



# باتاقان های مغناطیسی

مرتضی عبدالهی



## فهرست:

- مقدمه..... ( ۴ )
- فصل اول: ظهور یاتاقان مغناطیسی..... ( ۵ )
- اساس کار یاتاقان مغناطیسی
  - سیستم های کنترل
  - ملاحظات طراحی
  - کاربردهای مختلف
- فصل دوم: اصول و مبانی یاتاقان مغناطیسی..... ( ۱۱ )
- یاتاقان های مغناطیسی
  - اجزای یاتاقان مغناطیسی و عملکرد هر یک
  - یاتاقان ها وو سنسورها
  - سیستم کنترل
  - الگوریتم کنترل
- فصل سوم: مزایا و محدودیت ها..... ( ۱۶ )
- قابلیت اعتماد بالا
  - پاکیزگی
  - کاربرد در سرعت های بالا
  - کنترل موقعیت و ارتعاشات
  - شرایط خاص
  - طراحی ، ارتقا و آزمایش دستگاهها
  - عیب یابی ماشین / ماشین های هوشمند
- فصل چهارم: یاتاقان های مغناطیسی چگونه کار می کنند..... ( ۱۹ )
- یاتاقان های شعاعی
  - یاتاقان های کف گرد
- فصل پنجم: ماهیت سیستم کنترل..... ( ۲۲ )
- سنسورها
  - کنترلر
  - تقویت کننده ها

فصل ششم: سیستم کنترل چگونه کار می کند.....(۲۴)

- کنترلر

- فیلتر پایین گذر

- صفر ها و قطب های اضافی

- فیلترهای notch

- مجاورت سنسورها

فصل هفتم: خصوصیات دینامیکی روتور.....(۲۶)

فصل هشتم: یاتاقان کمکی.....(۲۷)

فصل نهم: کنترل تطبیقی ارتعاشات.....(۲۷)

- خصوصیات کنترل تطبیقی ارتعاشات

- فرایا و فواید کنترل تطبیقی

فصل دهم: کاربرد ها.....(۲۸)

- صنایع هوایی \_ دفاعی

- توربین های گاز و سانتریفیوژها

- کمپرسورها

- تولید انرژی توزیعی

- ژنراتورهای سرعت بالا

- ماشین های ابزار

- واحد تست و آزمایش

- تجهیزات خلاء

فصل یازدهم: پیوست.....(۴۹)

- سوالاتی که معمولا پیرامون یاتاقان های مغناطیسی مطرح می شود





### ظهور یاتاقان های مغناطیسی

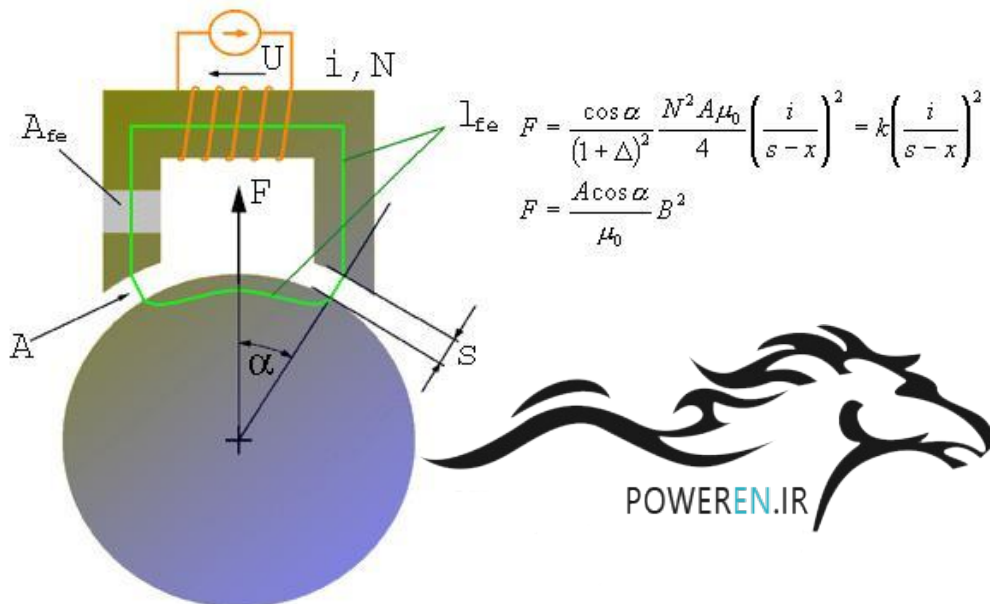
یاتاقان مغناطیسی که شافت را به جای تماس مکانیکی با نیروی مغناطیسی به حالت تعلیق در می آورند، چند دهه است که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند. یاتاقان های مغناطیسی مزایای فراوانی ، از جمله توانایی کار در سرعت های بالا و قابلیت عملکرد بدون روغن کاری در محیط خلاء را به استفاده کنندگان عرضه می کنند. این یاتاقان ها بدون اصطکاک کار می کنند، فرسایش کمی دارند، در حین دوران ارتعاشات بسیار کمتری نسبت به بقیه یاتاقان ها ایجاد می کنند، می توانند مکان شافت را به دقت کنترل کنند، نیروهای خارجی وارد بر شافت را اندازه بگیرند و حتی شرایط کاری ماشین را تصویر کنند.

امروزه رشد تکنولوژی ، به ویژه در کنترل و پردازش دیجیتال، یاتاقان های مغناطیسی را به سوی طراحی نیرومندتر و به صرفه تر نسبت به گذشته هدایت کرده است. یاتاقان های امروزی برای محدودهی گسترده ای از کاربردها، از تجهیزات نیمه هادی گرفته تا میکرو توربین ها و کمپرسورهای سرد سازی و پمپهای خلاء، مناسب هستند.



اساس کار یاتاقان های مغناطیسی

در سیستم پلتاقان مغناطیسی، محورها به وسیله ی رهیوی الکترومغناطیسی حاصل از اعمال جریکن الکتریکی به مواد فرومغناطیس پلتاقان ها، به صورت معلق نگه داشته می شوند. این سیستم شامل سه بخش اصلی است: محرک های پلتاقان، سنسورهای موقعیت، کنترل کننده و الگوریتم کنترل. دستگاه های معمولی شامل دو پلتاقان شعاعی مغناطیسی و یک پلتاقان مغناطیسی کف گرد می باشند. این پلتاقان ها، شافت را در راستای پنج محور کنترل می کنند؛ دو محور مربوط به هر پلتاقان شعاعی است و محور پنجم در طول شافت قرار دارد. پلتاقان های مغناطیسی دارای اجزای ثابت و متحرک هستند که به ترتیب استاتور و روتور نامیده می شوند. استاتور پلتاقان های شعاعی، به استاتور موتورهای الکتریکی شباهت دارد. استاتور پلتاقان های شعاعی لایه لایه است، به این صورت که قطبهای مغناطیسی آن از لایه های نازک فلزی تشکیل شده است که بر روی هم قرار می گیرند و حلقه های سریع به دور قطب ها پیچیده می شوند.



جریکن الکتریکی کنترل شده که از سریع پیچها می گذرد، یک رهیوی جاذب روی روتور فرو مغناطیس ایجاد می کند و روتور را در فاصله ی هوایی به صورت معلق نگه می دارد. فاصله ی هوایی معمولاً حدود ۵/۰ میلی متر در نظر گرفته می شود و در برخی کاربردهای خاص می تواند به بزرگی ۲ میلی متر هم طراحی شود. روتور روی شافتی قرار می گیرد که در فاصله ی هوایی است و لزومی ندارد که در مرکز قرار گیرد. این خاصیت از لحاظ کاربردی مفید است زیرا می توان فرسودگی شافت و همچنین ارزش های آن را جبران کرد، مانند ماشینی های سنگ زری که در طول کارکرد فرسوده می شوند.

یک پلتاقان مغناطیسی کف گرد حرکت محوری را کنترل می کند. روتور پلتاقان کف گرد، یک دیسک توپیر آهری است که به شافت متصل شده و در یک فاصله مشخص از استاتور، در یک طرف لایه هر دو طرف شافت، قرار می گیرد. در حین کار، رهیوی الکترومغناطیسی توپیر شده به وسیله ی استاتور؛ روی روتور عمل کرده و

حرکت محوری را کنترل می کنند. یاتاقان های مغناطیسی، همپجری شامل یاتاقان های کمکی هستند. کار اصلی این یاتاقان ها نگه داشتن شافت هنگام خاموش بودن دستگاه است. این یاتاقان ها اجزای دستگاه را در هنگام قطع برق می خرابی محافظت می کنند. رینگ داخل یاتاقان های کمکی، از فاصله ی هوایی یاتاقان های مغناطیسی کوچکتر است تا از آسیب دیدگی شافت در هنگام ارتعاش جلوگیری کند.

### سریستم های کنترل

سریستم کنترلی، جرکلن یاتاقان ها را تنظیم می کند و در نتیجه ریزوی یاتاقان ها را سامان می بخشد. حتی فعالیت، سنسورهای تعیین موقعیت طوای و شعاعی، داده های حرکت و مکان شافت را به کنترل کننده می فرستند.

این کنترل کننده موقعیت مطلوب و واقعی شافت را مقایسه کرده و ریزوی لازم برای نگه داشتن شافت در موقعیت فعلی را محاسبه می کند و در صورت رگه به تقویت کننده، دستور تنظیم جرکلن، جهت کاهش می افزایش شار مغناطیسی را می دهد.

بخشهای اصلی سریستم کنترل DSP ( پردازش سیگنال های دیجیتال )، منبع تغذیه و تقویت کننده ها هستند. به طور کلی هرچه دستگاه بزرگتر باشد، به تقویت کننده های بزرگتری نیاز دارد. اندازه ی کنترل کننده نیز به دینامیک بار مورد نیاز بستگی دارد که عموماً در دستگاههای سنگین تر، بزرگتر است.

شافت می تواند از طریق الگوریتم های تک ورودی - تک خروجی ( SISO ) و یا چند ورودی - چند خروجی ( MIMO ) برای سرعتهای بالا و کاربردهای مورد نیاز، کنترل شود. کنترل کننده توسط سیگنال هایی با فرکانس ۱۰ کیلو هرتز، موقعیت دقیق شافت را اندازه گرفته و تحلیل می کند و سپس دستور مناسب را صادر می نماید. به این ترتیب قابلیت کنترل دقیق یاتاقان هایی با حداکثر سرعت ۰۰۰/۱۰۰ دور در دقیقه فراهم می شود.

یک مزیت قابل توجه تکنولوژی یاتاقان های مغناطیسی این است که کنترل کننده، خود عمل نمایش شرایط کاری دستگاه را انجام می دهد. نرم افزارهایی مانند MBS ، اطلاعات جزئی بسیاری، در مورد سلامت دستگاه مهیا کرده و برنامه ی نگهداری و مراقبت را بهینه می کنند.

این نرم افزار، ابزارهایی دارد که می تواند پارامترهای ورودی را همساز کرده و تفاوت آنها را قبل از شروع دستگاه بررسی کند. ابزارهای تصویری آن ، یک نمایش دهنده موقعیت جریانها و نیروها به صورت لحظه ایو یک سیستم هشدار که کلیه متغیرهای سیستم را قبل و بعد از یک اتفاق غیر عادی در کنترل می گیرد، هستند. این ابزارها مشاهده ی اطلاعات سیستم در شکلهای مختلف جهت همسازی ورودی ها و مشخصات دستگاه را امکان پذیر می سازد.

سیستم ابزار تطابق پذیر AVC یک ابزار مهم دیگر است. AVC نیروهای لازم برای از بین بردن ارتعاشات را از دو راه حساب می کند یک راه این است که به شافت اجازه می دهد که حول محور هندسی اش بگردد، از این رو به طور دقیق جابجایی شافت را کنترل می کند و انحراف ناشی از نامیزان بودن شافت را از بین می برد. این کاربرد در دقت های بالا مانند ماشین های ابزار، مفید است. راه دیگر این است که شافت را حول محور گذرنده از مرکز جرم می گرداند تا ارتعاشات منتقل شده به بدنه یا محفظه را تا ۰/01 میلی

متر کاهش دهد. این طرح در پمپهای توربومولکولی و تجهیزات نیمه هادی بسیار ارزشمند است.

AVC می تواند ضریب اطمینان را بالا ببرد و فاصله ی زمانی سرویس کردن دستگاه را کاهش دهد. این ساختار تطبیقی ، ارتعاشات را کاهش می دهد. حتی زمانی که موتور در طول زمان کهنه و کثیف می شود با زا بین بردن پردازش اغتشاشات، می تواند محدوده ی عملکرد دستگاه را گسترش بخشد.

### ملاحظات طراحی

هدف نهایی از طراحی یاتاقان های مغناطیسی، چرخش بدون تماس و مطمئن در کل محدوده ی سرعت دستگاه است. کاهش اندازه سیستم های کنترل دیجیتال، یعنی راه حل با صرفه تر ، و طراحی یاتاقان های مغناطیسی فشرده به معنی تولید دستگاه های کوچکتر و قوی تر است.

سرعت، بار و محیط کاری سه عامل اصلی در توسعه ی سیستم یاتاقان های مغناطیسی هستند. استحکام مکانیکی شافت غالباً عامل محدود کننده ی سرعت است.

ظرفیت استاتیکی ( نیروی بیشینه ای که یاتاقان های مغناطیسی برای نگه داشتن شافت تولید می کنند ) تابعی از متغیرهایی مثل جریان تقویت کننده، مساحت قطبهای مغناطیسی، تعداد حلقه های سیم پیچ و ابعاد فاصله های هوایی است. یک قاعده ی سر انگشتی خوب این است که این مقدار را برابر ۷۵ نیوتن بگیریم. ظرفیت دینامیکی ( محدوده ای که نیروی اعمالی یاتاقان های مغناطیسی تغییر می کند) فقط با یک متغیر یعنی ولتژ تقویت کننده مشخص می شود.

به عنوان مثال فرض کنید یاتاقان مغناطیسی ۱۵۰ نیوتنی به سیستم کنترلی با ولتاژ ۴۰ ولت و جریان ۲ آمپر متصل است. رفتن به محدوده ی ۲۰۰ نیوتنی با افزایش تعداد حلقه های سیم پیچ ها و مساحت قطب های مغناطیسی، به معنی افزایش ظرفیت استاتیکی است. اگر کنترل کننده ثابت بماند در حال تاثیری روی بار ظرفیت دینامیکی نخواهد داشت (فقط ظرفیت استاتیکی تغییر می کند) و توانایی کنترل نامیزانی ها و سایر نیروهای دینامیکی ثابت می ماند. برعکس، تعویض یاتاقان مغناطیسی ۱۵۰ نیوتنی مورد نظر با یک یاتاقان ۱۵۰ نیوتنی دیگر با سیستم کنترلی ۵۰ ولتی ۳ آمپری، ظرفیت دینامیکی سیستم را افزایش می دهد، اما تاثیری روی ظرفیت استاتیکی ندارد.

### کاربردهای مختلف

طراحی منحصر به فرد و قابلیت های گسترده ی بلبرینگ های مغناطیسی، موجب کاربردهای مختلف آنها، به عنوان مثال در ساختن لایه های فابریک نیمه هادی ها و به ویژه در ساختن لایه های نازک سیلیکون، می شود بلبرینگ های مغناطیسی در این گونه کاربردها که به ارتعاش و لرزش بسیار حساسند، می توانند موجب افزایش پایداری شوند.

از آنجا که بلبرینگ های مغناطیسی فاصله ی هوایی دارند، برای کارهای خاص بیولوژیکی استفاده می شوند. سلول های خونی و سایر مایعات می توانند از این فاصله ی هوایی بدون هیچ گونه خسارتی عبور کنند. کمپرسورهای سردسازی، نمونه ی دیگری از کاربردهای مهم بلبرینگ های مغناطیسی هستند. بلبرینگ های مغناطیسی می توانند در سرعت های بالا که کورد نیاز مبرد های جدید است، کار کنند و بر خلاف بلبرینگ



های معمولی که با روغن خنک می شوند، هیچ تاثیری از جهت ایجاد آلودگی روی مبرد ندارند. بلبرینگ های مغناطیسی همچنین می توانند به طور دقیق عایق بندی شوند و لذا برای فرایندهایی که با سیالات مخرب سرو کار دارند، قابل توجه هستند.

### **مزیت بلبرینگ های مغناطیسی**

بلبرینگ ها ی مغناطیسی بدون هیچ گونه تماسی کار می کنند. این منجر به خصوصیات ویژه ای می شود که گستره ی کاربرد این بلبرینگ ها را وسعت می بخشد. برای کاربردهایی که دارای یکی از خصوصیات زیر هستند، عموماً بلبرینگ های مغناطیسی سودمند هستند.

**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 آنها هم معضل دیگری است. در صورتی که هیچ کدام از این موارد برای یاتاقان های مغناطیسی مطرح نیست.

