



اصول عملکرد بیرینگهای مغناطیسی و کنترلر آنها

(بعضی از شکل ها و شماره ها جایجا شده اند)

علیرضا نوشادی

www.me-en.com

دانشگاه امام حسین – دانشکده مکانیک و هوافضا

چکیده

بیرینگهای مغناطیسی فعال امروزه در بسیاری از موارد صنعتی کاربرد دارد. این بیرینگها دسترسی به سرعتهای بالاتر را نسبت به انواع بیرینگهای مکانیکی و غلطشی فراهم می سازند. همچنین استفاده از این بیرینگها می تواند باعث حذف عملیات روغنکاری در کاربردهای مختلف و در نتیجه کاهش آلودگی محیط سیستم شود. امروزه رشد و تکنولوژی در مباحث کنترل و پردازش، بیرینگهای مغناطیسی را به سوی طراحی نیرومند تر و به صرفه تر نسبت به گذشته هدایت کرده است. در این مقاله بر روی نحوه عملکرد این بیرینگها و سیستم کنترل آنها بحث و بررسی صورت می گیرد.

کلمات کلیدی: بیرینگهای شعاعی، کنترلر، ایرگپ

که بیرینگهای معمولی مکانیکی که با اتصال به شافت، به روغنکاری نیاز پیدا می کنند، بیرینگهای مغناطیسی با تکنولوژی خود که تعلیق روتور بر روی نیروهای مغناطیسی است میتواند راه حل خوبی باشد.

2. بیرینگهای شعاعی

هر بیرینگ شعاعی یک قسمت ثابت و یک سیستم سنسور نصب شده در بالای قسمت گردنده ی فرومغناطیس سوار بر شفت، دارد. قسمت گردنده شامل یک دسته از حلقه های ورقه سوار بر یک سیلندر است که روی شفت می نشیند، ورق ها جهت کاهش اتلافات جریان گردشی و افزایش واکنش بیرینگ استفاده میشوند. قسمت ثابت از یک دسته حلقه های ورقه با قطب هایی در دیواره ی داخلی تشکیل شده است. سیم پیچ ها در اطراف هر قطب پیچانده شده اند و جریان الکتریکی کنترل شده ای از این سیم پیچ ها می گذرد و یک نیروی جاذبه روی روتور فرومغناطیسی ایجاد می کند تا روتور را در فاصله هوایی خاصی به صورت معلق نگه دارد، (شکل 1).

1. مقدمه

نخستین بیرینگهای مغناطیسی در زمان جنگ جهانی دوم و با تلاش آقای جسی بیمز از دانشگاه ویرجینیا پا به عرصه وجود گذاشتند که در سانتریفیوژهای خالص سازی ایزوتوپهای عناصر مختلف برای ساخت اولین بمبهای هسته ای استفاده می شد. اما پیشرفتهای اساسی بر روی این تکنولوژی توسط پروفسور هریمن و پروفسور سوییتزر با استفاده از علوم الکترونیک و کنترل صورت پذیرفت. اولین کنفرانس بین المللی نیز در سال 1988 توسط پروفسور سوییتزر و پروفسور الایر از دانشگاه ویرجینیا و پروفسور اوکادا از دانشگاه ایباراکی برگزار شد.

باتاقان های مغناطیسی که شافت را به جای تماس مکانیکی با نیروی مغناطیسی به حالت تعلیق در می آورند، چندین دهه است که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند. هنگامی

4. اصول عملکرد

در سیستم یاتاقان مغناطیسی، محورها به وسیله ی نیروی الکترو مغناطیسی حاصل از اعمال جریان الکتریکی به مواد فرومغناطیس یاتاقان‌ها، به صورت معلق نگه داشته می شوند.

