

عیب یابی الکترو موتور با استفاده از آنالیز ارتعاشات

حسن رضایی صادق

کارشناس CM در واحد سیمان هگمتان
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک طراحی کاربردی

چکیده

ضرورت طراحی و استقرار سیستم های نگهداری و تعمیرات در کارخانجات ، یکی از مسایل مبرم و حیاتی امروز صنایع کشور است. حفظ سرمایه های کشور از یک سو و ارزش بری بالای خرید ماشین الات و تجهیزات از سوی دیگر، استفاده عقلانی و برنامه ریزی شده و نگهداری و تعمیر به موقع ماشین الات و تجهیزات را الزامی می سازد. قوت وضعف این بخش مستقیماً در بهره وری و سود دهی تولید تاثیر می گذارد. بنابراین داشتن یک روش جامع ارزیابی عملکرد برای این بخش در راستای استراتژی واحد تولید از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین به کارگیری سیستم نگهداری و تعمیرات می تواند نقش بسیار زیادی را در کاهش قیمت تمام شده محصول نهایی هر شرکت ایفا نماید و این تاثیرات تنها محدود به هزینه نبوده و در سرعت ارائه محصول در کل زنجیره تامین ، کیفیت محصول ، قابلیت اطمینان و عواملی از این دست نیز تاثیرات خاص خود را خواهد داشت و از این رو می توان به نقش مهم و تاثیر گذار استراتژی مختلف نگهداری و تعمیرات بر روی کسب و کار یک بنگاه اقتصادی پی برد و ان را بخش جدایی ناپذیر از تولید دانست. لذا در این مقاله سعی بر این میباشد تا روش های عیب یابی تجهیزات الکتریکی دوار با استفاده از آنالیز ارتعاشات و نیز با مکمل تکنیک آنالیز اثرات الکتریکی تشریح نمود و توانست روند خرابی قطعات یدکی الکترو موتور های صنعتی کارخانه را تحت کنترل و کاهش داد.

واژه های کلیدی: خرابی بیرینگ، لقی دورانی ، soft foot ، فاصله هوایی نامتقارن

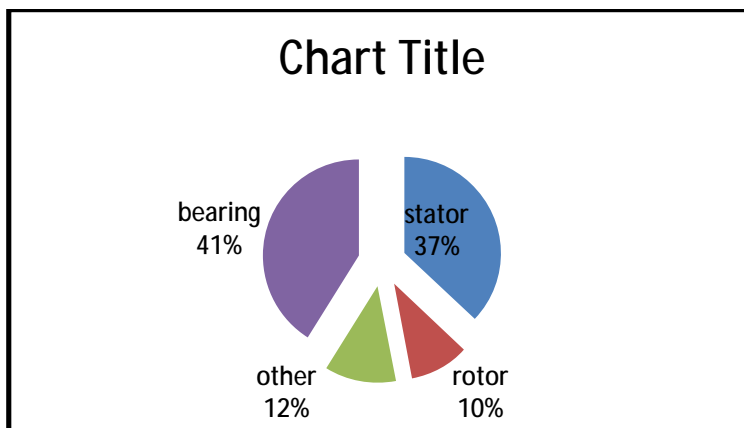
مقدمه

موتور های الکتریکی کاربرد بسیار گستردهای به عنوان محرک اولیه در بخشهای مختلف واحد های صنعتی دارند. نیروی محرکه اغلب تجهیزات دوار و رفت برگشتی (پمپ، دمنده ، کمپرسور، سیستم های جابه جایی مواد و...) میباشد که معمولاً از طریق انواع مختلف این موتور ها تامین می شود. لذا از کار افتادگی یک موتور به معنای از سرویس خارج شدن یک سیستم و یا برخی موارد ، کل خط تولید خواهد بود. در چنین شرایطی راهبری بهینه و اصولی این گروه از دارایی های فیزیکی ، مستلزم بکار گیری استراتژی نوین در عرصه نگهداری و تعمیرات است. نت مبتنی بر وضعیت به عنوان استراتژی برگزیده برای تجهیزات حیاتی و نقش مهمی در این میان بر عهده داشته و استفاده از تکنیک های پایش وضعیت برای اجرایی کردن این استراتژی ضروری است.

تکنیک های بسیاری برای پایش وضعیت موتور های الکتریکی بکار می روند. برخی از این تکنیک ها عبارتند از : آنالیز ارتعاشات، آنالیز صدا و التراسونیک، آنالیز حرارتی (ترموگرافی) ، آنالیز مدار موتور و تست های تکمیلی الکتریکی و... در این میان آنالیز ارتعاشات از جمله روش های مهم و کاربردی است چون حالت های خرابی متداول را پوشش می دهد و عیب گوناگونی از طریق ان قابل شناسایی و ردیابی هستند. آنالیز ارتعاشات مجموعه کاملی از روند خرابی و نوع خرابی را قابل تشخیص مینماید.

حالت های خرابی

اغلب خرابی های موتور دارای ریشه الکتریکی می باشد حتی زمانی که خرابی مکانیکی عادت ظاهری باشد. مطالعه مشترک موسسه تحقیقات برق قدرت EPRT و شرکت جنرال الکتریک مشخص می کند که منبع اصلی بیش از 50 درصد از خرابی ها موتور علل الکتریکی می باشد. و شکل 1 سهم قسمت های مختلف موتور را در ایجاد عیب نشان میدهد.



شکل شماره 1

اجزای اصلی الکترو موتور های القایی

همانطور که میدانید اجزای اصلی الکترو موتور های القایی از رتور و استاتور تشکیل شده است. که **استاتور** شامل یک هسته آهنی، سیم پیچ، و در قاب میباشد و **رتور** نیز شامل شافت محور دوران، رینگ انتهای و بیرینگ تشکیل شده است. اجزای آسیب پذیر الکترو موتور در مراحل اولیه بیرینگ و ودر برخی موارد هوزینگ آن میباشد که بر اثر بار های دینامیکی نامتقارن و دمای محیط و عوامل الکتریکی و همچنین پایان عمر بیرینگ به وجود میاید. که از جمله عیوب متداول، خرابی بیرینگ الکترو موتور میباشد که این عیب را می توان با استفاده از تکنیک های CM به خصوص تکنیک ارتعاش سنجی پیش بینی و تحت کنترل قرار داد.