**ایمنی:** این بلبرینگ ها از لحاظ ایمنی قابل مقایسه با موتورهای الکتریکی هستند و معقول است که انتظار داشته باشیم عمری حدود ۱۵ تا ۲۰ سال داشته باشند. سیستم کنترلی آنها هم یک عمر پایدار نسبی پنج ساله دارد که قابل مقایسه با عمر اجزای الکتریکی معمولی است.

**کاربرد در خلاء:** محیط های با خلاء زیاد برای خنک کننده ها ، محیط های ناسازگاری برای فعالیت هستند.

بسیاری از سیستم ها در خلاءهای بالا (  $10^{-6}$  -  $10^{-10}$  ) به شدت به آلودگی خنک کننده های با شرایط متغیر، حساس هستند.

**ارتعاش کم:** بلبرینگ های مغناطیسی برای کاربردهایی که به ارتعاشات دستگاه حساس هستند، بسیار مناسب هستند.

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

**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. به عنوان مثال، سیستم کنترلی می تواند با جبران سازی موقعیت طولی، شافت را طی کار تثبیت کند.

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

**عملیات غوطه وری:** بلبرینگ های مغناطیسی می توانند به طور مستقیم داخل سیال کار کنند و نیاز به آب بندی ندارند که این مورد ، هزینه دستگاه را کاهش می دهد.

**کاهش مصرف انرژی:** بلبرینگ های مغناطیسی، نیروی اصطکاک را کاهش داده و بازده دستگاه را افزایش می دهند. عدم نیاز به سیستم خنک کاری هزینه های مربوط به پمپ ها و فن های سرد کننده را کاهش می دهد.

**نمایش شرایط کاری:** بلبرینگ های مغناطیسی قابلیت نمایش شرایط کارکرد را دارند که این ، نیاز به وسایلی نظیر سنسورهای ارتعاشی و یا شتاب سنج ها را از بین می برد. علاوه بر آن از طریق سیستم کنترلی بلبرینگ های مغناطیسی، به طور مستقیم شافت و سیال کاری قابل مشاهده است.

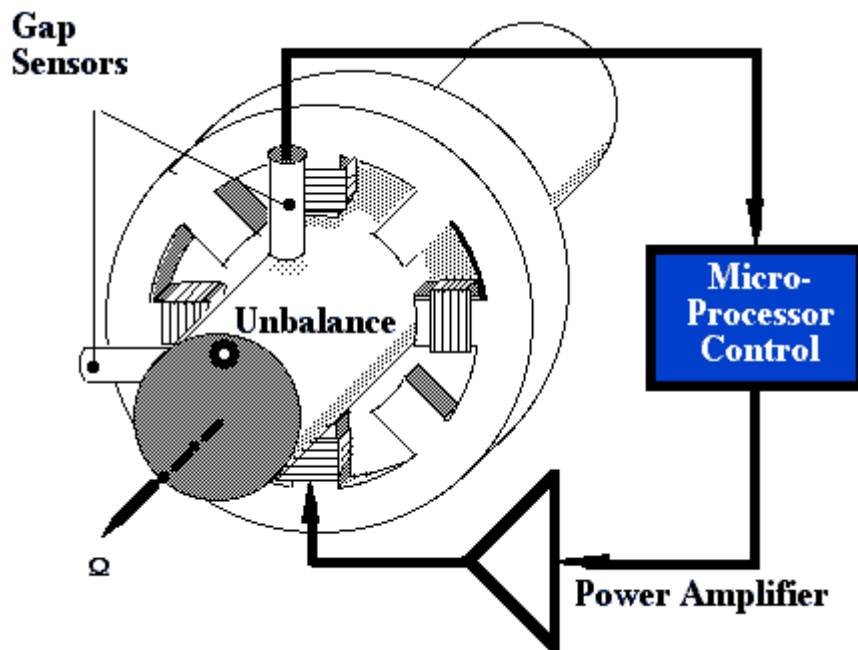
**کنترل فاز:** امروزه پردازشگرهای دیجیتالی کارهای بیشتری غیر از کنترل بلبرینگ های مغناطیسی انجام می دهند و باعث افزایش مزیت بلبرینگ های مغناطیسی نسبت به بلبرینگ های ساده می شوند که از جمله ی آنها می توان کنترل فاز را نام برد.

طرح هماهنگی شافت با سیگنال های خارجی ، عملیات تطابق شافت را (فاز) تا  $0.05$  مقدار مرجعش در سرعت هایی حدود  $36000$  دور در دقیقه موقعیت دهی می کند. کنترل فاز در عملیاتی مثل جداسازی نوترون کاربرد دارد.

**آلودگی (آلایندهی):** فرایندهایی که به آلودگی های بسیار کم نیز حساسند از یاتاقان های مغناطیسی که دارای قطعات و میله هایی از جنس فولاد ضد زنگ، هستند سود می جویند با ظهور ورقه های بسیار نازک نیمه هادی  $300$  میلی متری و یا ابزارهای با اندازه حدود  $0.25$  mm ، حذف آلودگی های کوچک امری ضروری به نظر می رسد.

**فاصله هوایی:** بعضی کاربردها از عملکرد بدون تماس استفاده می کنند. به عنوان مثال در بیوتکنولوژی، پمپهای قلب یا مخلوط کننده ها ، از عدم ایجاد بین سطوح تماس برای جلوگیری از وارد کردن آسیب به سلول ها، استفاده می کنند. در نساجی، تارها و نخ ها می توانند از فاصله ی هوایی رد شوند. فاصله ی هوایی می تواند تا  $2$  mm باشد.

**سرعت های بالا:** سرعت توسط مقاومت مکانیکی شافت محدود می شود. سرعت خطی ( محیطی ) در یاتاقان های شعاعی در حدود  $106 \times 3.5$  ( قطر  $mm * rmp$  ) می باشد. هنگامی ارزش این خصوصیت را بیشتر در می یابیم که می فهمیم روغن کاری در این شرایط بسیار مشکل است.



## فصل دوم

### اصول و مبانی یاتاقان های مغناطیسی

در این فصل با اصول و مبانی کار یاتاقان های مغناطیسی آشنا می شویم.  
این فصل شامل بخشهای زیر می باشد:

- ۱- یاتاقان های مغناطیسی: تعریف ابتدایی از یاتاقان های مغناطیسی
- ۲- اجزاء یاتاقان مغناطیسی و عملکرد هر یک: معرفی اجزاء یاتاقان مغناطیسی و بیان نقش هر یک در سیستم
- ۳- یاتاقان ها و سنسورها: تشریح یاتاقان های مغناطیسی و نحوه استفاده از سنسورها در آنها
- ۴- سیستم کنترل: تشریح سیستم کنترل یاتاقان های مغناطیسی
- ۵- الگوریتم کنترل: تشریح الگوریتم کنترل یاتاقان های مغناطیسی

### ۱- یاتاقان های مغناطیسی:

- یاتاقان های مغناطیسی با ترکیب سه تکنولوژی متفاوت ایجاد می شوند:
- ۱- یاتاقان ها و سنسورها که سخت افزار الکتریکی- مکانیکی هستند و به وسیله ی آنها سیگنال های ورودی جمع آوری شده و نیروهای وارد بر سیستم تحمل می شود.
  - ۲- سیستم کنترل که تامین کننده توان مورد نیاز و نیز کنترل الکترونیکی برای بررسی شرایط سیگنالها می باشد. محاسبه نیروهای جبران کننده و فرستادن فرکانسهای لازم به تقویت کننده ها برای کنترل هر محور از وظایف و قابلیت های این بخش می باشد.

۳- الگوریتمهای کنترل که نقش نرم افزار را در یاتاقانهای مغناطیسی با سیستم کنترل دیجیتالی را ایفا می کنند. پردازش سیگنالهای ورودی پس از تعیین شرایط آنها و محاسبه سیگنالهای دستوری ارسالی به تقویت کننده ها، از وظایف عمده این بخش است.

## ۲- اجزا یاتاقان مغناطیسی و عملکرد هر یک :

یاتاقان های مغناطیسی با اعمال جریان الکتریکی به بخش های ثابت و متحرک ( به ترتیب استاتور و روتور ) باعث معلق شدن محور بوسیله نیروهای جاذبه آهنرباهای الکتریکی می شوند. این مسئله باعث ایجاد یک مسیر شار مغناطیسی می شود که هر دو قسمت استاتور و روتور و فاصله هوایی جداکننده آنها را در بر می گیرد.

این فاصله هوایی همان عاملی است که باعث عملکرد بدون تماس یاتاقان های مغناطیسی می شود. هنگامی که فاصله هوایی بین این دو قسمت کاهش می یابد، نیروی جاذبه افزایش می یابد. بنابراین آهنرباهای الکتریکی ذاتاً ناپایدارند. پس به یک سیستم کنترلی نیازمندیم تا بتواند جریان اعمالی به سیم پیچ ها را تنظیم کرده و پایداری نیرو ها را تامین کند و در نتیجه موقعیت روتور را تثبیت نماید. فرایند کنترل با تعیین و اندازه گیری موقعیت روتور توسط سنسورهای موقعیت آغاز می گردد. سیگنالهای تولید شده این سنسور توسط کنترل الکترونیکی دریافت شده و با موقعیت مطلوب روتور که در ابتدای راه اندازی ماشین به آن داده می شود، مقایسه می گردد. وجود هرگونه اختلاف بین این دو سیگنال باعث آغاز عملیات محاسبه نیروی لازم برای باز گرداندن شافت به موقعیت مطلوب آن می شود.

نتایج این محاسبات به صورت دستوری به تقویت کننده هایی که به استاتور یاتاقان مغناطیسی متصل اند فرستاده می شود. جریان افزایش یافته و سبب افزایش شار می شود. افزایش شار مغناطیسی، افزایش بین نیروی استاتور و روتور را به دنبال دارد که در نهایت به حرکت روتور به سمت استاتور در امتداد محور مورد کنترل می انجامد. همه عملیاتی که در بالا ذکر شد، هزاران بار در ثانیه تکرار می شود و باعث کنترل دقیق ماشین های دوار در سرعت هایی بیش از ۱۰۰۰۰۰ rpm می شوند.

## ۳- یاتاقان ها و سنسورها:

برای انجام حمایت از محور در بیش از یک جهت ، قطب های مغناطیسی برروی محیط یاتاقان شعاعی آرایش می یابند. شکل زیر را ببینید.

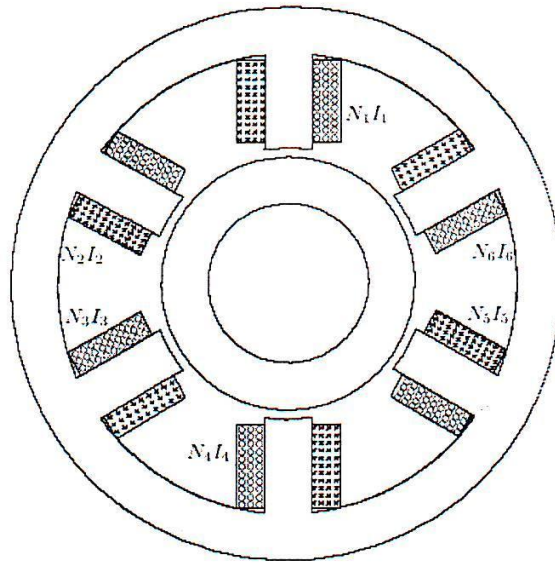


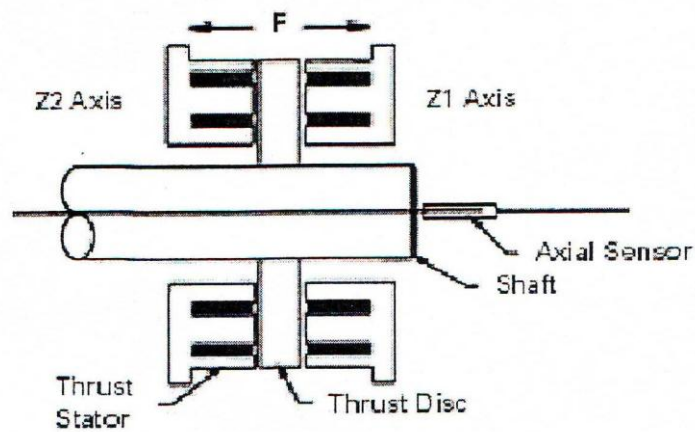
Figure 2.9: Six pole actuator.

ساختار یاتاقان شعاعی بسیار شبیه موتور الکتریکی است و از تجمع ورقه های فولادی تشکیل شده است سیم پیچ ها به دور آنها پیچیده می شوند. از ورقه های فولادی در روتور تیز برای کاهش جریان های گردابه ای استفاده می شود. این جریانها خود عاملی برای اعمال یک نیروی کششی بر روی روتور و ایجاد حرارت در برخی نقاط می شوند.

سنسورها نیز بر روی محیط استاتور آرایش می یابند و معمولاً در داخل یک حلقه یا یک لوله اختصاصی و در مجاورت قطب های استاتور قرار می گیرند. سنسورهای القایی که مورد استفاده قرار می گیرند، اندوکتانس فاصله هوایی بین سنسور و روتور را اندازه می گیرند. در راستای هر محور دو اندازه گیری انجام می شود و موقعیت مرکز روتور نیز به وسیله یک مدار پل محاسبه می شود.

به یک ماشین معمولی در جهت های شعاعی و محوری نیرو وارد می شود. معمولاً از یک جهت یابی ۵ محوری در یاتاقان های مغناطیسی استفاده می شود که شامل دو یاتاقان شعاعی ( که هر یک دو محور دارند ) و یک یاتاقان کف گرد ( با یک محور ) می شود.

یاتاقان کف گرد یک مسیر شار بین روتور دیسکی شکل و دو استاتور در دو طرف آن ایجاد می کند شکل یک یاتاقان کف گرد که بر روی محور موازی شده است در زیر آمده است:



#### ۴- سیستم کنترل

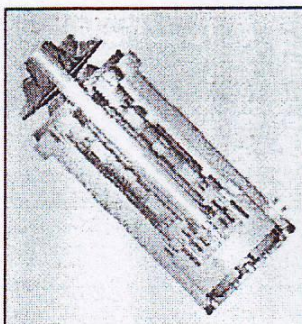
سیستم کنترل از سه بخش زیر تشکیل شده است:

۱- پردازشگر سیگنالهای دیجیتال (DSP)

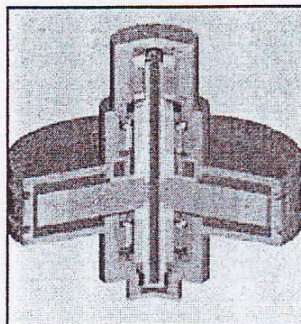
۲- تقویت کننده ها

۳- منبع تغذیه

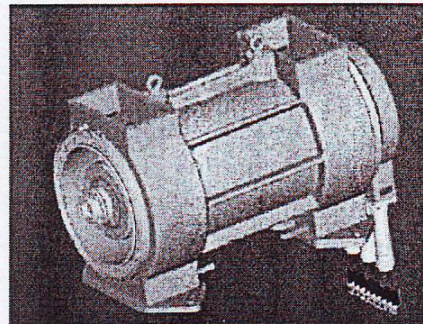
مدارات دیگری نیز وجود دارند که وظیفه اصلاح سیگنال های دریافت شده از سنسورهای موقعیت و نیز تبدیل خروجی های پردازشگر سیگنال به ورودی هایی برای تقویت کننده ها را بر عهده دارند. بنابر این امکان برای کاربر ماشین ایجاد می شود که بتواند اطلاعاتی را در مورد موقعیت مطلوب روتور وارد کرده و منطقی را تعریف کند که موقعیت روتور با شرایط کاری مختلف ماشین هماهنگ شود ( منظور از شرایط کاری مختلف ماشین، راه اندازی ، گرم کردن، حالت خاموش و ... است )



Expander Generator Systems



Flywheel UPS Systems



Gas Turbine Generator Systems



سیستم های کنترل یاتاقان های مغناطیسی می توانند از دو نوع آنالوگ و دیجیتال باشند. سیستم های کنترل آنالوگ بیش از ۳۰ سال است که در یاتاقان های مغناطیسی مورد استفاده قرار می گیرند. اما به سرعت در حال واگذاری جای خود به سیستم های کنترل دیجیتال هستند. سیستم های کنترل دیجیتال از پیشرفت های عظیم علم پردازش سیگنال دیجیتال در یک دهه اخیر بهره مند می باشند و انواع گسترده تری از الگوریتمهای کنترل را قابل استفاده می سازند و در نتیجه اهداف بزرگتر و بیشتری را در دسترسی ما قرار می دهند. زیر مجموعه های کنترل دیجیتال یاتاقان های مغناطیسی عبارتند از : پردازش سیگنال موقعیت، پردازش سیگنال دیجیتال، ارتباطات و محاورات D/A منبع تغذیه و تقویت کننده ها. سیستم های کنترل کوچک که برای پمپهای توربو مولکولی مناسب اند به اندازه یک جعبه کفش می باشند و قادر به تامین توانی معادل 25w برای سیستم یاتاقان می باشند.