یک جسم فرومغناطیس گردنده (Rotor) میتواند به این صورت، در یک میدان مغناطیسی که توسط آهنربای الکتریکی ثابت (Stator) بیرینگ ایجاد شده، همانند یک تکیه گاه نگهداری شود. از آنجایی که گرایش طبیعی قسمت ثابت، تا وقتی که قسمت گردنده ارتباط ایجاد کند، جذب قسمت گردنده است، بعضی از رفتارهای کنترلی جهت انطباق میدان مغناطیسی و نگهداری قسمت گردنده در موقعیت مطلوب، لازم هستند. نوع بسیار رایجی از کنترل شامل فیدبک موقعیت شفت است. سپس این اطلاعات توسط سیستم کنترل جهت تعدیل و میزان میدان مغناطیسی از طریق تقویت کننده های قدرت، مورد استفاده قرار میگیرد تا موقعیت مطلوب قسمت گردنده حتی تحت شرایط تغییر بار و فشار شفت، حفظ شود، (شکل 3).

یک سیستم بیرینگ مغناطیسی فعال شامل محرکهای بیرینگ، سنسورهای موقعیت، یک سیستم کنترل و تقویت کننده های قدرت است. محرک های بیرینگ و سنسورها در درون دستگاه واقع شده اند در حالیکه سیستم کنترل و تقویت کننده ها بطور کلی در خارج از دستگاه قرار دارند.

5. اصول عملکرد

این بیرینگ ها در هر دستگاهی که دارای اجزای گردنده هستند جهت تثبیت موقعیت و کنترل و نگهداری بار قسمت متحرک، مورد استفاده قرار می گیرند.

شکل 2، اصول تولید نیروی شعاعی روتور در بیرینگهای مغناطیسی و موتورهای بدون بیرینگ را نشان می دهد. یک شفت دوار بوسیله هسته استاتور محیط می شود. روتور و استاتور با چهار قطب متوالی S, N, S, N مغناطیسی شده اند. یک نیروی جاذبه مغناطیسی بسیار قوی تحت قطبهای مغناطیسی بین روتور و هسته استاتور وجود دارد.

3. انواع سیستمهای بیرینگ مغناطیسی

دو نوع اساسی از تکنولوژی یاتاقانهای مغناطیسی وجود دارد که عبارتند از:

الف) پسیو یا غیر فعال:

همانند یاتاقانهای مکانیکی هستند که برای عملکردشان به کنترلر نیاز ندارند. یک سیستم غیر فعال پنج محوره ذاتاً نا پایدار است و بنابر این یک سیستم غیر فعال، حداقل یک محور فعال و یا یک کنترلر مکانیکی نیاز دارد.

ب) بیرینگهای اکتیو یا فعال :

در سیستمهای فعال، سنسورهای غیر تماسی موقعیت شفت را نمایان می سازند و این اطلاعات را به سیستم کنترل ارسال می کنند. کنترلر ها این اطلاعات را تبدیل به فرمانهای مطلوب جریان کرده و به محرکها می فرستند. محرکها نیز این جریان ها را تبدیل به نیرو کرده سپس با استفاده از این نیروها روتور در موقعیت مشخصی دوران کرده و لرزشهای آن میرا می شود.

شکل 4، اساس ساختمان یک الکترو مغناطیس با کنترلر فیدبک برای تعلیق تک محوره مغناطیسی را نشان می دهد. نیروی مغناطیسی برای تعلیق قطعه آهنی مستطیلی بوسیله القاء ناشی از پیچه تولید می شود. قطعه فقط در جهت محور عمودی آزاد است. جریان i شار ψ را تولید می کند. مسیر شار به وسیله خط چین نشان داده شده است و فاصله هوایی را دوبار در جهت عمودی قطع می کند. نیروی جاذبه بین قطعه آویزان و هسته C-شکل تابعی از جریان بوده و در صورتی که هسته C-شکل اشباع نشده باشد، با مربع i متناسب است.

$$F = \frac{L_0 i^2}{g^2} \quad (1)$$

جریان i پیچه سری شده را تحریک می کند. تعداد حلقه های پیچه را N فرض کرده لذا نیروی مغناطیسرانی متناسب با Ni تولید می شود. زمانی که در ماده فرو مغناطیسی قابلیت نفوذ پذیری بالا باشد شار مسیر نشان داده شده را طی می کند. توجه کنید که فقط یک مسیر نشان داده شده است، در حالی که شار در فاصله هوایی به صورت پخش است. میزان چگالی شار در فاصله هوایی قابلیت نیروی الکترو مغناطیس را تعیین می کند. چگالی شار بالا، نیروی زیاد مغناطیسی را نتیجه می دهد. ضمناً این که برای کاهش جریان و تلفات، لازم است فاصله هوایی تا حد ممکن کوچک باشد.

