳- هدف

هدف از انجام این پایان نامه طراحی و ساخت سیستم گوی معلق مغناطیسی می‌باشد که شامل ساخت قسمت‌های مختلف مکانیکی و طراحی مدار الکترونیکی آن می‌باشد. شکل فیزیکی و ساختار بدنه و قسمت‌های مختلف این سیستم در ضمیمه أ آمده است. برای ساخت مدار الکترونیکی از نرم افزار Altium Designer یا همان نسخه جدید Protel استفاده شده است و قسمت بدنه آن در نرم افزار Catia طراحی شده است. برای طراحی و شبیه سازی سیم‌پیچ از نرم افزار قدرتمند Flux استفاده شده است که در بخش ساخت سیستم نمودارهای مربوط به آن آمده است.

[1] SISO (Single-Input Single-Output)
[2] PWM (Pulse Wide Modulation)