سیستم های کنترل بزرگتر که قابلیت تولید توانهایی بیش از 10kw را دارند، در توربوماشینهای بزرگتر مانند پمپها، توربینها و کمپرسورهای گریز از مرکز بکار می روند و طوری طراحی می شوند که با چهارچوب استاندارد صنعت الکترونیک همخوانی داشته باشند.

## ۵- الگوریتم کنترل

برای هر گروه خاص از یاتاقان ها یک طرح کنترلی لازم است که در آن ، رفتار جرم معلق و دوار در محدوده عملکرد سیستم ( سرعت، شتاب، نیروهای دینامیکی و...) مورد محاسبه و پیش بینی قرار می گیرد. این خصوصیات در تحلیل دینامیکی محور بیان می گردند. اطلاعات به دست آمده سبب دستیابی به یک تابع انتقال برای سیستم کنترل می شود که دستیابی به پایداری سیستم در محدوده عملکرد را امکان پذیر می سازد. این تابع انتقال در سیستم های کنترل آنالوگ تحت عنوان مدار کنترلی سخت افزاری وجود دارد و بایستی برای هر هدف و کاربرد خاص بطور جداگانه ای طراحی و ساخته شود. انعطاف و تحمل این سیستم نسبت به تغییرات سیستم اصلی، محدود است و ایجاد هرگونه تغییر و تبدیل، سخت و هزینه بر می باشد. سیستم های کنترل دیجیتالی این امکان را به تابع انتقال می دهند که در یک نرم افزار برنامه ریزی شود که این نرم افزار می تواند به سادگی و با هزینه کم، تغییر یابد. همچنین کنترل دیجیتالی به ما اجازه می دهد که از طرح های کنترلی مدار باز نیز استفاده کنیم. این طرح کنترلی، از سیگنالهای خارجی متغیر استفاده می کنند که مانند سیگنالهای مرجع و سیگنالهای سنسوری هستند که در سیستم های مدار بسته استفاده می شوند.

## فصل سوم

### مزایا و محدودیت ها

یاتاقان های مغناطیسی معمولاً در جاهایی مورد استفاده قرار می گیرند که دارای توانایی های برتری نسبت به انواع دیگر یاتاقان ها می باشند. این توانایی ها تابعی از عوامل زیر می باشند:

۱- قابلیت اعتماد بالا

۲- پاکیزگی

۳- کاربرد در سرعتهای بالا

۴- کنترل موقعیت و ارتعاشات

۵- شرایط خاص و ویژه

۶- طراحی، ارتقاء و آزمایش دستگاهها

۷- عیب یابی ماشین / ماشینهای هوشمند



۱- قابلیت اعتماد بالا:



با استفاده از یاتاقان های مغناطیسی هیچگونه تماسی بین اجزاء ثابت و دوار وجود ندارد و این بدان معناست که هیچگونه فرسایشی اتفاق نم افتد. در اغلب موارد، خطا ناشی از مشکلات الکترونیکی کنترل و تغذیه و یا وجود اشکال در سیم پیچی های الکتریکی، می باشد.

این اجزاء نیز دارای عمر بسیار بیشتری نسبت به یاتاقان های معمولی هستند. یاتاقان های مغناطیسی تنها گروه یاتاقانها هستند که به همراه یاتاقان های پشتیبان بکار گرفته می شوند. علاوه بر این، این یاتاقان ها دارای سیستم داخلی محافظت در برابر اضافه بار هستند. یاتاقان های مغناطیسی می توانند واحد کنترل پردازش سیگنال را در مواقع وجود اضافه بار فوراً از کار بیاندازند.

یاتاقان های مغناطیسی باعث ایجاد قابلیت اعتماد بالا و فواصل تعمیرات طولانی می شوند. و این برای کاربرد های حساس به زمان مانند تولید نیمه هادی ها، پمپهای خلاء و تجهیزات تراکم سازی بکار رفته در خطوط لوله گاز طبیعی، بسیار مفید است.

## ۲- پاکیزگی:

در یک سیستم یاتاقان مغناطیسی، تولید ذرات ریز ناشی از خوردگی و سائیدگی و نیز نیاز به روغنکاری، حذف شده اند. بنابراین در فرایندهای پاکیزه، امکان آلودگی بوسیله روغن، گریس و ذرات جامد وجود ندارد. یاتاقان های مغناطیسی یک راه حل خشک، پاکیزه و اقتصادی برای موارد زیر محسوب می شوند: تولید تجهیزات نیمه هادی، پمپهای خلاء، کمپرسورهای گاز و هوا و بسیاری از توربوماشینهایی که لازم است در سیال فرایند ( حتی تحت فشار ) فرو روند ( غرق شوند ).

## ۳- کاربرد در سرعتهای بالا:

این مسئله که روتور در هوا و بدون تماس با استاتور می چرخد، بدان معناست که نیروی کششی مزاحم وارد شده به روتور به حداقل می رسد. این مسئله به یاتاقان های مغناطیسی این امکان را می دهد در سرعت های فوق العاده بالا نیز بکار گرفته شوند. در این شرایط تنها محدودیت موجود ، مقاومت تسلیم ماده تشکیل دهنده روتور است.

در شرکت Revolve یاتاقان های مغناطیسی با سرعتهای سطحی 250m/s یا 4.5million.DN طراحی شده اند که در آن DN عبارتست از قطر بر حسب میلی متر ضرب در دور بر حسب rpm. برای دستیابی به سرعتی معادل یک چهارم این سرعتدر یاتاقان های معمولی ، به یک سیستم روغنکاری بسیار پیچیده نیاز است. هیچ یک از انواع یاتاقان ها از این حیث قابل مقایسه با یاتاقان های مغناطیسی نیستند. یاتاقان های مغناطیسی توانایی استفاده در سرعتهای بسیار بالا مانند اسپندل ماشین های ابزار و توربو کمپرسورها را دارند.

## ۴ کنترل موقعیت و ارتعاشات:

یاتاقان های مغناطیسی از الگوریتمهای پیشرفته برای تاثیر گذاشتن بر حرکت محور استفاده می کنند. در نتیجه دارای توانایی ذاتی در کنترل دقیق موقعیت محور تا حد میکرون و حذف ارتعاشات به روش مجازی می باشند.

یاتاقانهای مغناطیسی راه حل ساده ای را برای مشکلات زیر در اختیار ما قرار می دهند:

- ارتعاشات اجزاء دوار در اثر نامیزانی: کنترل ارتعاشات نامیزانی در بسیاری از کاربردها مهم است مخصوصاً در توربوماشینها ، اسپندل ماشینهای ابزار و پمپهای خلاء
- انتقال ارتعاشات از اجزاء متحرک به اجزا ثابت که از این طریق به سایر اجزاء نیز منتقل می شود. این موضوع در کاربردهای حساس به ارتعاش مانند تجهیزات تولید نیمه هادی ها و ابزارهای تحلیلی، بسیار مهم است.
- کنترل دقیق محل روتور بدون توجه به اختلالات ( پارازیت های ) خارجی این خصوصیت در اسپندل ماشینهای ابزار با سرعت های بالا ، بسیار مهم است.
- تعیین محل روتور بر مبنای برخی متغیرهای خارجی. این خاصیت در ابزارهای فرایند و اسپندل های ماشین های ابزار با سرعت های بالا کاربرد دارد.
- کنترل فرکانسهای تشدید سازه ای از روتور یا تکیه گاههای الاستیک که در توربوماشینها و موتورهای با سرعت های بالا اهمیت زیادی دارد.

## ۵ شرایط خاص:

دما: یاتاقان های مغناطیسی قادر به کار در دامنه وسیعی از دما هستند. شرکت Revolve برای کاربردهای دمای 256c- تا 220c نیز یاتاقان تولید کرده است یعنی شرایطی که یاتاقان های سنتی نمی توانند در آن کار کنند.

سیالات خورنده: یاتاقان های مغناطیسی را می توان با قرار دادن در اجزاء دوار و ثابت در قوطی های خاص، در محیط های خورنده نیز مورد استفاده قرار داد.

فشار: یاتاقان های مغناطیسی بطور مجازی نسبت به فشار ، غیر حساس هستند. این یاتاقان ها را می توان بدون نیاز به آب بندی در شرایط غوطه ور ( غرق ) در سیال فرایند و تحت فشار بکار برد ( مانند یاتاقان های معمولی ). این یاتاقان ها همچنین می توانند در خلاء نیز بکار گرفته شوند که در این حالت حتی عملکرد موثرتری نیز خواهند داشت زیرا در این حالت اثر اصطکاکی هوا وجود ندارد.

## ۶ طراحی، ارتقاء و آزمایش دستگاهها:

از یاتاقان های مغناطیسی به عنوان محرک (exciter) می توان استفاده کرد که در این حالت نیروی یاتاقان برای ارتعاشات تحریک عمده تنظیم می شود. نیروی تحریک، بدون ایجاد تماس، به روتور وارد می شود و می توان آن را به طور دقیق اندازه گیری کرد.

این خصوصیت ، یاتاقان های مغناطیسی را به ابزاری ارزشمند در طراحی، ارتقاء و آزمایش دستگاهها، تبدیل می کند ( همانگونه که در تحقیقات خصوصیات دینامیکی روتور مطرح می شود).

## ۷- عیب یابی ماشین / ماشینهای هوشمند:

برای انجام کامل وظایف، یک یاتاقان مغناطیسی بایستی موقعیت روتور، ارتعشات روتور و بار یاتاقان را تشخیص داده و تعیین کند. این اطلاعات که در واحد کنترل الکترونیکی مورد پردازش قرار می گیرند، می توانند به عنوان ورودی OEM و یا کاربر نهایی مورد استفاده قرار گیرند و بدین طریق همیشه اطلاعاتی ثابت درباره شرایط کاری ماشین وجود دارد. این مسئله به کاربر اجازه یافتن خطاهای ابتدایی و نگهداری از مجموعه طرح را داده و عملکرد بهینه سیستم را به دنبال دارد.

## محدودیتهای یاتاقان های مغناطیسی:

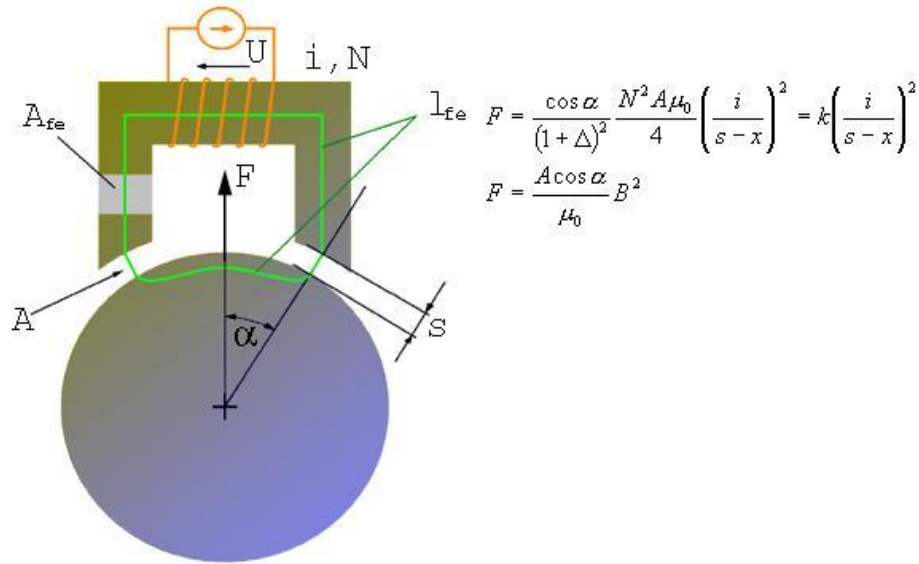
- ۱- یاتاقان های بزرگتر: یاتاقان های مغناطیسی دارای یک ظرفیت بار مخصوص می باشند ( حداکثر بار بر واحد سطح ) که از سیستم های یاتاقان های دیگر کمتر است. این مسئله باعث می شود که یاتاقان های مغناطیسی از لحاظ فیزیکی بزرگتر از یاتاقان های مشابه باشند.
- ۲- پیچیدگی بیشتر: پیچیدگی بیشتر یاتاقان های مغناطیسی معمولاً بدین معناست که هزینه اولیه این یاتاقان ها بیشتر از تکنولوژی های دیگر است. البته هزینه یاتاقان های مغناطیسی در طول سیکل کاری، غالباً کمتر از یاتاقان های قدیمی و معمولی است.
- ۳- نیاز به انرژی الکتریکی: یاتاقان های مغناطیسی برای تغذیه واحد کنترل ، سنسورها و آهنرباهای الکتریکی نیازمند انرژی الکتریکی هستند.

## فصل چهارم

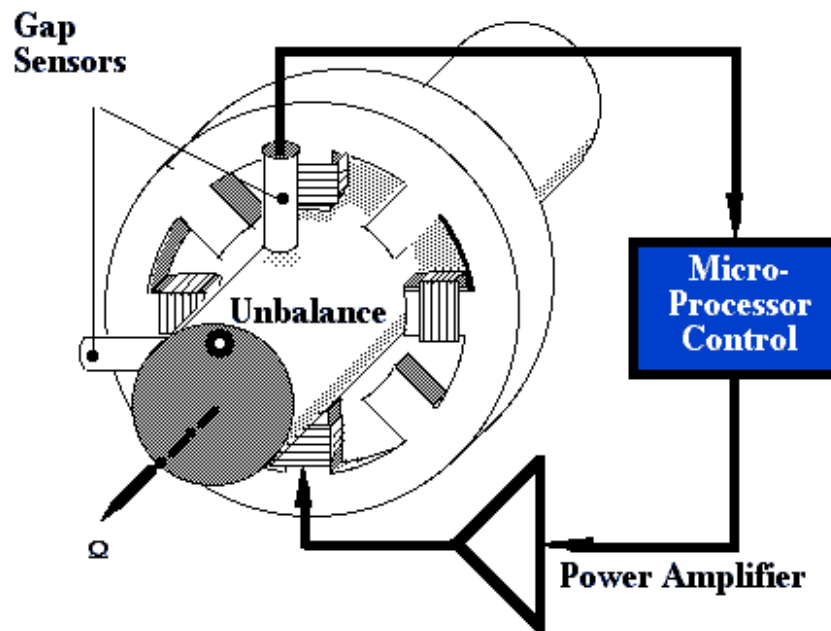
### یاتاقان های مغناطیسی چگونه کار می کنند؟

عملکرد یاتاقان های مغناطیسی بر این اصل استوار است که یک آهنربای الکتریکی، مواد فرو مغناطیس را جذب می کند ( شکل زیر ) بنابراین یک روتور فرو مغناطیس می تواند در یک میدان مغناطیس که توسط آهنرباهای الکتریکی استاتور ایجاد می شود، معلق باقی بماند. از آنجا که استاتور ذاتاً تمایل دارد روتور را آنقدر به خود جذب کند که تماس بین آنها ایجاد شود، بنابراین انجام یک سری عملیات کنترلی برای تعدیل میدان مغناطیسی و قرار دادن روتور در موقعیت مطلوب، لازم به نظر می رسد.

رایج ترین نوع سیستم کنترل شامل یک فیدبک ( بازخورد ) از موقعیت شفت می باشد. سپس این اطلاعات توسط سیستم کنترل برای تعدیل میدان مغناطیسی بوسیله تقویت کننده ها، بکار گرفته می شود. بنابراین موقعیت مطلوب روتور، حتی در شرایطی که شرایط بار (محور) متغیر است نیز قابل دستیابی است.



یک سیستم یاتاقان مغناطیسی **Active** تشکیل شده است از آهنرباهای الکتریکی محرک، سنسورهای موقعیت، تقویت کننده ها و یک سیستم کنترل. محرکها و سنسورها در درون ماشین قرار می گیرند در حالی که سیستم کنترل و تقویت کننده ها در خارج از ماشین قرار می گیرند.



### یاتاقان های شعاعی: Radial Bearings

یک سیستم معمولی دارای دو یاتاقان شعاعی و یک یاتاقان محوری ( کف گرد ) می باشد. هریک از این یاتاقان های شعاعی دارای یک استاتور بوده و یک سیستم حسگر نیز در مجاورت روتور آنها نصب شده است. این روتور خود بر روی محور ماشین سوار شده است.