6. محرک دیفرانسیلی

شکل 5، محرک مغناطیسی از نوع دیفرانسیلی را نشان می دهد. جسم استوانه ای می تواند در جهت محور X حرکت کند.

این جسم در هوا بوسیله نیروی مغناطیسی کنترل شده معلق شده است. مطابق شکل از دو محرک C-شکل استفاده شده است، فرض کنید توزیع شار در فاصله هوایی به صورت یکنواخت و با چگالی شار B_+ B_- به ترتیب در ایرگپ بالا و پایین باشد. S مساحت ایرگپ برابر با مجموع S_1 و S_2 می باشد. نیروهای مغناطیسی F_1 و F_2 برای قطعه استوانه ای به کار می رود که این نیروها برابرند با:

$$F_1 = B_+^2 S / (2\mu_0) \quad (2)$$

$$F_2 = B_-^2 S / (2\mu_0) \quad (3)$$

بنابراین مجموع این دو نیرو به صورت زیر نوشته می شود:

$$F = \frac{S}{2\mu_0} (B_+^2 - B_-^2) \quad (4)$$

مشاهده می شود که نیروی مغناطیسی با تفاضل مربعات چگالی شار متناسب است.

7. بیرینگ شعاعی

شکل 6، یک مقطع عرضی از نوعی بیرینگ مغناطیسی را نشان می دهد. روتور به صورت استوانه ای است که با یک شافت مرکزی که بوسیله مواد فرو مغناطیسی لایه لایه از فولاد سیلیکونی احاطه شده است. استاتور که روتور را در بر گرفته، دارای 8 قطب است. ناحیه های بین قطبها شکاف دار و شامل پیچه هستند. طوق استاتور مسیرهای مغناطیسی 8 قطب استاتور را کامل می کنند. پهنای طوق طوری طراحی شده است که باندازه کافی

عریض باشد تا هم از اشباع مغناطیسی جلوگیری شود و هم برای اجتناب از لرزشهای ناشی از نیروهای مغناطیسی شعاعی صلبیت بالایی تولید کند. مساحت S هر ایرگپ قطب استاتور را مطابق زیر تعریف می کنند:

$$S = l \left(\pi D \times \frac{\theta_1}{360} \right) \quad (5)$$

نیروی F_1 از دو قطب استاتور گرفته شده در رابطه 3، تولید می شود. از آنجایی که قطبها دارای موقعیت زاویه ای $22/5$ درجه نسبت به هم هستند این نیرو برابر است با:

$$F_1 = \frac{B^2 S}{\mu_0} \cos \left(\frac{\pi}{8} \right) \quad (6)$$

خود القایی یک الکترو مغناطیس با طول

ایرگپ اسمی (نامی) g برابر است با:

$$L_0 = \frac{N^2 \mu_0 S}{2g} \quad (7)$$

به طوری که N مجموع تعداد دورهای هردو پیچ سیم پیچ هاست. نیروی شعاعی نیز می تواند از رابطه 1 بدست آید:

$$F_1 = \frac{L_0}{2g} \cos \left(\frac{\pi}{8} \right) i^2 \quad \text{8. خطی سازی}$$

در معادلات 6 و 8، نیروی شعاعی به ترتیب (8) چگالی شار و جریان بیان شد. به (8) ظیم کردن نیروی شعاعی، چگالی شار و جریان باید تنظیم شود.

تنظیم کردن جریان نسبت به تنظیم چگالی شار بنابر دلایل زیر دارای مزیت هایی است:

1- نشاندهنده های جریان کم قیمت تر هستند. این حسگرها می توانند در مولدهای جریان نصب شوند.