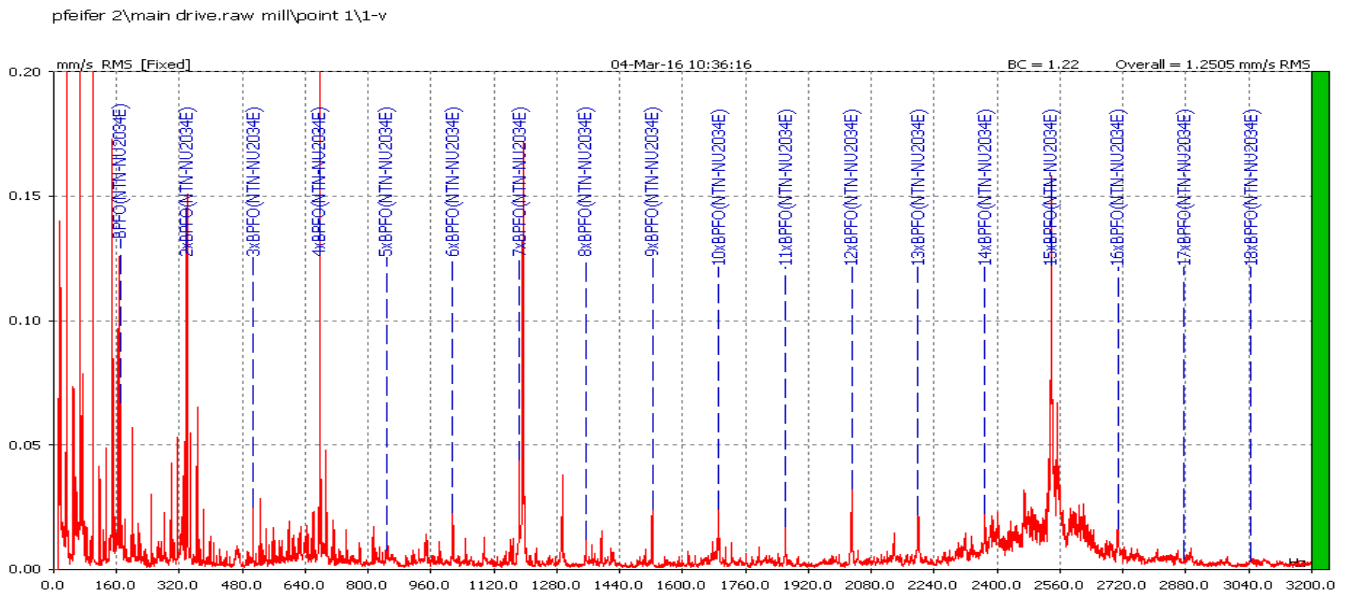
موضوع مهم این میباشد که روند خرابی بیرینگ الکترو موتور ها نسبت به یاتاقان بیرینگ تجهیزات مکانیکی باید با حساسیت بیشتر تحت کنترل باشد و میزان دامنه پیک های خرابی بیرینگ در طیف FFT ودر منحنی Envelope کوتاهتر و در بازه زمانی دیتا برداری روتین ارتعاش سنجی کوتاهتر و با دقت بسیار بررسی گردد. و همچنین روند علایم لقی مکانیکی و شرایط **soft foot** پایه های الکترو موتور و تنظیم همراستایی از جمله موارد بسیار حساس و ریشه ای در عمر الکترو موتور ها و تاخیر و کاهش روند خرابی میباشد. کنترل دمای الکترو موتور از جمله عوامل بسیار موثر در عمر بیرینگ موتور میباشد به طوری که با افزایش 10 درجه دمای الکترو موتور موجب کاهش 50 درصدی عمر الکترو موتور میباشد. بنابراین عوامل ایجاد دما در الکترو موتور به شرح ذیل میباشد:

- 1- بار اضافی
- 2- استارت و توقف مکرر
- 3- دمای محیط کاری الکترو موتور
- 4- ولتاژ پایین و یا انبالانسی ولتاژ
- 5- بیشترین عملکرد
- 6- تهویه نامناسب
- 7- ارتعاش سیستم

انواع مختلف خرابی بیرینگ های الکترو موتور ها با استفاده از آنالیز ارتعاشات در واحد سیمان هگمتان

1- روند خرابی بیرینگ الکترو موتور آسیاب مواد خط دو 3400 کیلو واتی (دلیل خرابی: اتمام عمر بیرینگ)