روتور از تجمع تعدادی ورقه های حلقوی تشکیل شده است که بر روی یک قطعه بوش مانند قرار می گیرند و این مجموعه بر روی محور ماشین جا زده می شود. این ورقه ها برای کاهش تلفات جریان گردابه ای و افزایش قابلیت واکنش یاتاقان ( به شرایط جدید ) بکار گرفته می شوند. استاتور نیز از تجمع تعدادی ورقه های حلقوی تشکیل شده است و دارای تعدادی قطب بر روی قطر داخلی خود می باشد سیمها به دور هریک از قطب ها پیچیده می شوند و بدین ترتیب یاتاقان به ۴ ربع دایره تقسیم می شود. سیم پیچها در هر ربع دایره به صورت سری پیچیده می شوند و این باعث می شود که هر ربع دایره به یک آهنربای الکتریکی مجزا تبدیل شود.

معمولاً در ماشین های عمودی، ربع دایره ها با زاویه ۴۵ نسبت به خط عمود تنظیم می شوند و هر دو ربع دایره مقابل هم تشکیل یک محور را می دهند. بنابر این یک یاتاقان شعاعی به کمک دو محور تعریف می شود.

مجموعه ای از سنسورها که موقعیت شفت را تعیین می کنند، در فاصله ای هرچه نزدیکتر به یاتاقان نصب می شوند.

## یاتاقان های کف گرد: Thrust Bearing

در سیستم های صنعتی، یاتاقان های کف گرد دارای دو استاتور هستند که هر یک در یک طرف روتور دیسکی شکل قرار می گیرند. استاتور را می توان از فولاد سخت ساخت و یا برای ساخت آن از گوه استفاده کرد. در حالت استفاده از گوه، در بین گوه ها شیارهای شعاعی وجود دارد که داخل آنها با لایه های ورق پر شده است تا واکنش یاتاقان را بهبود بخشند. همچنین استاتور ها دارای یک یا دو شیار جانبی هستند که بر روی سطح آنها ماشین کاری شده است. این شیارها با سیم پیچهایی پر می شوند. با وجود یک استاتور در هر طرف روتور، یاتاقان های کف گرد می توانند نیروهای محوری را در هر دو جهت خنثی کنند. سیستم کنترل با استفاده از سیگنالهای دریافت شده از سنسورهای موقعیت، می تواند موقعیت میل محور را تعیین کند. این سیگنال با حالت مطلوب مرجع مقایسه می شود و میزان خطای موقعیت میل محور تعیین می شود. پس از تشخیص دقیق شرایط، سیگنالی به تقویت کننده ها فرستاده می شود که این تقویت کننده ها جریان عبوری از سیم پیچهای یاتاقان را کنترل و تنظیم می کنند.

### فصل پنجم

#### ماهیت سیستم کنترل

سیستم کنترل ما را قادر می سازد تا جریان یاتاقان را با کمک اطلاعات فیدبک حاصل از موقعیت میل محور کنترل کنیم. این سیستم، کنترل مدار بسته یا فیدبک نامیده می شود و برای نگه داشتن میل محور در حالت پایدار، ضروری است. به بیان دیگر سیستم کنترل، جریان قسمت بالایی یاتاقان را هنگامی که محور بالاتر از مرکز خود قرار دارد کاهش داده و هنگامی که محور زیر مرکز ثقل خود قرار دارد، افزایش می دهد. معمولاً سیستم کنترل یاتاقان مغناطیسی به صورت تک ورودی - تک خروجی (SISO) اجرا می شود و این بدان معناست که اطلاعات مربوط به شفت که از سنسور خاص وارد می شود، فقط باعث کنترل و تغییر جریان در راستای محور متناظر با آن می شود. سیستم های کنترل همچنین می توانند از نوع چند ورودی - چند خروجی (MIMO) باشند. هنگامی که به کنترل بهتر و دقیق تر نیاز داشته باشیم از (MIMO) استفاده می شود همچنین در مواقعی که بر روی محور از یک کوپلینگ صلیبی مهم استفاده شده باشد از MIMO استفاده می شود. اجزاء سیستم کنترل عبارتند از: یک سنسور موقعیت و اجزاء الکترونیک همراه آن، یک کنترلر و تقویت کننده ها. این اجزاء در زیر شرح داده می شوند:

#### - سنسورها :

سنسور اطلاعات مورد نیاز کنترلر در مورد موقعیت محور را تامین می کند که این اطلاعات به صورت ولتاژ الکتریکی می باشد. معمولاً سنسورها طوری تنظیم می شوند که در هنگامی که محور در موقعیت مطلوب

قرار دارد، ولتاژ نول تولید می کنند، هنگامی که محور بالاتر از محل مطلوب است ولتاژ مثبت و هنگامی که پایین تر از محل مطلوب است، ولتاژ منفی تولید می شود.

### **- کنترلر:**

وظیفه کنترلر، دریافت سیگنالهای موقعیت از سنسورهای موقعیت، تحلیل این اطلاعات و فرستادن دستورات لازم به تقویت کننده ها برای تغییر جریان است. کنترلر شامل فیلترهای ضد شکستگی یا فیلترهای افزایش دقت ( anti-aliasing )، مبدل های آنالوگ به دیجیتال، پردازشگر سیگنال دیجیتال و مولد مدولاسیون پهنای پالس ( PWM ) میباشد.

ولتاژ ارسالی از سنسور موقعیت از فیلترهای افزایش دقت عبور می کند تا اختلالات فرکانس بالای آن حذف شوند. این اختلالات می توانند باعث ایجاد خطای سیگنال در گزارش موقعیت محور شوند. علاوه بر این از آنجا که کنترلر مرتباً از سیگنالها نمونه برداری می کند، بعضی اطلاعات فرکانس بالا ممکن است به صورت بصورت اطلاعات فرکانس پایین غلط وارد و دریافت شوند.

بنابراین سیگنالها بایستی ابتدا از این فیلتر عبور کنند بعد از آنکه محتویات فرکانس بلال حذف شدند، سیگنالهای موقعیت بوسیله مبدلهای آنالوگ به دیجیتال ( A/D ) نمونه برداری می شوند، در این مرحله سیگنال به فرمی در می آید که واحد پردازش سیگنال دیجیتال بتواند آن را پردازش کند. این اطلاعات دیجیتالی سپس توسط پردازشگر سیگنال دیجیتال از یک فیلتر دیجیتال عبور داده می شوند. این عمل باعث می شود که سیگنال خروجی متناسب با جریان مورد نیاز برای اصلاح موقعیت محور ایجاد شود.

این جریان مورد نیاز با جریان واقعی موجود در یاتاقان مقایسه می شود. این جریان واقعی نیز که توسط سنسورها احساس می شود، فیلتر شده و توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال نمونه برداری می شود. از خطای موجود بین مقادیر جریان مورد نیاز و جریان واقعی، برای تعیین سیگنال PWM برای ارسال به تقویت کننده ها استفاده می شود.

این اطلاعات سپس به مولد مدولاسیون پهنای پالس فرستاده می شود که نتیجه آن، تولید شکل موج PWM و ارسال آن به تقویت کننده ها می شود. عمل ایجاد جریان کنترلی مورد نیاز بایستی حتماً قبل از نمونه برداری بعدی سیستم از موقعیت محور انجام شود. عمل نمونه برداری و ایجاد جریان با فرکانسی حدود 10KHz تکرار می شوند.

### **- تقویت کننده ها:**

هر محور یاتاقان دارای یک جفت تقویت کننده است که جریان مورد نیاز سیم پیچهای یاتاقان را تامین کرده و باعث ایجاد نیروی جاذبه برای اصلاح موقعیت روتور در راستای آن محور خاص می شود. تقویت کننده ها به بیان ساده تر نوعی سوئیچ ولتاژ بالا هستند که با فرکانس بالا روشن و خاموش می شوند که البته این روشن و خاموش شدن بر اساس دستوراتی که بوسیله سیگنال PWM و از واحد کنترل دریافت می شود، انجام می گیرد.

### سیستم کنترل چگونه کار می کند؟

یک کنترلر را می توان بوسیله تابع انتقال آن مشخص کرد. تابع انتقال در واقع رابطه ای بین ولتاژ خروجی کنترلر و سیگنال خطا ایجاد می کند و می توان آن را به کمک دو نمودار نمایش داد. گراف اول ارتباط بین بهره خروجی کنترلر و ورودی آن را در یک دامنه فرکانس بیان می دارد و گراف دوم ارتباط بین فاز خروجی و ورودی را در یک دامنه فرکانس بیان می کند. یک نمونه از تابع انتقال کنترلر در زیر آمده است.

در یاتاقان های مغناطیسی معمولی از کنترلر های خطی استفاده می شود که این کنترلرها ، تابع انتقالی را تولید می کنند که مستقل از دامنه و بزرگی سیگنال ورودی است.

خروجی یک کنترلر خطی بوسیله یک فاز و یک بهره به ورودی مربوط می شود و فرکانس آن با فرکانس ورودی برابر است. استفاده از کنترلرهای خطی به این دلیل است که این کنترلرها خصوصیات یاتاقان را از اندازه سیگنال اختلال ( آشفتگی ) مستقل می سازند و این ، تحلیل یاتاقان های مغناطیسی را ساده تر می کند.

تابع انتقال کنترلر می تواند به صورت نسبت دو چند جمله ای در فضای S بیان شود:

$$G(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)}$$

قطبها (p) و صفرهای (z) تابع تبدیل به آن شکل می دهند.

### کنترلر PID :

یک کنترلر PID ساده دارای تابع انتقالی مانند زیر است. توابع انتقال یاتاقانهای مغناطیسی دارای جملات زیاد دیگری نیز هستند اما این تابع ساده را می توان برای شرح رفتار سیستم بکار گرفت:

$$G(s) = \frac{K_i + K_p + k_d s}{S}$$

جملات به ترتیب عبارتند از انتگرال گیر ، تناسب و مشتق گیر که هر یک تاثیر خاصی بر رفتار یاتاقان دارند. عامل تناسب: عامل تناسب عبارتست از بهره خالص بدون هیچگونه تاثیر بر روی فاز. بهره و فاز مستقل از فرکانس هستند. عامل تناسب باعث می شود که افزایش جریان متناسب با میزان سیگنال خطا باشد. تاثیر آن در رفتار یاتاقان، مشابه عملکرد یک فنر است. نیرویی که محور را به محل مرکز ثقل آن بر می گرداند متناسب سیگنال خطای موقعیت محور افزایش می یابد.



سیستم یاتاقان با کنترل تناسبی ساده ناپایدار بوده و دارای نوسان می باشد زیرا هیچ مکانیزمی برای اعمال میرایی به سیستم وجود ندارد. میرایی مورد نظر را می توان با یک عامل مشتق گیر ایجاد کرد. عامل مشتق گیر باعث می شود که با افزایش فرکانس، بهره نیز افزایش یابد و نیز باعث افزایش فاز به میزان ۹۰ درجه پیش فاز می شود که این تقدم فاز به میرایی مربوط می شود.

**عامل مشتق گیر:** کنترل مشتقی نیرویی را متناسب با سرعت محور ( یا مشتق مکان ) ایجاد می کند که باعث جذب انرژی یاتاقان از روتور می شود. اثر میرایی مانند عملی است که کمک فنر در ماشین انجام می دهد.

کنترلری که فقط دارای عوامل مشتق گیر و تناسبی باشد همیشه دارای یک فاصله ثابت با نقطه تنظیم می باشد. این فاصله ناشی از این حقیقت است که کنترلر های تناسبی و مشتقی، در صورت وجود سیگنال خطا، فقط می تواند یک خروجی غیر صفر تولید کند.

نگامی که شفت در موقعیت مطلوب قرار دارد خروجی کنترلر صفر خواهد بود زیرا خطای اعلام شده توسط سیگنال صفر است. برای حل این مشکل از عامل انتگرال گیر استفاده می شود.

**عامل انتگرال گیر:** انتگرال گیر خروجی تولید می کند که با نرخ متناسب با اندازه سیگنال خطا در طول زمان افزایش می یابد. بنابراین هرچه سیگنال، مدت زمان بیشتری را در حالت غیر صفر باشد، خروجی انتگرال گیر بزرگتر خواهد بود. اگر سیگنال خطایی دریافت نشود، انتگرال گیر خروجی خود را ثابت نگه می دارد. برای شرایط حالت پایدار، انتگرال گیر خروجی خود را تا زمانی که سیگنال خطا صفر شود، افزایش می دهد. در فرکانس های پایین، بهره کنترلر حداکثر و فاز (۹۰-) درجه است. یک کنترلر ساده PID باعث ایجاد دو صفر برای کنترلر می شود. یک صفر سبب می شود که شیب بزرگی، بر روی نمودار تابع انتقال افزایش یابد. و همچنین باعث می شود که فاز دقیقاً ۹۰ درجه افزایش یابد.

فرکانس صفرهای PID بوسیله نسبت های بین بهره های عوامل تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر تعیین می شود. صفرهای انتگرال گیر بر بهره عامل تناسب تعیین می شود (  $K1/Kp$  بر حسب rad/sec ). این فرکانس ، بیانگر فرکانسی است که پائین تر از آن کنترلر انتگرال گیر و بالاتر از آن کنترلر مشتق گیر عمل می کند. صفرهای عامل مشتق گیر در فرکانسی قرار می گیرند که با تقسیم عامل بهره تناسب بر بهره عامل مشتق گیر تعیین می شود (  $kp/kd$  بر حسب rad/sec ). این صفر در فرکانسی قرار دارد که پائین تر از آن محدوده کنترل تناسبی و بالاتر از آن محدوده کنترل مشتق گیر قرار دارد. به یاد داشته باشید که فاز در محدوده هر یک از این فیلترها ، افزایش می یابد.

### **فیلتر پائین گذر:**

بهره تابع انتقال با افزایش فرکانس به سمت بی نهایت میل می کند مشخص است که ساختن سیستمی واقعی با این مشخصات غیر ممکن است. بنابراین بهره باید به هر حال مقدار محدودی را در دامنه فرکانسهای بالا اختیار کند. این کار با به کار گیری یک فیلتر پائین گذر امکان پذیر است. فرکانس این فیلتر معمولاً بالاتر از کلیه فرکانسهای بالای سیستم تنظیم می شود.

فیلتر پائین گذر علاوه بر کاهش بهره در فرکانسهای بالا، اثر ناخواسته و نامطلوبی دارد که این اثر کاهش میزان تقدم فاز سیستم است که باعث کاهش میرایی کنترلر در فرکانسهای بالاتر می شود. بنابراین محل قرار گرفتن این فیلتر بسیار حساس و با اهمیت است.

### صفرها و قطبهای اضافی :

صفرهای اضافی دقیقاً همان تاثیری را دارند که در مورد صفرهای عوامل مشتق گیر و انتگرال گیر در یک کنترلر PID دارند. قطبها تاثیر معکوس دارند و باعث کاهش شیب شده و فاز را نیز ۹۰ درجه کاهش می دهند. صفرها و قطبهای اضافی بایستی به صورت جفت اضافه شوند تا شیبی که کنترلر فرکانس بالا در آن کار می کند، تغییر نکند.

### فیلترهای notch (شیار) :

یکی از ابزارهای اضافی که برای تثبیت حالت روتور بکار می رود فیلترهای notch هستند. وسط شیار دارای بهره کمی است برای جلوگیری از تحریک مودهای بالای محور مناسب است. فاز در بالای شیار مثبت است که نشانه میرایی مناسب سیستم است. این حالت برای تقویت میرایی مستقیم در محدوده فرکانسی که به آن نیاز داریم مناسب است. مرکز شیار بر روی یک فرکانس حلقوی شدن و یا درست در زیر این فرکانس قرار داده می شود. کاهش بهره و یا تقدم فاز بیش از حد سیستم هر دو می توانند حرکت محور را در فرکانس حلقوی شدن حذف کنند معمولاً فیلترهای شیار در فرکانسهای بالاتر از بالاترین فرکانس دوران محور مورد استفاده قرار می گیرند.

### مجاورت سنسورها :

در یک یاتاقان با سنسورهایی که در وسط آن ( در کنار هم ) قرار گرفته اند، یک کنترلر PID با یک فیلتر پائین گذر تمام آن چیزی است که برای پایدار ساختن حالت روتور به آن نیازمندیم. در شکل و ترکیب اغلب یاتاقان ها ، سنسورها در مجاورت یک سر یاتاقان قرار داده می شوند. این بدان معناست که برای حالتی خمیدگی روتور، سنسور نمی تواند دقیقاً حرکتی را که در یاتاقان اتفاق می افتد، تشخیص دهد. در مودهای بالاتر حرکتی که در یاتاقان اتفاق می افتد می تواند کاملاً با آنچه سنسور تشخیص می دهد متفاوت باشد. که این مسئله می تواند سبب نوسانات محور و یا حلقوی شدن در فرکانسهای بالا شود. برای مقابله با این مشکل از کنترلرهای کامل و درجه بالاتر استفاده می شود.