2-کار با نمایانگرهای چگالی شار آسان نیست و ممکن است هزینه بر باشند. یک نوع وسیله نشاندهنده شار ، حسگر Hall است . حسگر Hall باید بسیار کوچک و نازک باشد تا در ایرگپ نصب شود . حسگرهای Hall نازک، بسیار گران قیمت و ظریف هستند.

در بیشتر موارد، برای تنظیم نیروی شعاعی، جریان لحظه ای تنظیم می شود. همان طور که می دانیم رابطه بین نیروی شعاعی و جریان غیر خطی است. بدون تاثیر اشباع ، نیروی شعاعی با مربع جریان متناسب است. در عمل، نیروی شعاعی با مربع جریان متناسب نیست، بلکه با نسبت $i^{1.6}$ متناسب است. نیروی شعاعی را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$F_1 = \frac{k'_1}{4} i_1^2 \quad (9)$$

$$F_3 = \frac{k'_1}{4} i_3^2 \quad (10)$$

به طوری که داریم:

$$k'_1 = \frac{2L_0 \cos(\pi/8)}{g} \quad (11)$$

برای یافتن رابطه خطی بین نیروی شعاعی و مؤلفه های جریان، جریان پیچ الکترومغناطیس های 1 و 3 در شکل 6، به دو مؤلفه جریان تقسیم شده اند:

جریان پایه I_b و جریان تنظیم کننده i_b :

$$i_1 = I_b + i_b \quad (12)$$

$$i_3 = I_b - i_b \quad (13)$$

توجه کنید که مقادیر i_1 و i_3 دارای مقادیر مثبتی هستند. بنابراین i_b باید کمتر از I_b باشد. نیروی شعاعی بر روی شفت در جهت محور x برابر است با:

$$F_x = F_1 - F_3 \quad (14)$$

جانشینی معادلات 9 و 10 در معادله 14، منجر به یک معادله ساده نیروی شعاعی می-شود.

$$F_x = k'_i I_b i_b \quad (15)$$

حال می بینیم که اگر جریان پایه ثابت در نظر گرفته شود، نیروی شعاعی با جریان تنظیم کننده نیرو، i_b ، متناسب است. شکل 7، خصوصیات غیر خطی بین نیروی شعاعی و جریان پیچه در دو مورد را نشان می دهد. یکی متناسب با i^2 دیگری متناسب با $i^{1.6}$.

شکل 8، نیز رابطه بین مؤلفه جریان i_b و نیروی شعاعی را برای دو مورد بالا نشان می دهد. این شکل تایید می کند که نیروی شعاعی و i_b همانطور که در معادله 15 نشان داده شد، با هم رابطه خطی دارند. در نتیجه نیروی شعاعی برابر خواهد بود با:

$$F_x = k_i i_b \quad (16)$$

که در آن $k_i = k'_i I_b$ به فاکتور نیرو-جریان اشاره دارد.

9. نیروی کششی ناپایدار

شکل 9، هسته های ساده C و I شکل با پیچه ها نشان را نشان می دهد.

فرض می کنیم جریان پیچه ها ثابت باشد. توجه داریم که در این دو شکل فقط طول ایرگپ فرق می کند. در شکل a، طول ایرگپ نومینال یا نامی برابر با g است در حالی که در شکل b، طول ایرگپ کمتر است. $(g-x)$. B_a و B_b را به ترتیب بعنوان چگالی شار ایرگپ در شکل های a و b، تعریف می کنیم. داریم $B_b > B_a$ و در نتیجه نیروی جاذبه مغناطیسی بین هسته های C و I در شکل b، بیشتر است یعنی $F_a < F_b$. پس با کاهش طول ایرگپ نیروی مغناطیسی افزایش پیدا می کند. این خصوصیت سبب ناپایداری مکانیزم می شود.