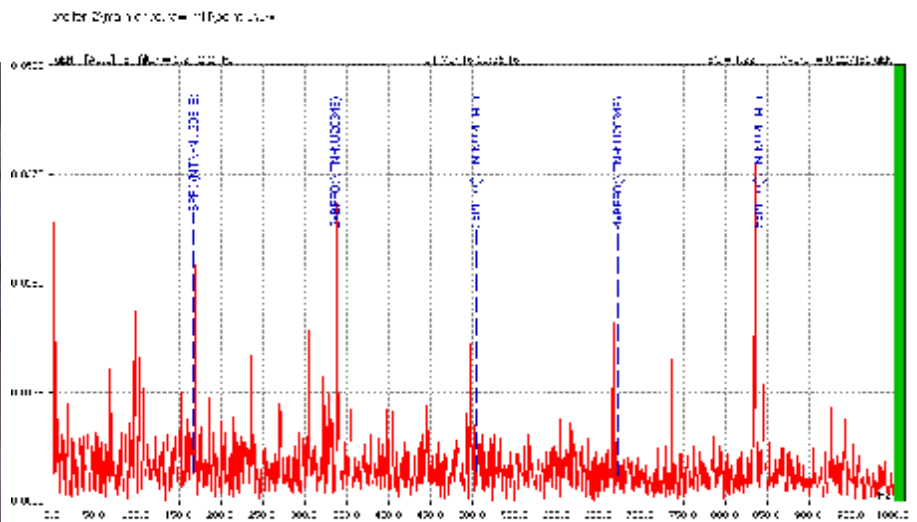
الکترو موتور آسیاب مواد خط دودر یک بازه زمانی دارای روند دامنه کلی ارتعاش بالا قرار گرفت. در بررسی طیف فرکانسی و Envelope پیک های خرابی بیرینگ در race خارجی با دامنه کوتاه در طیف FFT بود. گزارش مربوطه به مدیریت محترم کارخانه ارسال و تصمیماتی در خصوص کاهش روند خرابی انجام گرفت. همانطور که میدانید با کاهش دامنه کلی میتوان روند خرابی را به اسیلون رساند. کاهش دامنه کلی میتواند در دامنه پیک غالب دور ماشین باشد و نیز از جمله اقدامات لازم اتخاذ شده تنظیمات همراستایی کوبلینگ با دوربین نقشه برداری ، کاهش و کنترل بار آسیاب ، کنترل ارتعاش کلی آسیاب در خصوص خالی شدن بستر بار، بررسی soft foot پایه های موتور و شیم گذاری با دقت بسیار انجام شد. با اقدامات انجام شده الکترو موتور تحت پایش به مدت دو سال بعد از مشاهده علایم خرابی کارکرد داشت که در مراحل پایانی به دلیل افزایش دمای بیرینگ تصمیم تعویض بیرینگ الکترو موتور انجام و الکترو موتور برای سرویس به خارج از شرکت ارسال گردید. بیرینگ الکترو موتور معیوب را در ذیل مشاهده مینمایید.



طیف فرکانسی و خرابی بیرینگ به شماره N2034E



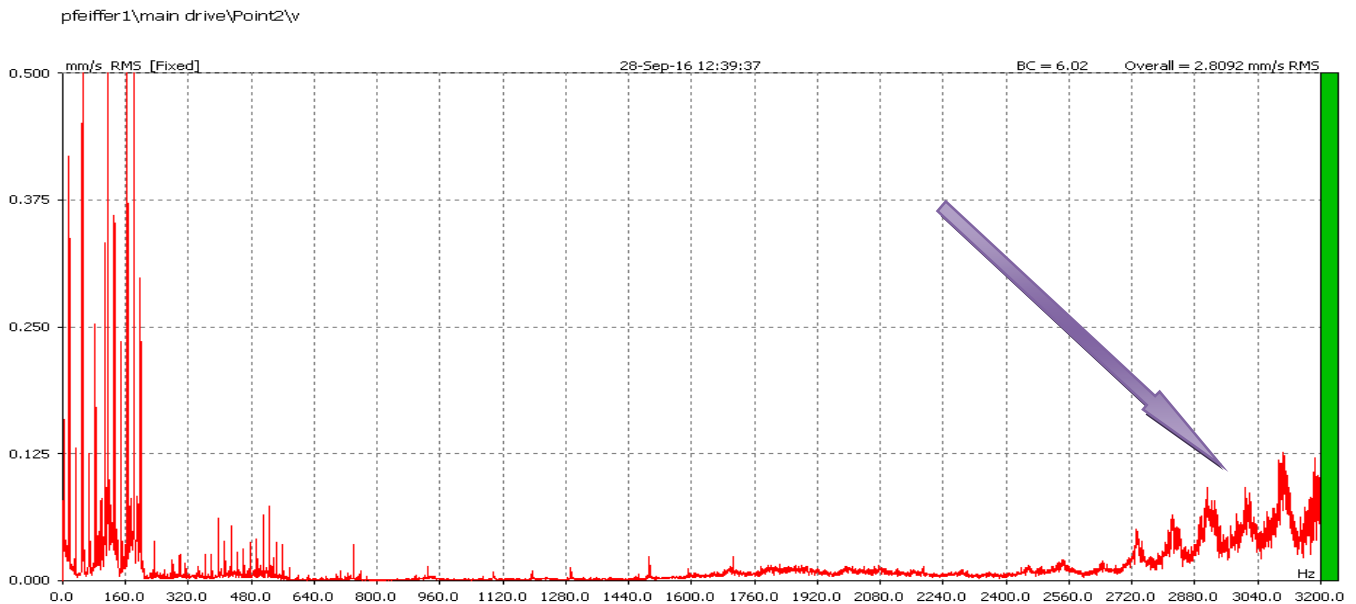
تصویر بیرینگ معیوب تعویض شده



طیف Envelope و خرابی بیرینگ

2- روند خرابی بیرینگ الکترو موتور آسیاب مواد خط یک 1750 کیلو واتی (دلیل خرابی: بارهای دینامیکی نامتعادل)