استفاده از فیلترهای پائین گذر، فیلترهای notch و صفر و قطبهای اضافی برای پایدار کردن حلقه کنترل می باشد و به این فرایند ، عمل تنظیم یا میزان کردن می گویند.

## فصل هفتم

### خصوصیات دینامیک روتور

برای درک بهتر تاثیر عواملی مانند محل قرار گیری سنسورها ، بر روی عملکرد سیستم یاتاقان مغناطیسی و کارکرد کلی ماشین، لازم است که خصوصیات دینامیکی روتور برای سیستم مورد آزمایش قرار گیرد.

این کار شامل انجام یک تحلیل در مرحله طراحی و نیز مراحل سوار کردن اجزاء دوار سیستم و یا هر عملی که مربوط به مودهای رفتاری آزاد- آزاد سیستم می باشد، می شود. هنگامی که این تحلیل به نتایج رضایت بخش می انجامد، یک تحلیل کاملتر انجام می گیرد که تاثیر یاتاقان مغناطیسی و سیستم کنترل را مطرح و معرفی می کند.

## فصل هشتم

### یاتاقانهای کمکی

در آخر ممکن است به این سوال بر بخوریم که اگر با قطع برق در سیستم مواجه شویم چه اتفاقی می افتد؟ قطبهای استاتورها و سطح خارجی روتورها سطوحی هستند که ماشین کاری دقیق شده اند. برای محافظت از این سطوح، در حالت قطع برق، از یاتاقان های کمکی علاوه بر منبع تغذیه متناسب استفاده می شود. سیستم های یاتاقان مغناطیسی که به موتورهای بدون جاروبک مجهزاند، از انرژی دورانی روتور برای تولید انرژی مورد نیاز سیستم کنترل استفاده می کنند. هنگامی که برق قطع می شود، سرعت سیستم افت می کند و سپس با یاتاقان های کمکی درگیر می شود. سیستم های دیگر، از یک باتری پشتیبان در مواقع قطع برق استفاده می کنند. یاتاقانهای کمکی که می توانند از نوع غلتشی معمولی و یا لغزشی باشند دارای لقی معادل  $1/2$  قی یاتاقان مغناطیسی می باشند. در هنگام قطع برق مجموعه اجزاء دوار توسط یاتاقانهای کمکی نگه داشته می شوند. به این یاتاقانها در پاره ای از اوقات یاتاقانهای پشتیبان یا یاتاقانهای نگه دارنده نیز گفته می شود.

## فصل نهم

### کنترل تطبیقی ارتعاشات

#### خصوصیات کنترل تطبیقی ارتعاشات:

- طرح کنترلی که به صورت اتوماتیک خود را با تغییرات شرایط کاری سازگار می سازد.
- ارتعاشات روتور یا بدنه (استاتور) را کنترل می کند ( هر کدام که در کاربرد مورد نظر و یا فرآیند ماشین مهمتر باشد)
- با استفاده از یک الگوریتم برای اندازه گیری و اعمال نیرو به یاتاقان مغناطیسی، اثرات نامیزانی های همزمان را خنثی می کند.

#### مزایا و فواید کنترل تطبیقی ارتعاشات:

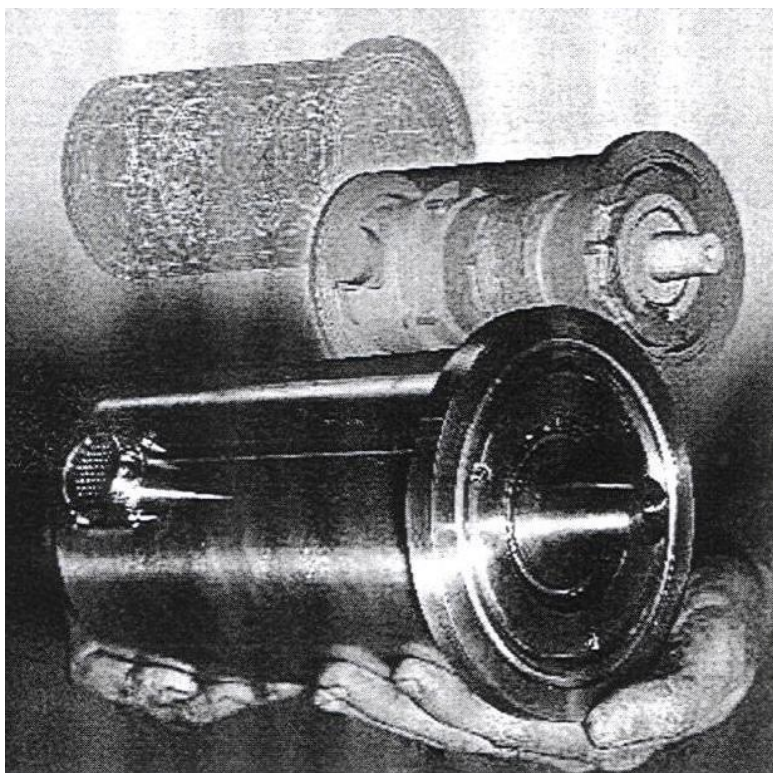
- با به حداقل رساندن مقدار ارتعاشات، خطاها و اشکالات ماشین را که در اثر ارتعاشات ایجاد می شوند را به حداقل می رساند.
- عملیات تطبیقی کاهش ارتعاشات سبب آن می شود که حتی در شرایطی که روتور دارای رسوب یا جرم گرفتگی می باشد و یا شرایط کاری زیاد تغییر پیدا می کند نیز ارتعاشات در کمترین سطح ممکن باشند.
- ارتعاشات بدنه در حد کمتر از ۰.۰۱ میکرون می باشند.
- ایجاد دسترسی آسان و قابلیت اعتماد بیشتر. با داشتن فواصل تعمیرات طولانی تر باعث افزایش بهره وری ما از دستگاه مورد استفاده می شود.
- در تمامی سرعتها می تواند کارایی داشته باشد. این سیستم توانمندتر از سیستم متعادل سازی بوسیله فیلترهای notch می باشد.



## فصل دهم

### کاربردها

در پاسخ به نیاز روز افزون صنعت به فناوری های جدید، شرکتهای تولیدکننده این یاتاقانها ، با تلفیق دانش و تجربه خود با آخرین تکنولوژی ها ، سعی در یافتن بهترین راه حل برای کاربردهای مختلف دارند. تکنولوژی یاتاقانهای مغناطیسی طیف وسیعی از کاربردها را دارد که در مورد هر کاربرد، طراحی به نحوی انجام می گیرد تا بتواند به بهترین شکل پاسخگوی نیازهای مشتری باشد .



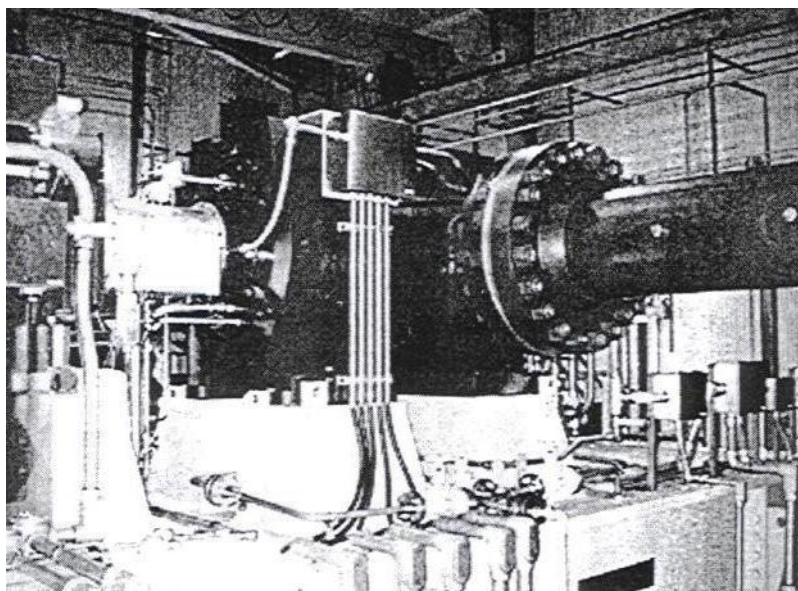
در این بخش به بررسی برخی از یاتاقانهای مغناطیسی ساخته شده در شرکت SKF برای کاربردهای خاص می پردازیم:

## **۱- کمپرسورها:**

یاتاقانهای مغناطیسی برای طیف وسیعی از توربو کمپرسورهای صنعتی، در محدوده وسیعی از کار فشرده سازی گازها مطلوب می باشند. یاتاقانهای مغناطیسی به طور خاص برای گاز طبیعی، هیدروژن و فرآیندهای تبرید و فرآیندهای مرتبط با هوا، مناسبند.

### **۱.۱ - کمپرسور گاز طبیعی:**

این کمپرسور سانتریفوژ، برای خطوط لوله گاز طبیعی طراحی شده است. ( شکل زیر را ببینید)



بکار گیری یاتاقانهای مغناطیسی در این محصول ( به صورت کوپل شده با یک سیستم آب بندی گاز ) یک سیستم بی نیاز از روغن را برای شرکتی استفاده کننده به ارمغان می آورد. این مجموعه برای کار در 11429rpm طراحی شده است و قادر به انتقال و جابجایی  $2.1 * 06m^3$  (775MMSCFD) گاز در روز است.

### مزایای این مجموعه:

- این کار باعث کاهش فضای مورد نیاز برای نصب سیستم شده است زیرا دیگر نیاز به سیستم روغنکاری وجود ندارد.
- این خصوصیت مخصوصاً هنگامی اهمیت می یابد که این سیستم با یک موتور الکتریکی کوپل شود که بدون گیربکس بوده و در آن از یاتاقانهای مغناطیسی استفاده شده باشد.
- هزینه های بلند مدت مربوط به نگهداری و قطعات اضافی حذف می شود.
- تلفات مربوط به یاتاقانها کم می شود.
- قابلیت اعتماد و در دسترس بودن آن افزایش می یابد.
- قابلیت‌های نظارتی و بازبینی سیستم بهبود می یابد.

مشتری ( سفارش دهنده ): شرکت Oresser – Rand

### مشخصات یاتاقانها:

شعاعی: 4900N (بار) شعاعی

کف گرد: 24500N

سرعت: M429

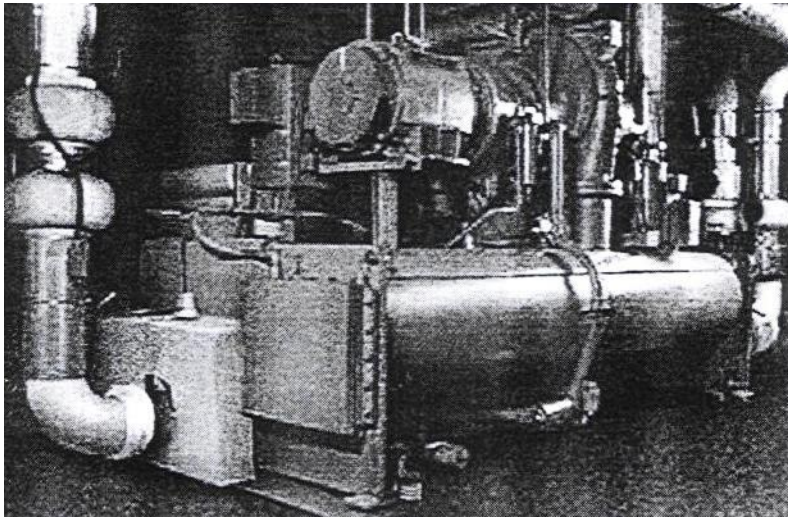
نوع کنترلر: MB50200

## مشخصات سیستم:

- کمپرسور سانتریفوژ
- دهانه یاتاقان: 1450mm
- جرم روتور: 385kg
- محیط خنک کننده: هوا

## ۱.۲ - کمپرسور تبرید:

این سیستم، یک ممبرسور جوشکاری شده و درزگیری شده بدون روغنکاری برای عملیات تبرید و سرمایش می باشد که ماده مبرد آن یک ماده جدید بدون CFC می باشد. در مورد این ماده مبرد جدید، برای حفظ بازده بالای سیکل ، عملکرد بدون روغن سیستم ضروری می باشد. علاوه بر این هیچگونه روغنی برای افزایش بازده انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی در سیستم بکار گرفته نشده است. تکنولوژی یاتاقانهای مغناطیسی برای این سیستم انتخاب شده است.



مشتری ( سفارش دهنده ) : شرکت Mainstream engineering  
نوع اسپیندل محرک: 55KW , 24000RPM , Hyperspin As55/24

## مشخصات یاتاقانها:

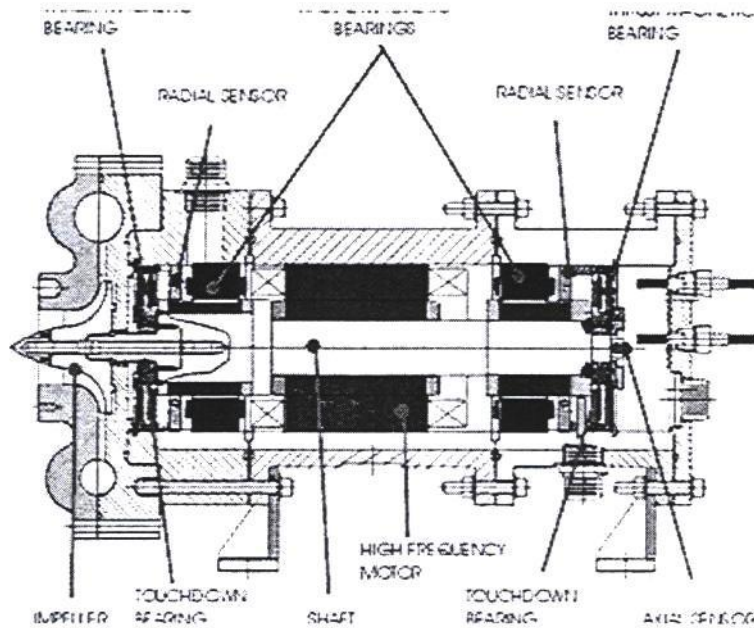
- شعاعی: 1320N
- کف گرد: 2200N
- نوع کنترلر: MB15300

## مشخصات سیستم:

- درزگیری و آب بندی کامل



- فشار محفظه بدنه: گروه (300 psig) 20 bar
- موتور، یاتاقانها و معقوله ساخت شرکت Revolve می باشد.



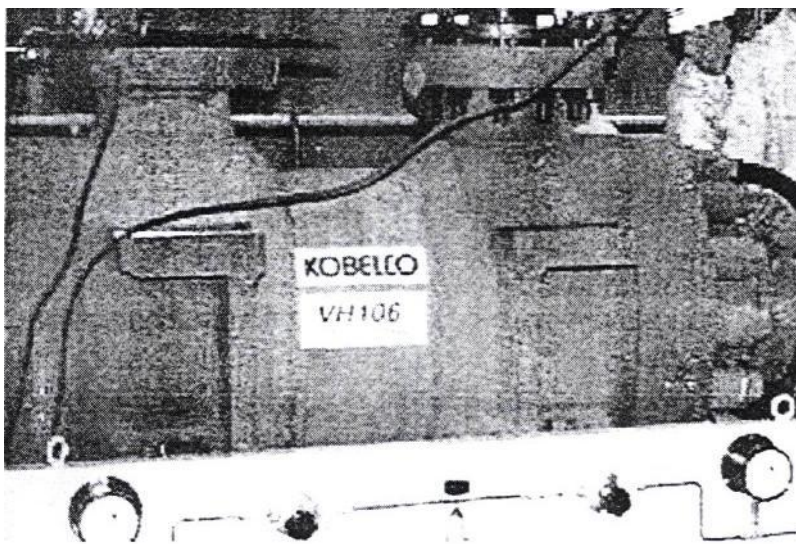
نمای برش خورده

### ۱.۳ - کمپرسور هیدروژن:

VH 106 یک کمپرسور چند مرحله ای از نوع میله ای ( beam-type ) برای هیدروژن در فرآیندهای صنعتی می باشد.

بکارگیری یاتاقانهای مغناطیسی در این سیستم ( به شکل کوپل شده با یک سیستم خشک آب بندی گاز ) باعث می شود که کمپرسور کاملاً بی نیاز از روغن شود. این سیستم برای کار در 1205 rpm طراحی شده است.