نیروی ناپایدار تابعی از موقعیت گریز از مرکز شیء معلق می باشد، بنابراین نیروی مغناطیسی، نیروی کششی نامتعادل نیز نامیده می شود. باتوجه به این موارد برای نیروی کششی ناپایدار داریم:

$$F = k_x x \quad (17)$$

که در آن:

$$k_x = \frac{2L_0 \cos(\pi/8)}{g^2} I_b^2 \quad (18)$$

نیروی شعاعی می تواند با استفاده از آنالیز در بخشهای قبل برای بیرینگ مغناطیسی شعاعی به صورت تابعی از جریان i_b و جابجایی شعاعی روتور x بدست آید. نیروی شعاعی F_x مجموع این دو نیرو خواهد بود.

$$F_x = k_i i_{bx} + k_x x \quad (19)$$

$$k_i = 2I_0 \left(\frac{I_b}{g} \right) \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \quad (20)$$

$$k_x = 2I_0 \left(\frac{I_b}{g} \right)^2 \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \quad (21)$$

شکل 10، بلوک دیاگرام معادله 19 و سیستم مکانیکی را نشان می دهد.

10. اصول طراحی در تعلیق مغناطیسی

شکل 11، بلوک دیاگرام یک بیرینگ مغناطیسی و کنترلر آن برای تعلیق مغناطیسی تک محوره را نشان می دهد. موقعیت x شیء معلق بوسیله یک سنسور جابجایی با بهره k_{sn} آشکار شده و تقویت شده است و سپس با مرجع x^* مقایسه میشود. خطا بوسیله کنترلر G_c تقویت شده است. جریان i_b به بیرینگ مغناطیسی تک محوره تغذیه می شود.

تابع انتقال بیرینگ مغناطیسی پایدار نیست و بنابراین کنترلر باید آن را با استفاده از یک حلقه فیدبک پایدار سازد.

یک کنترلر ساده مناسب برای بیرینگ مغناطیسی کنترلر PD می باشد. تابع انتقال ایده آل از یک کنترلر PD برابر است با:

$$G_c = K_p + sT_d \quad (22)$$

تابع انتقال یک کنترلر مشتقی متناسب با s در حوزه لاپلاس است. در حوزه فرکانسی، s با $j\omega$ جایگزین می شود، به طوریکه دامنه آن متناسب با فرکانس است. در عمل، خروجی یک جزء مشتقی ایده آل متاسفانه شامل اختلالات قابل توجهی می باشد. این اختلالات فرکانس بالا در ورودی ترمینالها منجر به تقویت در ترمینالهای خروجی می شود. بنابراین از کنترلر مشتقی ایده آل در عمل باید صرف نظر شود.

شکل 12، کنترلر های مشتقی ایده آل و عملی را نشان می دهد.

11. خطای موقعیت حالت پایا و انتگرالگیر

هنگامی که نیروی استاتیکی خارجی ناشی از خطای ماندگار ایجاد می شود فاصله ایرگپ بین جسم آویخته و محرک الکترومغناطیس فقط با یک کنترلر PD، افزایش می یابد. در خیلی کاربردها، اغلب علاوه بر یک کنترلر PD یک کنترلر انتگرالی نیز به کار می رود تا این اتفاق بیافتد.

شکل 13، بلوک دیاگرامی برای یک کنترلر PID را نشان می دهد. علاوه یک کنترلر PD، انتگرالگیر k_{in}/s نیز اعمال شده است. ورودی، یعنی خطای موقعیت e_x ، انتگرالگیر شده و خروجی آن به کنترلر PD اضافه شده و در نتیجه فرمان نیروی f_x^* تولید می شود.

شکل 14، نیز پاسخ تغییر پله ای به موقعیت مرجع را نشان می دهد.

در 5 ms، پاسخ گذرا از کنترلر PD تقریباً تمام شده است. x_{sn} یک بیش از حدی نسبت به مرجع x_{sn}^* دارد، برای اینکه خطای موقعیت منفی است. در حالیکه خروجی انتگرالگیر منفی است و با گذشت زمان ثابت می شود. اما نیروی در جهت محور x در جهت منفی تولید می شود. نیرو تلاش می کند تا جسم را در جهت مخالف محور x حرکت دهد بنابراین موقعیت x_{sn} منظمأ کاهش می یابد. خروجی انتگرالگیر آنقدر کاهش می یابد تا موقعیت بر مرجع بیافتد.