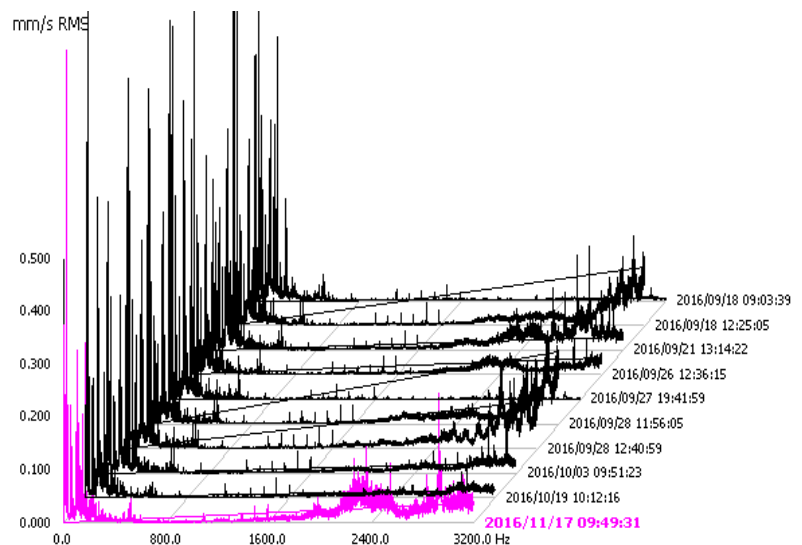
بیرینگ الکترو موتور آسیاب مواد خط یک دارای روند پیک در فرکانس های بالای 3200 هرتز با سطح نویز بالا بود که با انجام گریس کاری سطح نویز کاهش و بعد از زمان کوتاهی دوباره این روند افزایشی بود و همچنین صدای غیر عادی و دمای ناپایدار بیرینگ های الکترو موتور وجود داشت. بنابراین بعد از ارسال گزارش CM به مدیریت ارشد کارخانه موارد ذیل تصمیم گیری گردید. **تهویه هوای گرم محیط اطراف الکترو موتور با نصب فن انجام پذیرفت.** با توجه به اینکه دامنه پیک ها در زمان گریس کاری و صدای غیر عادی کاهش داشت و برای یک مدت طولانی خط تولید متوقف بود **شستشوی بیرینگ الکترو موتور و تخلیه کامل گریس انجام شد.** با این عمل برای مدت زمانی سطح نویز کاهش داشت. و چون خرابی بیرینگ در فرکانس های بالا حاکی از مراحل اولیه خرابی میباشد الکترو موتور تحت پایش بعد از مدت زمان هشت ماه کارکرد با افزایش صدای غیر عادی دما جهت تعمیر متوقف گردید. بنابراین الکترو موتور مذکور با الکترو موتور یدکی در انبار تعویض و در کارگاه نوسازی کارخانه موتوردمونتاژ شده و از بیرینگ بازدید شد که بعد از بازدید دقیقتر سطح خراش بر روی race داخلی و خارجی مشاهده میشد. بیرینگ الکترو موتور توسط واحد مکانیک در کارگاه نوسازی کارخانه تعویض گردید و در محل کار نصب و در حال حاضر استارت میباشد.



طیف فرکانسی وسط نویز در فرکانس های بالاتر



تصویر race داخلی بیرینگ موتور



منحنی ابشاری وسط نویز در فرکانس های بالا

3- خرابی مکرر بیرینگ فن های گریت کولر خط یک (دلیل خرابی: نشتی جریان الکتریکی)

طیفهای ارتعاشی موتور های الکتریکی مربوط به فن های گریت کولر و روند زودرس خرابی بیرینگ ها مورد بررسی و تحلیل ارتعاشی قرار گرفت. بیرینگ الکترو موتور ها بعد از مدت زمان کوتاهی دارای روند خرابی پیک بیرینگ بود. گزارش واحد CM به مدیریت محترم کارخانه ارسال گردید و تصمیم گیری در جهت علت خرابی زود هنگام، عوامل پیشنهادی به صورت ذیل بود:

1- پایه لرزه گیر های فن از لحاظ بازدهی به دلیل میزان مدت زمان کارکرد طولانی بررسی و در صورت نیاز تعویض گردید تا میزان دمپینگ افزایش یابد.

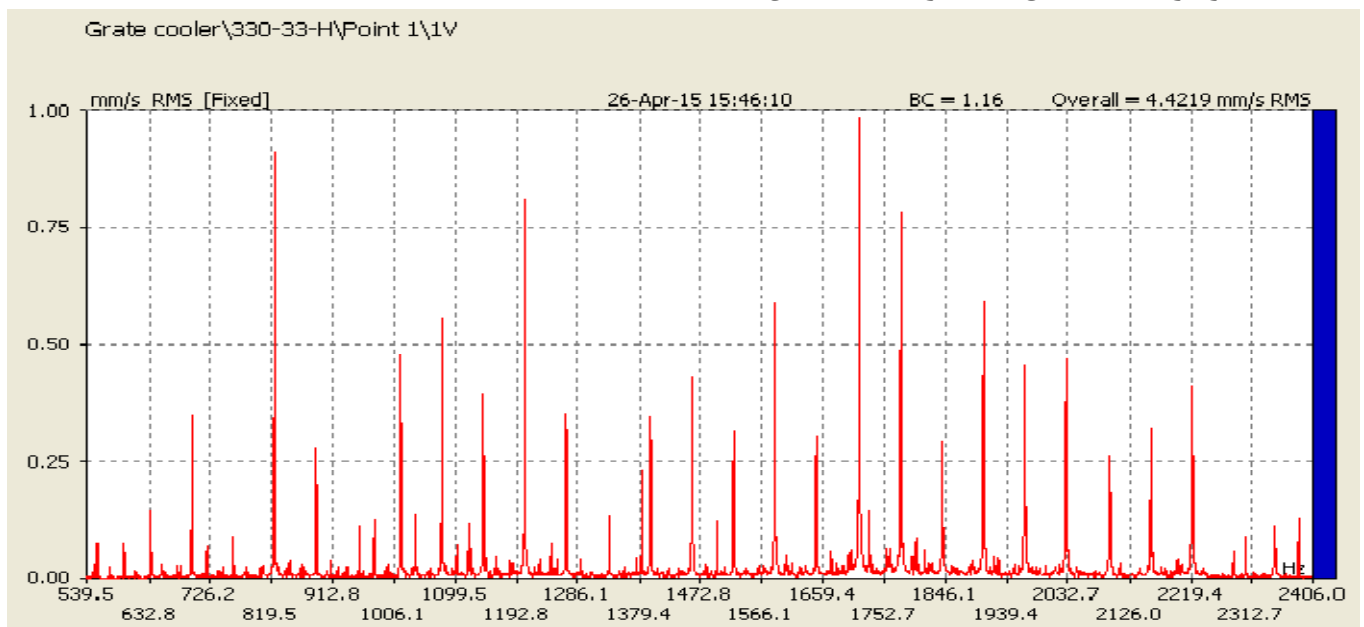
2- تنظیمات همراستایی پولی ها با استفاده از الایمنت لیزری طرح جدید برای کاهش دامنه ارتعاش دور ماشین و کاهش دامنه کلی overall انجام شد.

3- دلیل بعدی پروژه تغییر الکترو موتور های گریت از دور ثابت به دور متغییر جهت کنترل دبی ورودی گریت بود که قبلا به طریق فلپ انجام میشد که با توجه به کنترل و ذخیره انرژی به frequency drive تغییر یافته بود.