مزایای استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی در این سیستم:

- افزایش قابلیت اعتماد و در دسترس بودن
- کاهش فضای مورد نیاز برای نصب سیستم به دلیل حذف سیستم روغنکاری
- کاهش هزینه های بلند مدت نگه داری و قطعات اضافی
- افزایش بازدهی از طریق کاهش تلفات در یاتاقانها

مشتری (سفارش دهنده): شرکت kobelco

#### مشخصات یاتاقانها:

شعاعی: 4500 N

کف گرد: 18000 N

سرعت: 12054 rpm

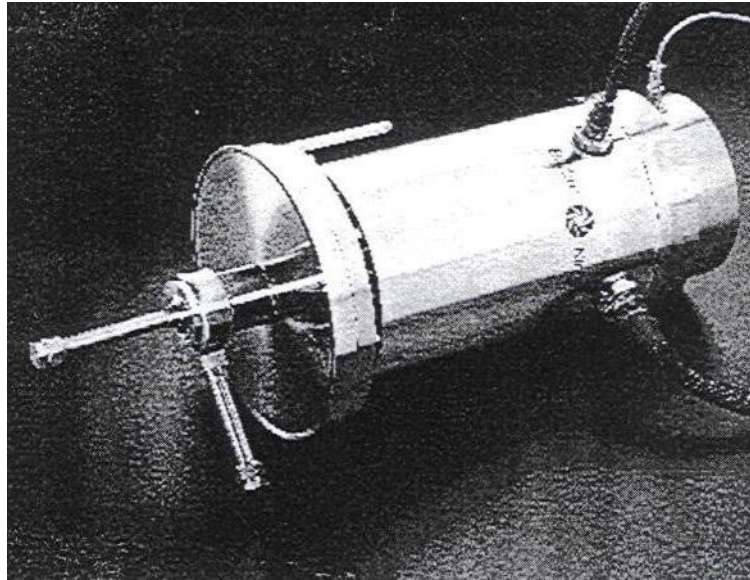
نوع کنترلر: MB50200

#### مشخصات سیستم:

- کلاس I , II , DIV CD, GRP همراه با تصفیه هوا
- محدوده سرعت 8-12 Krpm
- اولین مورد خمشی تقریباً در 7Krpm
- جرم روتور: 360 kg
- طول روتور: 2m

## ۱.۴ - پمپ گردش هیدروژن:

این پمپ برودتی، هیدروژن فوق بحرانی را در یک طراحی آب بندی شده به گردش در می آورد تا نشت سیال از آب بندهای شفت حذف شود. یاتاقانهای مغناطیسی این سیستم گردش دهنده برودتی را قادر می سازند تا در سرعتهای بالا کار کرده و مدت زیادی از کار خود بتواند هیدروژن را در فاز فوق بحرانی نگه دارد.



یاتاقانهای مغناطیسی شرکت SKF شرایط دینامیکی بهینه ای را برای محور ایجاد می کنند که ما را قادر می سازد تا محور بردانه را بتوانیم به مقدار زیادی افزایش طول دهیم.

مشتری ( سفارش دهنده ) : Barber-Nicholas Inc Oak Ridge National laboratory:

نوع اسپیندل محرک: Hyperspin DC 900 hs- 900 w , 60000rpm

### مشخصات یاتاقانها:

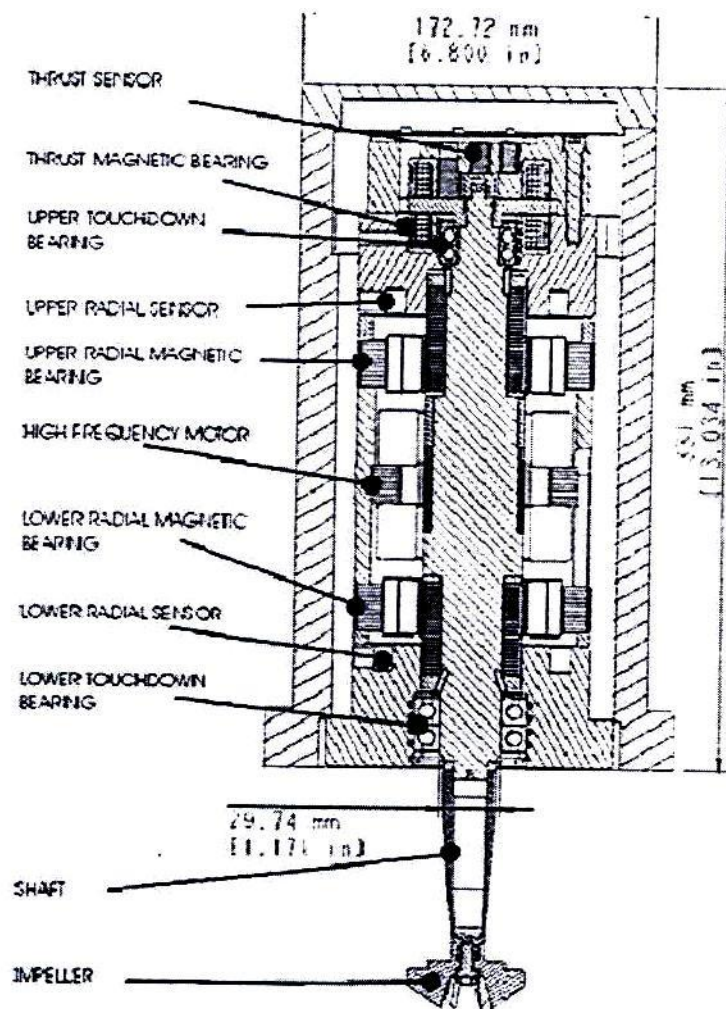
شعاعی 267 N (60lb)

کف گرد: 222 N (50lb)

نوع کنترلر: MB350

### مشخصات سیستم:

- محیط هیدروژن فوق بحرانی در فشار 19 bar و تا دمای 17 k بر روی پروانه
- پروانه و محور افزایش طول یافته توسط مشتری جوشکاری می شوند
- محفظه خارجی توسط خود مشتری ساخته شده است



نمای برش خورده

## ۲ تولید انرژی توزیعی:

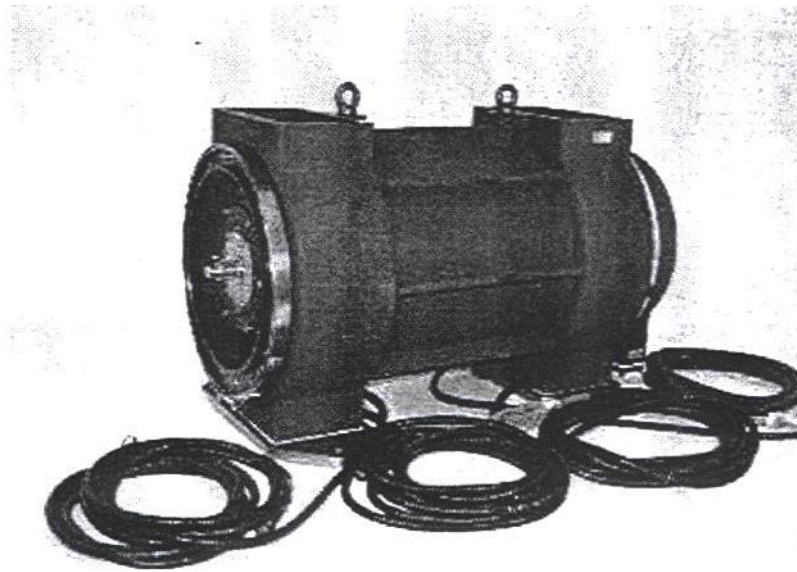
نیاز فزاینده جهانی به نامین انرژی با کیفیت بالا باعث می شود که تجهیزات انرژی توزیعی سمت استانداردهایی در مینه عملکرد کلی، قابلیت اعتماد، توانمندی و سادگی اجزاء، پیش بروند. یاتاقانهای مغناطیسی شرکت SKF برای مقابله با مشکلاتی که در زمینه این تجهیزات تولید انرژی (برق) وجود دارد، مناسب می باشند. مزایا و فواید:

- کارکرد بدون نیاز به روغن
- سازگار با محیط زیست
- حذف آلودگی های حین فرآیند
- طراحی های با چگالی انرژی بالا

- سیستم های کوچک و ساده
- افزایش قابلیت اعتماد
- کاهش مصرف انرژی
- کاهش نگهداری و قطعات اضافی
- کاهش قیمت سیستم در طول عمر آن
- حداقل سطح ارتعاشات
- کنترل و بازبینی پیشرفته

## ۲.۱- ژنراتورهای با سرعت بالا :

این ژنراتور برای اتصال مستقیم به توربین گاز یک پایگاه تولید انرژی توزیعی، طراحی شده است. استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی باعث می شود که کابری نهایی سیستم یک راه حل بسیار قابل اعتماد، کوتاه و فشرده و با نگهداری کم، در اختیار داشته باشد. این ژنراتور دارای خروجی 1.2mw توان الکتریکی بوده و در 20000rpm کار می کند. همچنین این ژنراتور از نوع خودخنک کن بوده و دارای وزنی معادل 350 kg می باشد. اندازه های این ژنراتور فضا 1010\*57mm می باشد.



1.2 MW generator

مشتری ( سفارش دهنده): شرکت Turbo Genset

مشخصات یاتاقانها:

شعاعی : 1000 N

کف گرد: 500 N

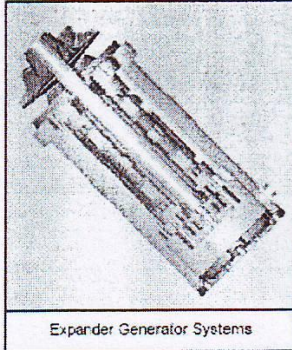




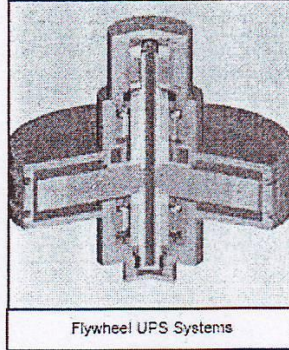
نوع کنترلر: MB 870

مشخصات سیستم:

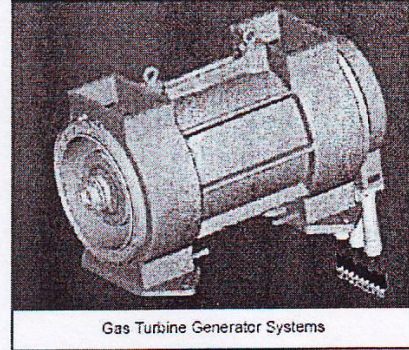
- ژنراتور 20000rpm
- دهانه یاتاقان 730mm
- جرم روتور 80 kg
- محیط خنک کننده: هوا



Expander Generator Systems



Flywheel UPS Systems



Gas Turbine Generator Systems



### ۳ ماشینهای ابزار:

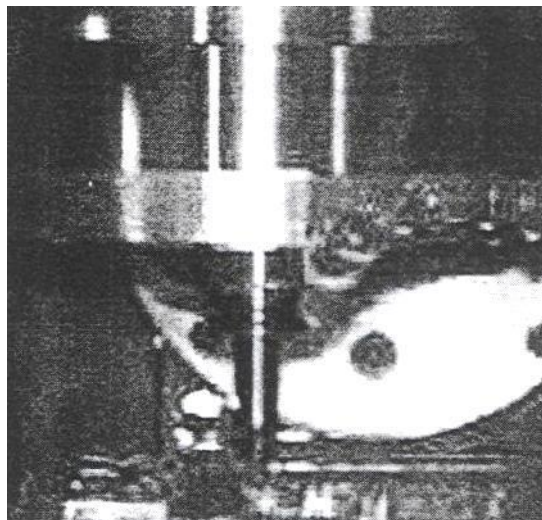
گرایش صنعت به سوی تولید انعطاف پذیر و کاهش زمان بازاریابی محصولات جدید، باعث ایجاد محدودیتهایی برای لوازم و ابزارهای ماشین کاری شده است. این گرایش باعث ایجاد تمایل به انجام عملیات پرداختکاری در حین عملیات ماشین کاری شده است که منجر به کاهش جابجایی قطعات و افزایش بهره وری می شود.

در پاسخ به تمایل ، شرکت SKF یاتاقانهای مغناطیسی برای اسپیندل های ماشین های ابزار با سرعتهای بالا تولید کرده است که می توانند به بهبود عملیات تراشکاری و پرداختکاری کمک کنند. مزایا و فواید:

- نمایش نیروهای برشی
- جبران خمش یا انحراف ابزار
- نمایش فرسودگی ابزار در حین ماشین کاری
- تشخیص شکستگی ابزار در مورد ابزارهای بسیار کوچک
- تشخیص ذاتی برخورد
- عدم فرسودگی یاتاقان
- کاهش نگهداری
- عملکرد بدون نیاز به روغنکاری
- افزایش عمر اسپیندل

### ۳.۱- اسپیندل فرز با دور 100 000 rpm

اسپیندل 100000rpm برای ماشین ابزار سه محوری. این اسپیندل یک نمونه اولیه می باشد.



برای دستیابی به این سرعت بالا، استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی الزامی است. البته مسئله اصلی در این بحث ، پرداختکاری سطح با کیفیت بالا می باشد.

یاتاقانهای مغناطیسی باعث می شوند که طول دوره سرویس سیستم نسبت به یاتاقانهای غلتشی معمولی افزایش یابد.

### **مشخصات یاتاقانها:**

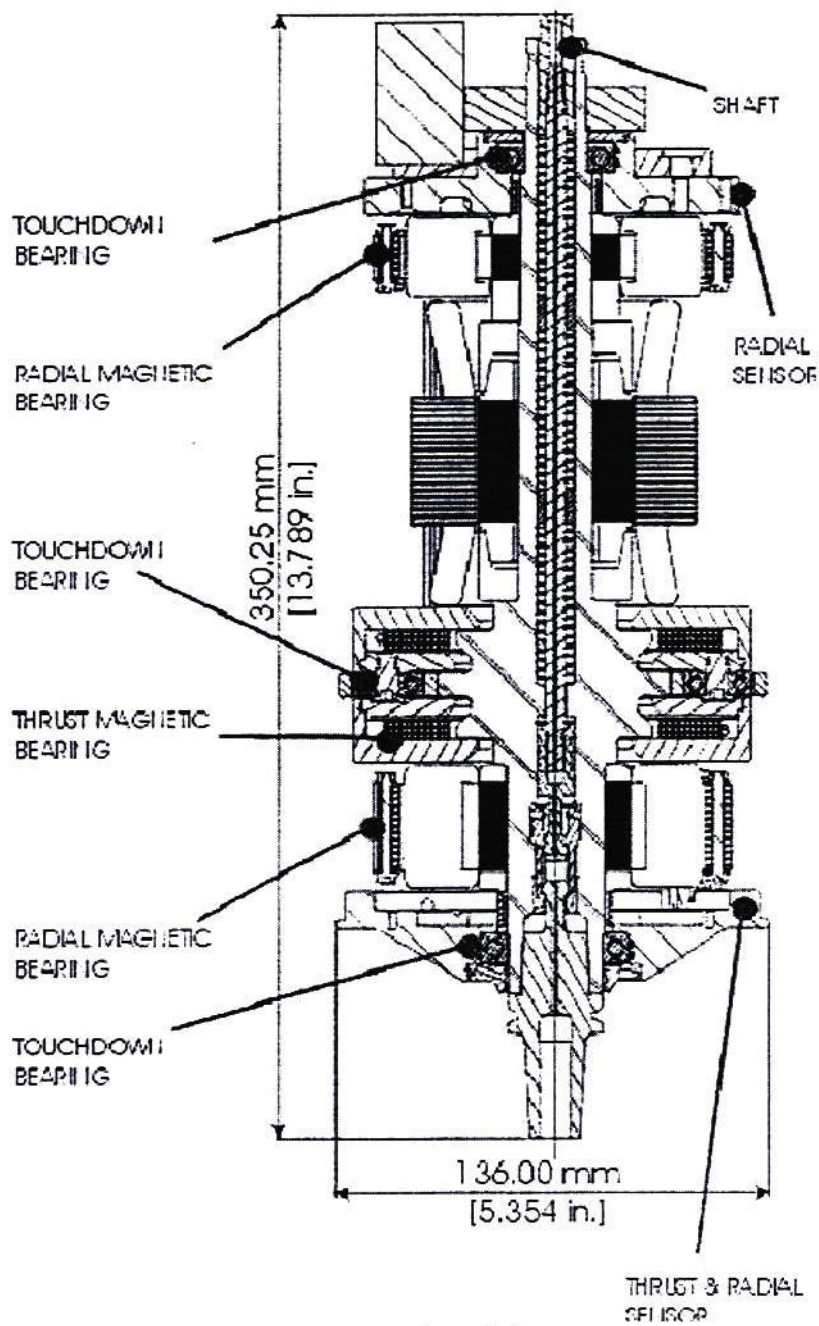
شعاعی: جلو 500 N عقب 250 N

کف گرد: 500 N

نوع کنترلر: MB5300

### **مشخصات کاربرد:**

- بدنه ، موتور و محور توسط مشتری تولید می شوند
- یاتاقانها ، سنسورها و کنترلر ها توسط شرکت Revolve تولید شده اند.