12. کاربردهای مختلف

طراحی منحصر به فرد و قابلیت های گسترده ی بیرینگ های مغناطیسی، موجب

کاربردهای مختلف آن ها، به عنوان مثال، در ساختن لایه های فابریک نیمه هادی و به ویژه در ساختن لایه های نازک سیلیکون، می شود. بیرینگ های مغناطیسی در این گونه کاربردها که به ارتعاش و لرزش بسیار حساسند می توانند موجب افزایش پایداری شوند.

کمپرسور های سرد سازی، نمونه ی دیگری از کاربردهای مهم بیرینگ های مغناطیسی که می توانند در سرعت های بالا که مورد نیاز مبردهای جدید است، کار کنند و بر خلاف بیرینگ های معمولی که با روغن خنک می شوند، هیچ تأثیری از جهت ایجاد آلودگی روی مبرد ندارند. بیرینگ های مغناطیسی هم چنین می توانند به طور دقیق عایق بندی شوند و لذا برای فرآیندهایی که با سیالات مخرب سروکار دارند، قابل توجه هستند.

13. برخی مزایای بیرینگ های مغناطیسی

بیرینگ های مغناطیسی بدون هیچ گونه تماسی کار می کنند. این منجر به خصوصیات ویژه ای می شود که گستره ی کاربرد این بیرینگ ها را وسعت می بخشد. برخی از مزایای این بیرینگها عبارتند از:

الف) عدم نیاز به روغن کاری

سیستم های روغن کاری برای بقیه ی انواع یاتاقان ها، گران قیمت، غیر قابل اطمینان و غیر ایمن هستند. روان کننده ها برای محیط زیست خطر آفرین هستند و دور ریختن آن ها هم معضل دیگری است. در صورتی که هیچ کدام از این موارد برای یاتاقان های مغناطیسی مطرح نیست.

ب) ایمنی

این بیرینگ ها از لحاظ ایمنی قابل مقایسه با موتورهای الکتریکی هستند و معقول است که انتظار داشته باشیم عمری حدود 15 تا 20 سال داشته باشند. سیستم کنترلی آن ها هم یک عمر پایدار نسبی پنج ساله دارد که قابل مقایسه با عمر اجزای الکتریکی معمولی است.

پ) اندازه گیری نیرو

کنترل کننده می تواند مقدار و جهت نیروی بیرینگ ها را با اندازه گیری جریان و موقعیت آن اندازه بگیرد که این خصوصیت بسیار ویژه ای برای طراحان است. این نیروی ها با دقت پنج درصد قابل اندازه گیری هستند.

ت) کنترل موقعیت محور

چون سنسورها، موقعیت شافت را نمایش می دهند، سیستم کنترلی می تواند موقعیت آن را بر حسب اطلاعاتی که از سنسورها می گیرد، تغییر دهد.

ث) دقت

کنترل دقیق می تواند، جابه جایی شافت را در اثر نامیزانی ها از بین برد، که این کار با استفاده از سیستم کنترلی تطبیقی (Adaptive) انجام می شود. جابه جایی شافت در همان سرعت می تواند تا حدود یک میلی متر کاهش پیدا کند که برای ماشین های ابزار برش، بسیار قابل توجه است.

ج) عملیات غوطه وری

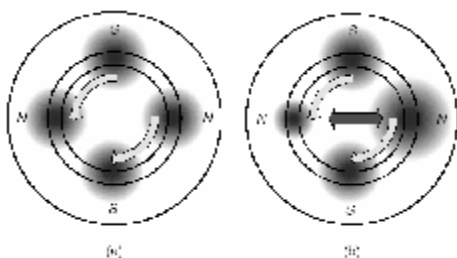
بیرینگ های مغناطیسی می توانند به طور مستقیم در داخل سیال کار کنند و نیاز به آب بندی ندارند که این مورد، هزینه دستگاه را کاهش می دهد.