بنابراین به عنوان نمونه بیرینگ تعویض شده یک از فن مورد بررسی قرار گرفته و علایم نشتی جریان الکتریکی (Bearing current leakage) در آن وجود داشت. و نیز بررسی روند تغییرات، نشان دهنده این بود که رشد خرابی روند نسبتا سریعی دارد. بطوریکه بیرینگی که اخیرا تعویض شده، طی مدت چندماه، حتی با دامنه کلی ارتعاش پایینتر مجدد علایم خرابی را با روند روبه روشد نشان میداد.

عوامل مختلفی منجر به وقوع نشتی جریان می شود که این پدیده، برای موتورهای دارای مبدل فرکانس frequency drive بیشتر رخ میدهد. براساس بررسی های انجام شده بر روی طیف های ارتعاشی کلیه فن های گریت کولر دچار این مشکل بود. لذا با توجه به اهمیت و حساسیت این تجهیزات و نیز هزینه بر بودن روند آسیب بیرینگ ها (هم از لحاظ توقف خط بر اثر خرابی بیرینگ و توقف هر یک از فن های گریت کولر و هم از لحاظ هزینه های تعمیراتی خود موتور ها) ضروری است برای پیشگیری از خرابی مکرر بیرینگ های موتور های فن های گریت کولر راهکار مناسب اتخاذ گردد. بنابراین نوع بیرینگ موتور با بیرینگ های عایق در برابر الکتریسته تعویض گردید.

طیف و تصاویر بیرینگ های فن های گریت را در ذیل مشاهده مینمایید.





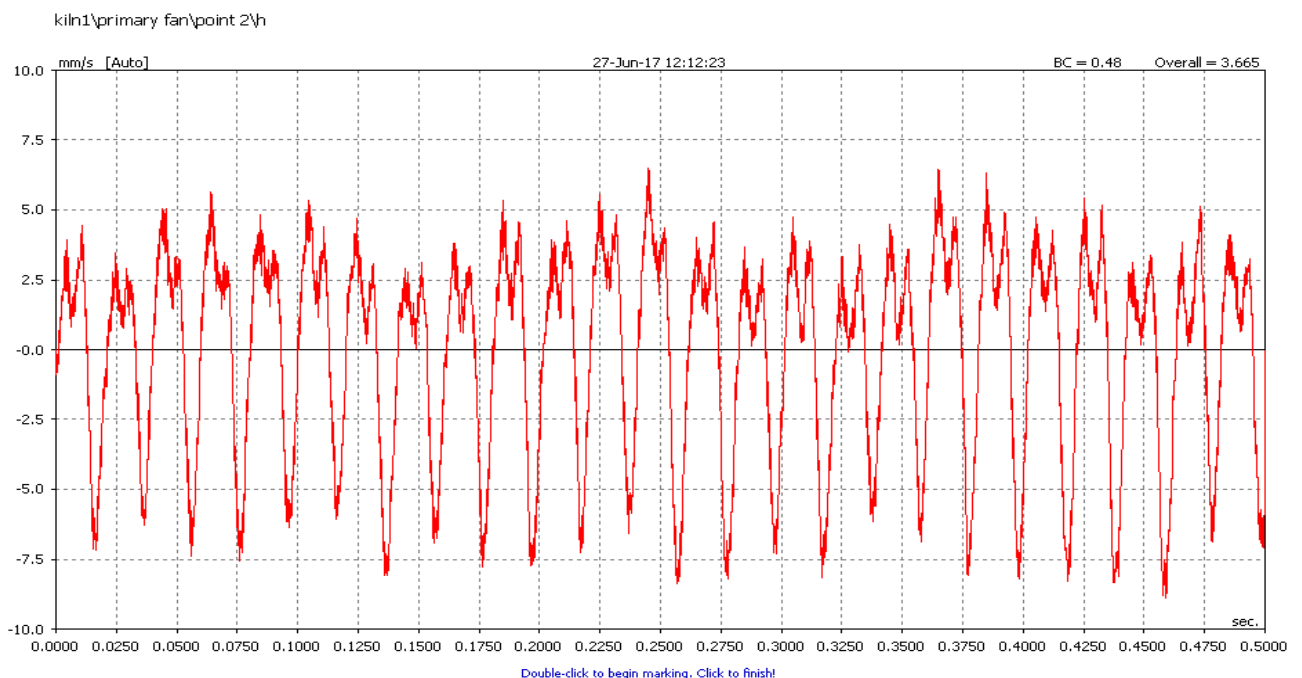
سطح رینگ داخلی یکی از بیرینگهای موتور فن گریت



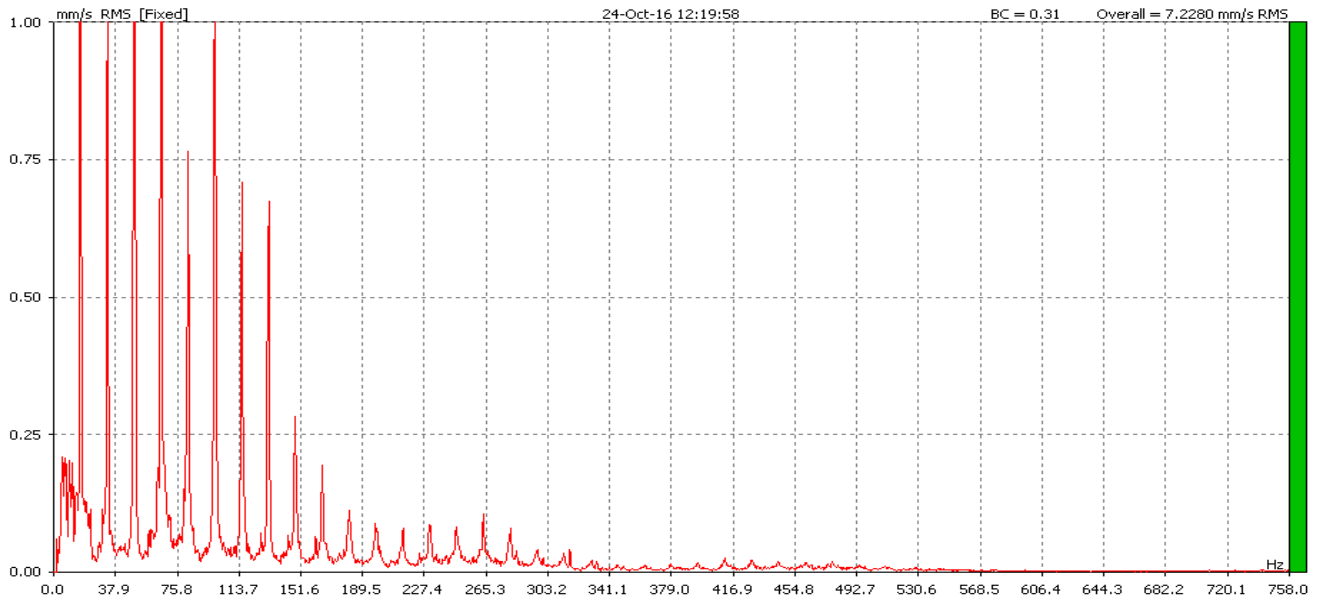
سطح رینگ بیرونی یکی از بیرینگهای موتور فن گریت