### ۳.۲- اسپیندل تراش:

این اسپیندل سرعت بالا برای کار در یک دستگاه تراش کنترل شده توسط کامپیوتر طراحی شده است از این دستگاه برای تولید یاتاقانهای غلتشی استفاده می شود. یاتاقانهای مغناطیسی باعث می شود که این اسپیندل، محدوده عملکرد گسترده تری داشته باشد.



به این صورت که باعث می شوند یک اسپیندل بتواند در جایی که از دو اسپیندل استفاده می شود، بکار گرفته شود. این کار با کاهش زمان تنظیم مجدد، باعث افزایش بهره وری می شود. محققین امیدوارند که بتوانند با استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی، عملکرد دستگاه تراش را ( با بکار گیری یک فیدبک از فرآیند ماشین کاری) بهبود بخشند. مشتری ( سفارش دهنده ) : مرکز توسعه فنی شرکت SKF واح ماشین کاری سخت نوع اسپیندل محرک: ( sl ) 10 kw 50000rpm As10/50 Hyperspin

### مشخصات یاتاقانها:

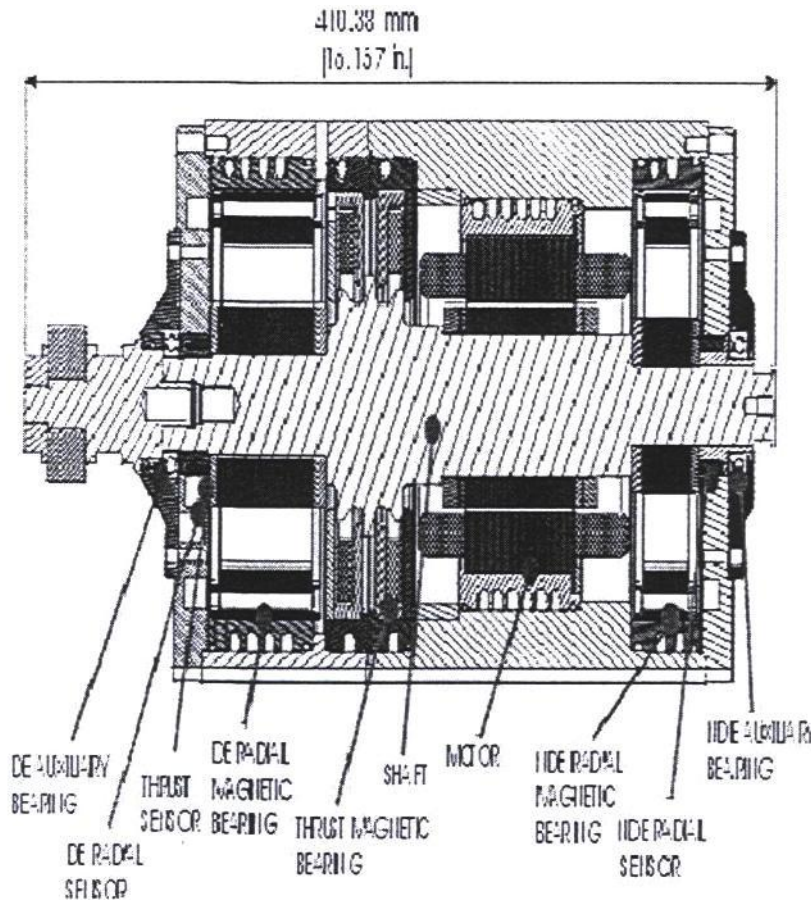
شعاعی: جلو 780 N عقب 390 N

کف گرد: 500 N

نوع کنترل: MB870 – 500 W/ Axis

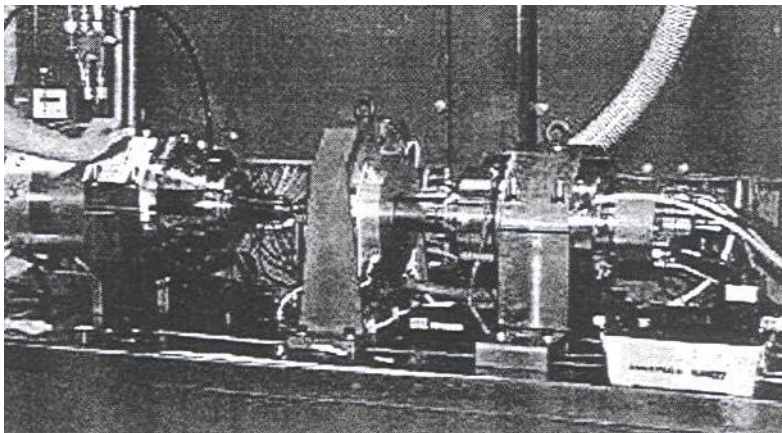
### مشخصات سیستم:

- بدنه با IP55 با تصفیه هوا
- ماده خنک کننده : آب



## ۴- واحد تست و آزمایش:

یاتاقانهای مغناطیسی برای بسیاری از کاربردهای تحقیقاتی و آزمایشها مناسبند این یاتاقانها به طراحی توربو ماشین ها ، بهبود فرایند تولید و ارتقاء سیستم های کنترل و بازبینی و نظارت، کمک شایانی می کنند. شرکت SKF دارای تجربیات وسیعی در بکارگیری یاتاقانهای مغناطیسی در جهت بهبود تحقیقات و آزمایش و ارتقاء نسل آینده ماشین آلات صنعتی می باشد. بنابراین این شرکت قادر است در طراحی واحد تست و آزمایش به شرکتهای صنعتی در جهت به حداکثر رساندن سودمندی آزمایشات کمک قابل توجهی نماید.



مزایا و فواید:

- اندازه گیری مستقیم نیرو
- کنترل حرکت محور
- کنترل نیروی ورودی
- کنترل ارتعاشات
- کنترل و نظارت پیشرفته بر شرایط سیستم
- کاهش مصرف انرژی

### ۴.۱- اندازه گیری نیرو :

تجهیزات آزمایش و تست معمولاً از یاتاقانهای مغناطیسی برای کمک به طراحی توربو ماشین ها استفاده می کنند. به عنوان مثال شرایطی را در نظر بگیرید که یاتاقان مغناطیسی محور را به حالت معلق در می آورد و نیروی ناشی از پروان پمپ را که بر روی تجهیزات تست سوار شده است ، اندازه گیری می کند. در این حالت ۳ نوع نیرو اندازه گیری می شود: نیروی حالت پایدار که ناشی از وزن روتور است، نیروی دینامیکی ناشی از فرکانس حرکت پره ها و نیروی ناشی از جریان درهم (آشفته) . یاتاقانهای مغناطیسی می توانند به طور مداوم بر نیروی وارد شده نظارت داشته باشند که این کار از طریق اندازه گیری موقعیت محور و جریان سیم پیچهای محرک انجام می شود.

نرم افزار و سیستم کنترل یاتاقانهای مغناطیسی شرکت SKF این اجازه را می دهند که سیگنال آنالوگ وارد شده و نیروهای ورودی خاص و یا حرکت محور در جهت مناسب را سبب شود. این قابلیت منجر به درک بهتر عملکرد پروانه پمپ، تحت شرایط کاری کنترل شده ، می شود.

مشتری (سفارش دهنده): Grundfos Concepts ETI

### مشخصات یاتاقانها:

- ظرفیت استاتیکی

شعاعی

3000N در حالت بدون بار بودن انتهای محور

1850N در حالت وارد آمدن بار به محور کف گرد 6000N

- ظرفیت دینامیکی

90% ظرفیت استاتیکی در 350 Hz

سرعت:

سرعت شرایط کاری بین 15000rpm تا

سرعت عملیات آزمایش 3000 rpm

### مشخصات سیستم:

- امکان آزمایش چند پروانه که با اتصالات مخروطی شکل روی محور سوار شده اند.
- MB Scope ابزارهای تشخیصی و اندازه گیری پیچیده ای را برای تحلیل بار محور در اختیار کاربر قرار می دهد.

### ۴.۲- واحد تست و آزمایش اسپیندل:

رقابت جهانی در زمینه صنعت هواپیمایی ( تجاری) باعث شده است که تقاضا برای افزایش هرچه بیشتر سرعت براده برداری از فلزات و ایجاد محصول نهایی ( قطعات) ، افزایش یابد.

تولیدکنندگان اسپیندل های ماشینهای ابزار با تولید دائمی اسپیندل های قویتر و سریعتر ، سعی در پاسخ گویی به این نیاز دارند.

بهره وری در نسل جدید اسپیندل ها ، به دلیل وجود مشکلات درباره قابلیت اعتماد و عملکرد آنها، هنوز بطور کامل حاصل نشده است. برای حل این مسئله ، شرکت SKF یک واح آزمایش مبتنی بر یاتاقانهای مغناطیسی ، برای اسپیندلها ساخته است که قادر است شرایط بار برداری بر روی قطعه را کاملاً شبیه سازی کند، پیش از آنکه اسپیندل در فرایند و عملیات تولید آغاز بکار کند.

قابلیتهای مهم:

- شبیه سازی نیروهای برشی تا 2KN و 1.25 KHz

- اعمال نیروهای پیچشی تا حد گشتاور پیچشی نامی اسپیندل
- ۴۰ کانال جمع آوری داده با سرعت بالا ، در سرعت نمونه برداری 50KHz
- ۶۰ کانال جمع آوری داده با سرعت پایین، در سرعت نمونه برداری 100KHz
- بررسی و بازدید بلاد رنگ داده ها
- سیکل‌های آزمایش با قابلیت برنامه ریزی کامل جهت شبیه سازی برنامه های بار برداری
- آزمایش دوام اسپیندل
- اندازه گیری فرکانسهای دل برای اسپیندل ها
- ترتیب گذاری کنترل و آزمایش اسپیندل

## ۵- تجهیزات خلاء :

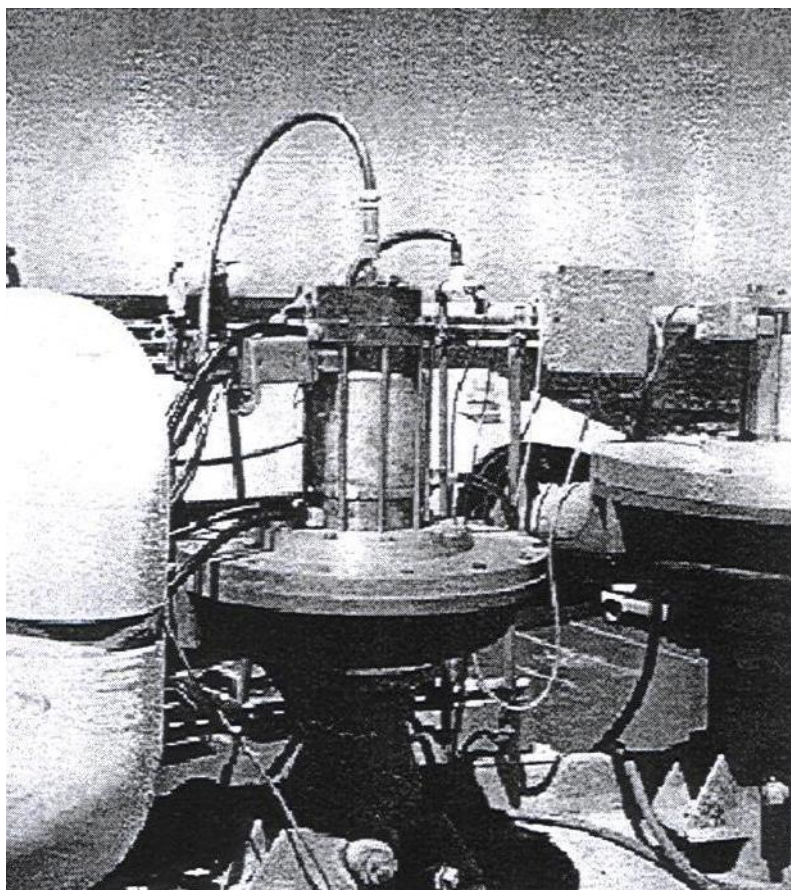
یاتاقانهای مغناطیسی راه حل مناسبی را برای تجهیزاتی که در خلاء کار می کنند( از خلاء زیاد تا فشار اتمسفر) در اختیار مصرف کنندگان قرار می دهند. تجهیزات صنعتی که در فرایندهای خلاء بکار می روند دارای استانداردهایی در زمینه های آلودگی ( ناخالصی) ، گاز زدگی و تولید حرارت می باشند. روان سازهای هیدروکربنی نامطلوبند. سیستم های خلاء در محدوده وسیعی از کاربردهای صنعتی مانند فرایندهای بیوتکنولوژی ، تجهیزات تحلیلی و دمنده های لیزر گازی، بکار می روند. علاوه بر این عدم نیاز به روغنکاری ، می توان یاتاقانهای مغناطیسی و موتورها را در محفظه های مخصوص آب بندی شده ای قرار داد تا گاز زدگی به حداقل ممکن برسد.

مزایا و فواید:

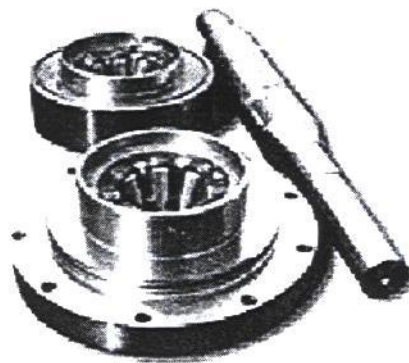
- عملکرد بدون روغنکاری
- افزایش قابلیت اعتماد و در دسترس بودن
- عدم آلودگی و کثیف شدن سیستم
- حذف ذرات ریز ناشی از فرسودگی، بدلیل دوران بدون تماس سیستم
- کاهش هزینه در طول عمر سیستم
- به حداقل رساندن ارتعاشات
- یاتاقانهای دارای تلفات فوق العاده کمی برای کار در شرایط خلاء هستند.

### ۵.۱- دمنده خلاء

شکل زیر یک دمنده با چگالی پایین است که برای حفظ فشار خلاء در یک فرآیند تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس بکار می رود. این عملیات در مرکز تحقیقات و تکنولوژی پیشرفته اقیانوس آرام انجام می شود. یاتاقانهای مغناطیسی، پمپ را قادر می سازند تا با قابلیت اعتماد و بازدهی بالا و در سرعت بالا، در محیط آب شور و خلاء کار کنند.



در این پروژه که با رضایت فوق العاده مسئولین شرکت سفارش دهنده همراه بود است از یاتاقانهای مخروطی یا گوه ای برای کاهش طول محوری استفاده شده است. این مسئله در بهبود پاسخ دینامیکی روتور دارای اهمیت است.



مشخصات اسپیندل:  
سرعت: 38500rpm



توان: 4.8 kw

مشخصات یا تاقانهای مخروطی:

ظرفیت شعاعی 240 N (56lbs)

ظرفیت محوری 310 N (70 lbs)

نوع کنترلر: MB870

مشخصات سیستم:

محیط: خلاء و بخار

## ۵.۲- پمپهای توربو مولکولی TMP :

پمپهای توربو مولکولی در فرایند تولید نیمه هادی ها بکار گرفته می شوند.

CVD/LPCVD, RTP

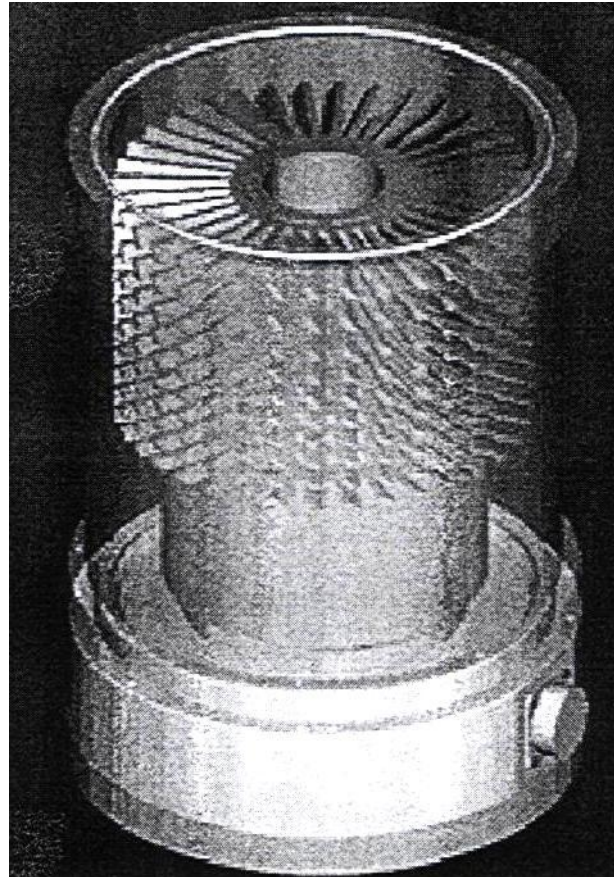
برای فرایندهایی مانند کاشت یونی، اندود کردن، تیزآب کاری، تبخیر ،

میکرولیتوگرافی و... ، به خلاء بالا و حتی فوق العاده بالا نیاز داریم.