D	قطر بیرونی روتور بیرینگ
I_b	جریان پایه
i_b	جریان تنظیم گر
K_i	ثابت نیرو-جریان
K_x	ثابت نیرو-جابجایی
K_p	ضریب بهره کنترلر تناسبی
T_d	ضریب بهره کنترلر مشتقی

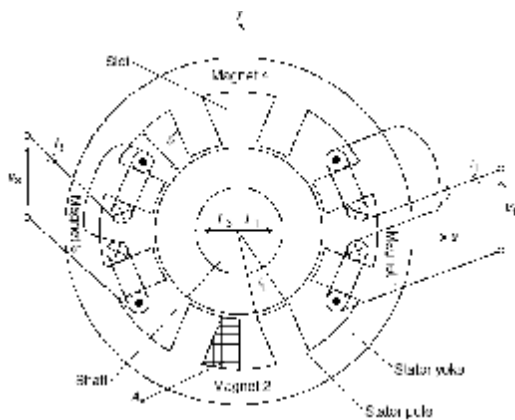
شکلها:



شکل 1- بیرینگ مغناطیسی شعاعی



شکل 2- نحوه تولید نیروی شعاعی



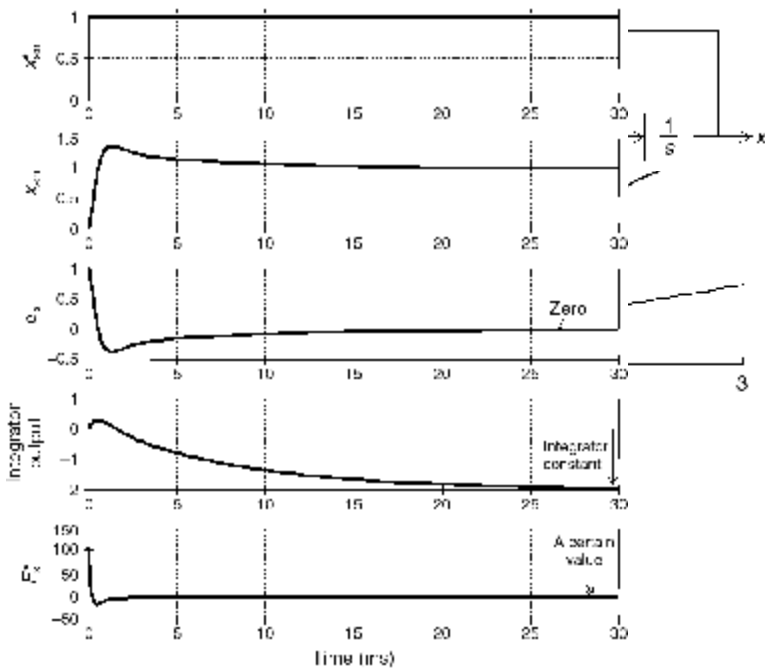
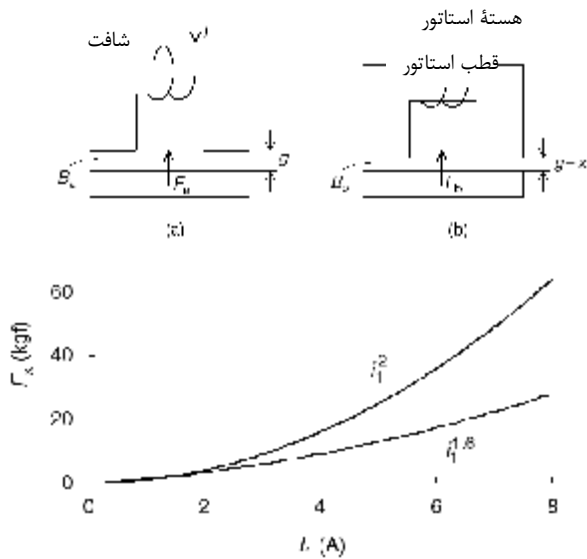
B	چگالی شار مغناطیسی
F	نیروی مغناطیسی
L_0	اندوکتانس نامی
i	جریان الکتریکی
g	فاصله هوایی بین دو هسته (ایرگپ)
S	مساحت سطح مقطع هر ایرگپ