4- علایم لقی دورانی در مجموعه یاتاقان بیرینگ الکترو موتورها

مشخصه های فرکانسی لقی نوع C در مجموعه الکترو موتور وجود هارمونیک های متعدد سرعت دورانی ایجاد (rich spectrum) و در برخی موارد ایجاد ارتعاش در فرکانس $0.5 * RPM$ و هارمونیک های آن میباشد. معادل این علایم در منحنی شکل موج Truncation (صاف شدن یا بریده شدن قله های شکل موج ارتعاشات) میباشد که منجر به عیوب برخورد یا تماس فیزیکی (Rub) و وجود هر گونه فشار غیر عادی روی شافت میباشد. از جمله عیوب متداول در موتور های الکتریکی لقی مکانیکی غیرطبیعی در هوزینگ بیرینگ الکترو موتور بر روی در قاب الکترو موتور مشاهده میگردد.



علایم لقی وسایش در یاتاقان الکترو موتور



علائم لقی دورانی در قاب الکترو موتور

علائم لقی دورانی در مجموعه هوزینگ و بیرینگ الکترو موتور خط تولید برای اکثریت تجهیزات وجود دارد که بعد از پیشنهاد تعمیراتی و دمونتاژ مجموعه لقی در در قاب الکترو موتور و در برخی موارد بر روی نشیمنگاه بیرینگ بر روی شافت ملاحظه میشود.

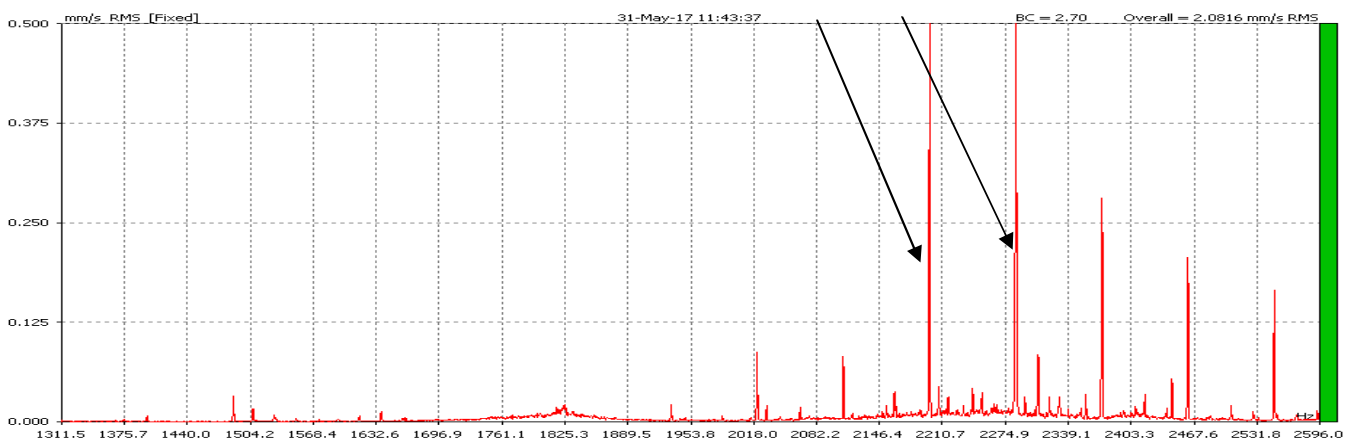
5- soft foot پایه های الکترو موتور

در برخی موارد در آنالیز ارتعاشات طیف فرکانسی در فاصله های 100 هرتز در مورد موتور های القایی بواسطه برهم خوردن تقارون فاصله هوایی مشاهده میگردد که یکی از دلیل یکسان نبودن میزان پایه های الکترو موتور میباشد که این عیب نه تنها عیوب الکتریکی است بلکه باعث ارتعاش و تخریب بیرینگ الکترو موتور نیز موجب میشود.

روش تشخیص و اندازه گیری soft foot

تشخیص در حالت استاتیکی: اندازه گیری به وسیله ساعت اندیکاتور، اندازه گیری به کمک سیستم الایمنت لیزری، اندازه گیری به کمک فیلر گیج

تشخیص در حالت دینامیکی: با تحلیل ارتعاشات و یا از طریق شل وسفت کردن پیچ های پایه موتور (به ترتیب به میزان اندک) و بررسی اثر آن بر ارتعاشات (در صورتی که soft foot منشا ارتعاش باشد، با شل کردن پیچ ها ن ارتعاش به میزان محسوس کاهش می یابد.



وجود پیک ها در دو برابر فرکانس تغذیه موتور و علائم فاصله هوایی نامتقارن در موتور

سایر عیوبی که ارتعاش در فرکانس 100 هرتز وجود انبالانسی در ولتاژ تغذیه موتور، لق بودن استاتور در قاب اصلی موتور، لق بودن لایه های هسته یا کوئل ها در استاتور، اتصال کوتاه بین لایه های هسته آهنی استاتور میباشد.