در ابزار آلات تحلیلی، پمپهای توربو مولکولی در طیف سنج جرم، تجزیه گر گاز و میکروسکوپهای الکترونی مورد

استفاده قرار می گیرند. در تحقیقات در مورد مواد، پمپهای توربو مولکولی در وسایل پراکنده سزی نوترون، شتاب

دهنده های پروتون و فوق برخورد کننده ها ( SUPERCOLLIDERS ) بکار می روند.



استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی به خاطر بوجود آوردن عملکرد مطمئن در سرعتهای بالا و بدون روغنکاری می باشد. عدم وجود تماس و نیز عدم استفاده از ماده روانساز فرار، ما را مطمئن می سازد که ذرات کوچکی که به کریستال های نیمه هادی آسیب می رسانند، ایجاد نمی شوند.

الگوریتم پیشرفته کنترلی این سیستم، AVC ، برای کاهش ارتعاشات متقل شده به اجزاء حساس سیستم مورد استفاده قرار می گیرند.

مشخصات اسپیندل محرک: Hyper spindles

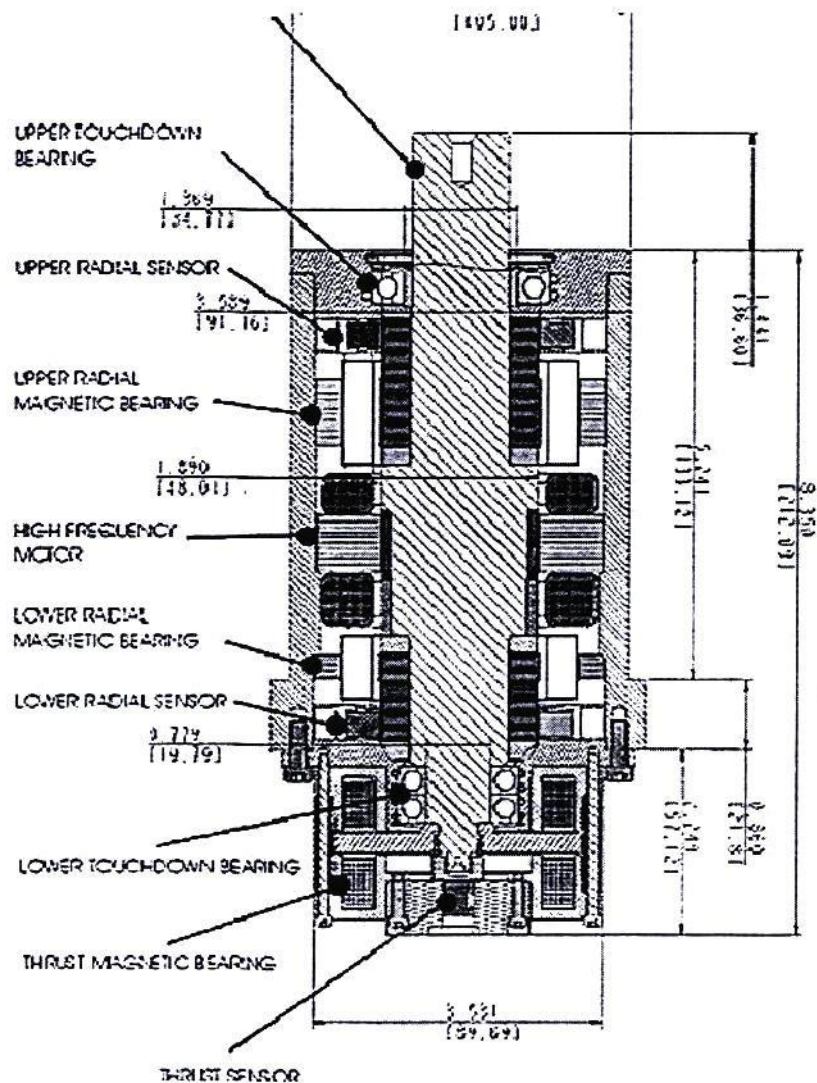
DC300-300w, 53N (12lb) radial , ( 46lb) [205N] thrust , 43000rpm

DC500-500w, 98N (22lb) radial , ( 50lb) [222N] thrust , 33600rpm

DC900-900w, 267N (60lb) radial ,(50lb) [222N] thrust , 60000rpm

نوع کنترلر: MB350 MB240

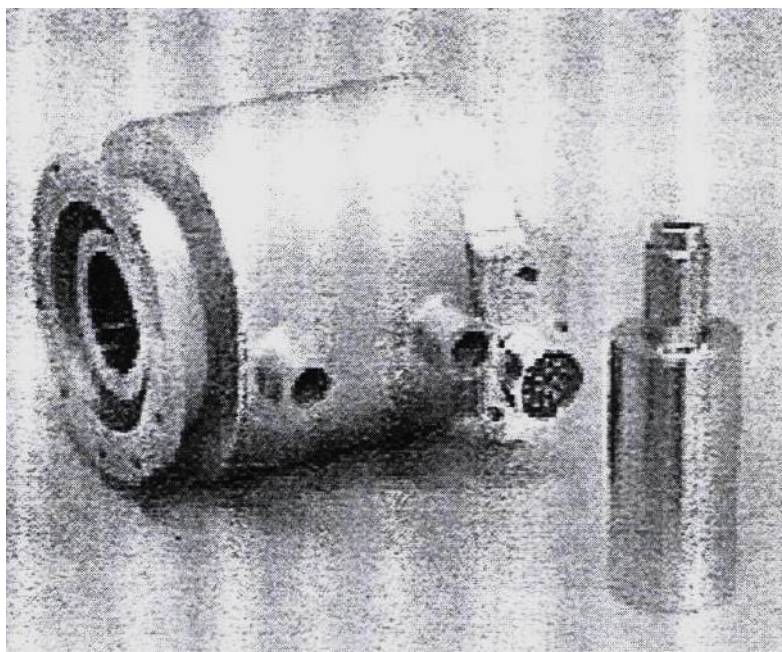
پروانه و محفظه بیرونیکه نشان داده شده اند توسط خود مشتری تامین می شوند.



### ۵.۳- موتورهای محفظه دار:

این موتور برای کار در محیطی با گازهای فوق العاده خورنده طراحی شده توانی معادل 4.5 kw در 5000rpm را تولید می کند. این موتور دارای استاتور و روتوری می باشد که هر دو محفظه دار می باشند. این موتور دارای چگالی توان بسیار بالا و بازده بالای 90% بوده و در دمای کمتر از 60C کار می کند. برای پیشگیری از گازهای مضر و اطمینان از عملکرد ایمن آن ، این موتور دارای یک محفظه محدود کننده ثانویه نیز می باشد. این محفظه به یک سوئیچ فشار مجهز است که هرگونه نشتی را تشخیص می دهد. این موتور بدون سنسور طراحی شده تا قابلیت اعتماد افزایش یافته و قیمت و میزان سیم کشی کاهش یابد.





### مشخصات موتور:

- توان 4.5kw در 5000rpm
- فشار محفظه محدود کننده اول بین 1 torr تا 5.5 mpa (800psig)
- ورودی ولتاژ: 200-240 V , 3 phase , 50/60 Hz , 31 Arms
- محفظه استاتور و روتور از جنس آلیاژ نیکل و کبالت به نام Monel 400 می باشد.
- دمای سیم پیچی از کلاس H می باشد c 180

### مشخصات سیستم:

این محصول بطور مشترک توسط شرکت یاتاقانهای مغناطیسی SKF و شرکت Cymer Inc ساخته شده است. هدف از ساخت این موتور، استفاده از آن در لیزرهای تخلیه گاز حاوی فلئور می باشد که توسط شرکت Cymer تولید می شوند.

این طراحی برای هرگونه کاربرد سمی و خطرناک مناسب است و نیز در جاهایی که نمی توان از آلوده شدن فرایند چشم پوشی کرد، می توان از این سیستم استفاده کرد.

### فصل یازدهم : پیوست

سئوالاتی که معمولاً پیرامون یاتاقانهای مغناطیسی مطرح می شود :  
Frequently Asked Questions (FAQ)

۱- بیشترین سرعتی که یاتاقانهای مغناطیسی می توانند در آن سرعت عمل کنند چقدر است؟  
یاتاقانهای مغناطیسی توانایی دستیابی به سرعت محیط بیش از  $m/s 250$  یعنی حدود  $DN 4.5$  million را دارند ( که در آن DN عبارتست از حاصلضرب قطر بر حسب میلی متر در بر حسب دور rpm) محدودیتهای موجود در سرعت سیستم ، تابعی از مقاومت مواد مغناطیسی بکار رفته در اجزاء دوار می باشد.

۲- آیا یاتاقانهای مغناطیسی به روغنکاری نیاز دارند؟  
خیر. نیازی به روغنکاری نیست زیرا اجزاء دوار بوسیله یک میدان مغناطیسی کنترل شده و معلق نگه داشته می شوند و از آنجا که هیچگونه تماسی بین اجزاء ثابت و متحرک وجود ندارد، نیازی به روغنکاری نیست.  
۳- بیشترین میزان بار قابل تحمل برای یاتاقانهای مغناطیسی چقدر است؟  
یاتاقانهای مغناطیسی را می توان آنقدر بزرگ ساخت که هر باری را تحمل کنند. چگالی نیروی یاتاقانهای مغناطیسی  $40-60$  نیوتن بر سانتی متر مکعب است.

۴- آیا این یاتاقانها با محیط زیست سازگارند؟  
خیلی زیاد. علاوه بر اینکه به دلیل عدم نیاز به روغنکاری سبب ایجاد آلودگی در محیط زیست نمی شوند، این یاتاقانها باعث مصرف کمتر انرژی نسبت به یاتاقانهای معمولی ( روغنکاری شونده) می شوند.  
۵- در صورت ایجاد مشکل در برق سیستم یاتاقان مغناطیسی چه اتفاقی می افتد؟  
اگر برق سیستم یاتاقان مغناطیسی قطع شود، روتور قوط خواهد کرد، برای حل این مشکل یاتاقانهای مغناطیسی مجهز به یاتاقانهای کمکی هستند که برای چندبار سقوط ناگهانی محور در حات حداکثر سرعت طراحی شده اند و این طراحی بر مبنای نیاز و کاربرد خاص انجام می گیرد.

برای دستیابی به قابلیت اطمینان مضاعف ، می توان سیستم را بوسیله یک منبع تغذیه وقفه ناپذیر ( UPS ) پشتیبانی کرد که قادر است در موقع لزوم، جریان برق مورد نیاز را برای نگه داشتن شفت در موقعیت لازم را تامین کند.

به عنوان یک توانایی اضافی ، اسپیندل های سنکرون دور بالا ( Hyper spin ) به یک UPS داخلی مجهزاند که این UPS نیازی به جریان برق ندارند. در هنگام قطع برق ، موتور در نقش یک ژنراتور ظاهر شده و انرژی الکتریکی مورد نیاز کنترلر را تامین می کند تا کنترلر قادر به حفظ شفت در موقعیت مناسب و ایمن باشد.

۶- یاتاقانهای مغناطیسی از نظر مصرف برق چگونه اند؟  
انرژی الکتریکی که به کنترلر یاتاقان داده می شود عمدتاً توسط تلات اهمی سیم پیچها مصرف می شود. میزان انرژی مصرف شده توسط این یاتاقان ها متفاوت است و به اندازه یاتاقان و محدوده جریان اعمال شده به سیم پیچها بستگی دارد. به عنوان مثال یک یاتاقان شعاعی که توانی معادل  $1000lb$  یا  $445N$  بار را در  $20 AMP$  دارد ، حدود  $0.2 \Omega$  مقاومت خواهد داشت که این بدان معناست که این یاتاقان حداکثر  $80 watt$  انرژی را در شرایط بار گذاری زیاد و غیر عادی، مصرف می کند. همین یاتاقان برای بلند کردن شفت (به تنهایی) حدود  $20 watt$  انرژی مصرف می کند.

۷- آیا یاتاقانهای مغناطیسی بدون اصطکاکند؟

نه کاملاً. هنگامی که محور دوران می کند، تحت تاثیر میدانهای متقارن و متناوبی قرار می گیرد که از قطبهای استاتور ناشی می شوند. تغییر میدانهای مغناطیسی باعث ایجاد جریان های گردابه ای شده و یک نیروی کششی و مقاوم به شفت وارد می شود. مقدار این نیرو به اندازه یاتاقان، سرعت دورانی شفت و عوامل دیگری در طراحی سیستم بستگی دارد.

پس از آزمایشات و تحقیقات و تحلیل های بسیار دقیق، شرکت Revolve توانایی خود را برای پیش بینی تلفات دورانی ارتقاء داده است.

این تلفات در سیستمهای کوچک دارای سرعتهای بالا ( 40krpm ) می تواند به حدود ۲ تا ۴ وات باشد اما در سیستمهای بزرگ تلفات می تواند حتی تا حدود چند کیلو وات باشد.

همان گونه که برای غلبه بر اصطکاک هوا و سایر انواع اصطکاک، توان لازم است، توان مورد نیاز برای غلبه بر جریانهای گردابه ای نیز توسط عامل محرکه سیستم ( موتورها ، توربینها و ... ) تامین می شود.

۸- آیا یاتاقانهای مغناطیسی نیازی به نگه داری دارند؟

یاتاقانهای مغناطیسی فرسوده نمی شوند و این خود عاملی است که ما را از نگه داری بی نیاز می کند و باعث افزایش طول زمان سرویس سیستم می س=شود. البته نگهداری پیشگیرانه از وسایل کمکی مانند یاتاقانهای کمکی و نیز اتصالات الکتریکی ، توصیه می شود. شرکت Revolve در بخشی از نرم افزار استاندارد خود،

MB Scope را ارائه می کند که عبارتست از وسیله ای برای نمایش لقی های موجود که به کاربر این

امکان را می دهد تا بتواند شرایط یاتاقانهای کمکی را بدون باز کردن و پیاده کردن ماشین بررسی کند.

MB Scope منبع اطلاعاتی را ارائه می دهد که می تواند به کاربر در تشخیص و تعیین سلامت و درستی

کار سیستمی که بر روی یاتاقانهای مغناطیسی سوار است ، کمک کند. این عمل باعث انجام اقدامات

پیشگیرانه بهتر در جهت نگه داری سیستم می شود.

۹- آیا درست است که یاتاقانهای مغناطیسی دارای عمر نامحدود هستند؟

تقریباً از آنجا که هیچگونه فرسودگی تماسی در این سیستم وجود ندارد بنابراین زوال و تخریب نیز بسیار محدود است سیم پیچها و ورقهای بکار رفته در قطبها دارای عمری بالغ بر ۲۵ سال هستند. البته اجزاء الکتریکی اگر تحت بار بیش از حد قرار گیرند احتمال خطا و خرابی برایشان وجود دارد و دارای عمر کمتری هستند.

نکته مهم آن است که یاتاقانهای مغناطیسی دارای عملکرد پایدار و ثابت در طول عمر خود هستند.

۱۰- موقعیتی که سیستم کنترل برای شفت تامین می کند تا چه حد می تواند دقیق باشد؟

با استفاده از سیستم یاتاقانهای مغناطیسی ، ارتعاشات ناشی از نا بالانس اجزاء دوار بطور مجازی حذف می

شوند و مرکز ثقل محور را می توان در محدوده ای به کوچکی یک میکرون جای داد.

۱۱- حداکثر طول کابلی که می تواند بین ماشین و سیستم کنترل استفاده شود چقدر است؟

کابلهای با طول ۱۰۰ متر نیز با موفقیت مورد آزمایش و استفاده قرار گرفته اند.

۱۲- آیا می توان از یاتاقانهای مغناطیسی در محیط های متفاوت و متضاد نیز استفاده کرد؟

بله. از آنجا که یاتاقانهای مغناطیسی بدون تماس و روغنکاری می باشند، می توانند در محدوده بسیار وسیعی

از شرایط عملکرد کار کنند. دمای بالا، دمای پائین، خلاء، بخار و محیطهای خورنده شیمیایی.

در شرایطی که محیط دارای خورندگی بسیار شدید است این یاتاقانها را می توان کاملاً درزگیری کرده و یا داخل یک قوطی قرار داد.

همچنین این یاتاقانها را می توان در محیط های خطرناک و قابل احتراق و انفجار نیز بکار برد.  
۱۳- آیا یاتاقانها طوری طراحی شده اند که تمامی شار مغناطیسی آن به داخل فاصله هوایی هدایت شود و بتواند کار مفید انجام دهد؟  
این یاتاقانها طوری طراحی شده اند که کمترین شار سرگردان را تولید می کنند.