شیار

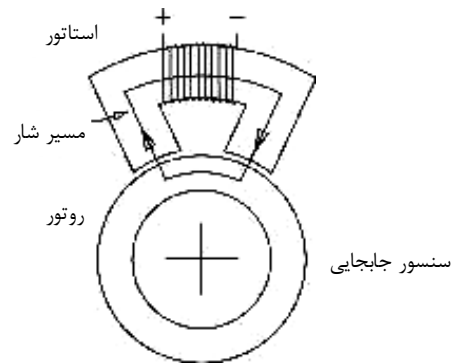
شکل 5- محرک دیفرانسیلی شکل 9- نحوه تولید نیروی ناپایدار

شکل 6- مقطع عرضی بیرینگ شعاعی

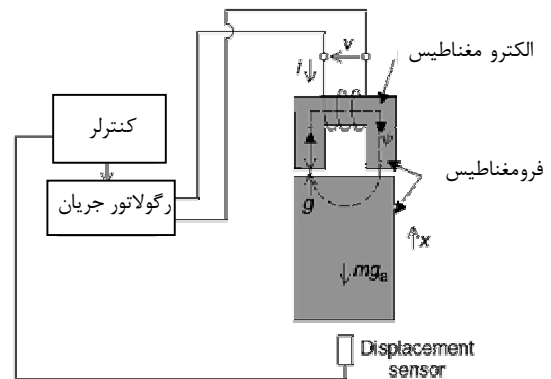
شکل 7- رابطه نیرو با جریان i



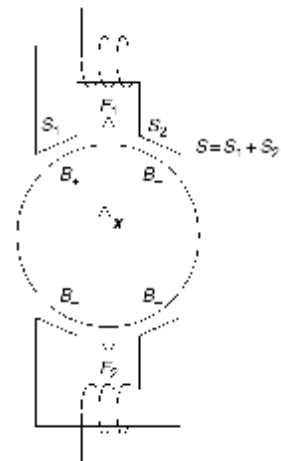
شکل 8- رابطه نیرو با جریان تنظیم گر



شکل 3- نحوه عملکرد بیرینگهای مغناطیسی



شکل 4- عملکرد سیستم تعلیق مغناطیسی



شکل 10- بلوک دیاگرام سیستم تعلیق مغناطیسی

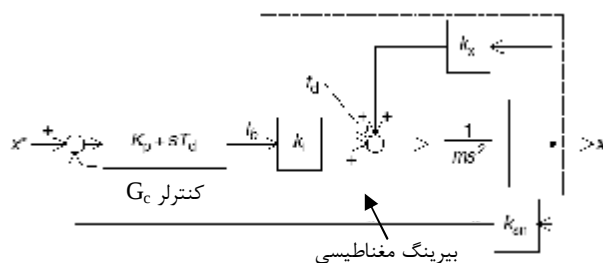
مراجع:

1-A.Chiba, T.Fukao, O.Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto & D.G.Dorrell, (2005), *Magnetic bearing and bearingless drives*

2- R. Knospe, (2006), *Active magnetic bearings for machining application*

3- <http://jet.blogfa.com>

4- <http://www.sti.nasa.gov>

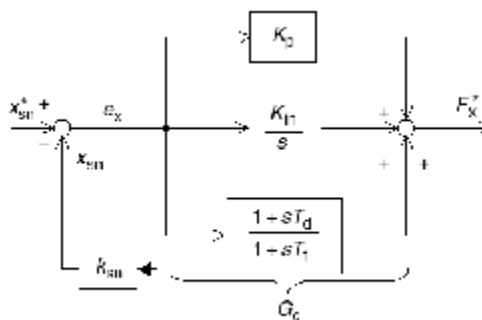


شکل 11- سیستم تعلیق مغناطیسی

شکل 13- بلوک دیاگرام کنترلر تناسبی -
انتگرالی -مشتقی

(a) (b)

شکل 12- کنترلر مشتقی (a) ایده آل (b) عملی



شکل 14- پاسخ به تغییر پله در مرجع مکانی