نکته: یکی از نشانه های مهم ارتعاش ناشی از مشکلات الکتریکی این است که به محض قطع برق موتور، ارتعاش موتور به طور همزمان رفع شود.

(کاهش محسوس دامنه ارتعاش پس از قطع برق موتور)

تعریف مدار موتور

سه فاز القایی با یک دیگر 120 درجه اختلاف فاز دارند. ولتاژهای هر فاز منبع تغذیه نیز دارای 120 درجه اختلاف فاز با یکدیگر می باشد. افزایش جریان بر اثر افزایش ولتاژ، متناسب با امپدانس مدار موتور می باشد. متالوژی بکار رفته در هسته استاتور، میدان مغناطیسی را در فاصله هوایی بین استاتور و رتور هدایت می کند. این میدان از میان میله های رتور گذشته و باعث القای جریان ثانویه در آنها میشود. لذا رتور همزمان با شار مغناطیسی ایجاد شده گردش می کند. سرعت میدان استاتور با میدان رتور برابر نیست. این اختلاف سرعت اصطلاحاً لغزش نامیده میشود و باعث ایجاد میدان مغناطیسی رتور میشود. میدان مغناطیسی استاتور، با سرعتی که به آن، سرعت سنکرون می گویند، شروع به دوران میکند. سرعت سنکرون به فرکانس برق تغذیه موتور و تعداد قطبهای موتور بستگی دارد.

سرعت سنکرون از رابطه روبرو بدست میاید.

$$N_s = \text{synchronous speed (RPM)} = (120 * \text{line freq}) / P$$

که P تعداد قطبهای موتور است. جدول ذیل نتیجه را برای موتور با تعداد قطبهای مختلف نشان میدهد.

No. Of poles	Synchronous Speed 50 Hz
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
12	500

نکته: در این جدول فرکانس برق تغذیه 50Hz فرض شده است. چنان چه موتور از طریق مبدل فرکانس راه اندازی شود باید فرکانس خروجی مبدل فرکانسی در رابطه قرار داده شود.

سرعت دورانی رتور، هیچ موقع با سرعت سنکرون برابر نشده و همیشه مقداری از آن کمتر است. به اختلاف این دو، سرعت لغزش می گویند:

$$\text{Slip speed} = \text{synchronous speed } (N_s) - \text{Rotor speed } (N_r)$$

شاخص لغزش (بدون بعد) نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$S = \text{slip} = (N_s - N_r) / N_s$$

محاسبه فرکانس گذر قطب به یکی از دو روش زیر انجام میگردد:

$$\text{Pole pass frequency (Hz)} = 2 * S * \text{line frequency}$$

$$\text{Pole pass frequency (Hz)} = (\text{number of pole} * \text{slip speed}) / 60$$

فرض کنید برای یک موتور 4 قطب، سرعت دورانی واقعی 1470 RPM باشد.

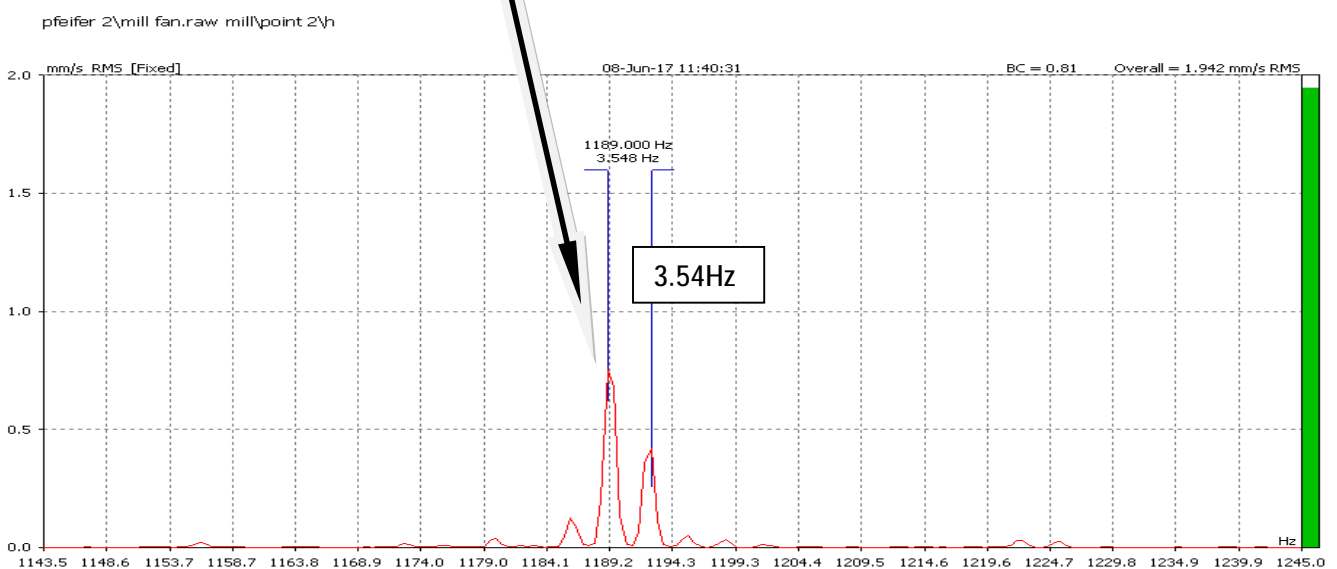
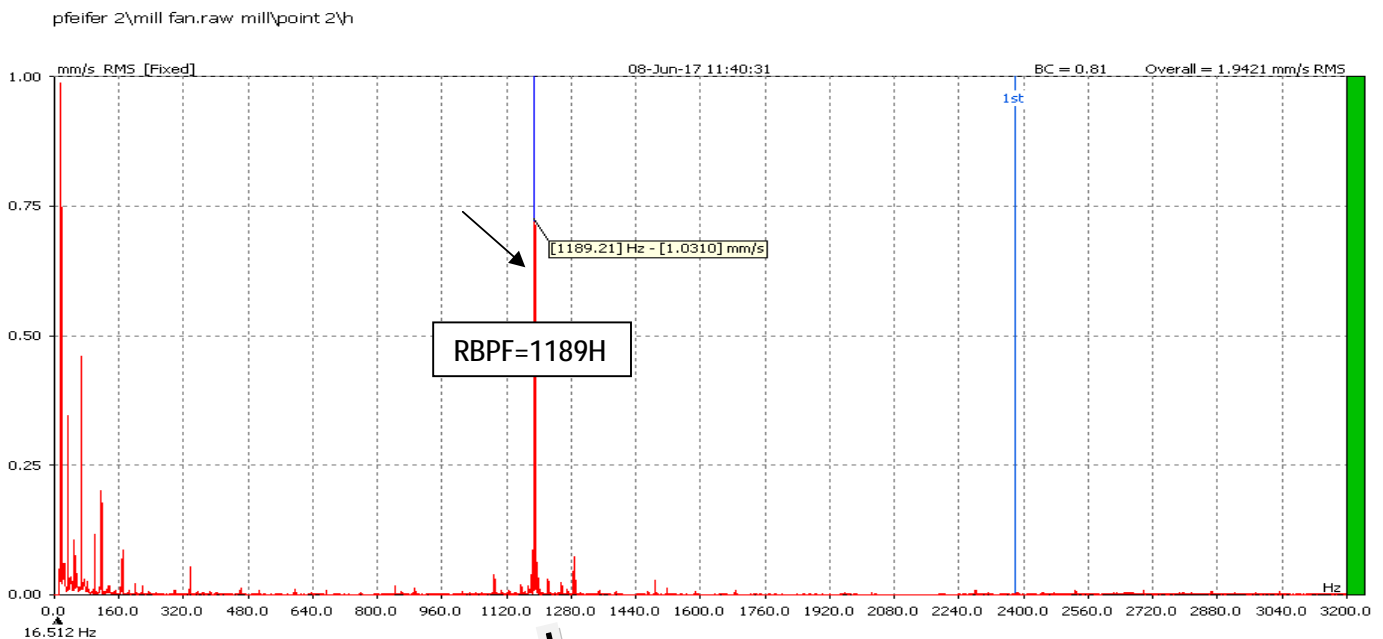
$$\text{Pole pass frequency} = 2 * \left\{ \frac{(1500 - 1470)}{1500} \right\} * 50 = 2 * 0.02 = 2 \text{ Hz}$$

فرکانس گذر میله های رتور (یا فرکانس گذر شیار استاتور) برابر است با تعداد میله های رتور (یا شیار های استاتور) ضرب در سرعت دورانی شفت الکترو موتور میباشد.

فرض کنید یک موتور با سرعت دورانی 1480 RPM . 24 میله رتور داشته باشد در این مثال فرکانس گذر میله های رتور عبارت است از :

$$\text{Rotor Bar Passing Frequency} = (24 * 1480) / 60 = 592 \text{ H}$$

6- الکترو موتور 2750 کیلو واتی میل فن آسیاب مواد خط دو با دور 990 دارای پیک با دامنه یک واحد در فرکانس 1189.21 هرتزی که با تعداد 72 شیار های استاتور الکترو موتور و دور 16.51 نسبت داشت بنابراین پیک های ساید بندکناری ان نیز مورد بررسی قرار گرفت ولذا جهت اطمینان موضوع آنالیز مدار الکتریکی انجام پذیرفت و سلامت الکترو موتور مورد تایید قرار گرفت.



در برخی موارد سایه‌بند‌های در اطراف پیک‌های 100 هرتز به فاصله RPM الکتروموتور قابل مشاهده می‌باشد که نشان دهنده فاصله هوایی غیر متقارن از نوع دینامیکی می‌باشد و نیز همچنین وجود پیک‌ها در ضریب فرکانس برق شبکه در اطراف پیک فرکانس گذر میله‌رتور نیز حاکی از این مثال می‌باشد.

نتیجه‌گیری:

در مقاله فوق‌عیوب مختلف برای الکتروموتورهای القایی معرفی گردید و برای هر یک نمونه‌ای از واحد شرکت سیمان هگمتان تشریح شد از آنجاییکه این تکنیک ارتعاش سنجی عیوب مختلف مربوط به بخش‌های گوناگون موتور را تحت پوشش قرار می‌دهد از برنامه‌های مدیریت موتورهای الکتریکی در واحدهای صنعتی قابل طرح می‌باشد. استفاده از این روش و آنالیز مدار الکتریکی پایش وضعیت موتورها را کامل نموده و این اطمینان خاطر را فراهم می‌نماید که استراتژی نگهداری و تعمیرات براساس وضعیت به نحو مناسب صورت‌اجرائی پیدا کند. برای این منظور یک پایگاه داده (data base) مناسب نرم‌افزاری برای ثبت نتایج تهیه گردیده که نتایج را برای ارزیابی و مقایسه به شکل مناسب ذخیره می‌کند و در پایان به عرض میرسانم تمام ارزیابی‌ها و تحلیل تکنیک‌های پایش وضعیت مبتنی بر پیگیری واحد‌اجرائی می‌باشد که دستورات مربوطه حول محور مدیریت محترم کارخانه بنا شده است که حسب دستور ایشان این تکنیک و واحد مربوطه قابل پیشرفت و پاسخ‌گویی در سیستم می‌باشد.

منابع:

_آنالیز مدار موتور و کاربرد آن برای پایش وضعیت و عیب‌یابی موتورهای الکتریکی در صنعت - حسین وروانی فراهانی. جواد دریس. کنفرانس پایش وضعیت و عیب‌یابی - دانشگاه صنعتی شریف

_ارتعاشات ماشین‌های صنعتی - نویسنده ویکتور ووک - مترجم دکتر رفیعیان و مهندس عزیزیان - انتشارات دانشگاه یزد

_اصول و مبانی ارتعاشات در نگهداری و عیب‌یابی ماشین‌های دوار - دکتر بهزاد وهمکاران - انتشارات شرکت ملی پتروشیمی