هشتمین همایش صنایع دریایی
۹ لغایت ۱۱ آبانماه ۱۳۸۵
استان بوشهر

بررسی روش آنالیز ارتعاشات جهت عیب یابی ماشین آلات دریایی

امیر همایون مقدادی[۱]، محمد مونسان[۲]، امین اشتری لرکی[۳]

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده زیر سطحی اصفهان

۱: Amir_meghdadi@yahoo.com

چکیده

امروزه روشهای نوینی برای عیب یابی ماشین آلات و تأسیسات دریایی ابداع شده‌اند که می‌توانند وقوع عیب را پیش بینی نمایند. با استفاده از این روشها می‌توان از ایجاد و گسترش عیوب در تجهیزاتی نظیر پمپ‌ها، فن‌ها، توربین‌ها و تأسیسات مربوط به آنها جلوگیری نمود. به‌این روشها، روشهای نگهداری و تعمیرات بر پایه نظارت بر وضعیت (Condition Monitoring) گفته می‌شود. استفاده از این روش‌ها برای کشتی‌ها و سکوهای دریایی که از تعداد زیادی ماشین آلات و تجهیزات تشکیل شده‌اند می‌تواند بسیار ارزشمند باشد.

در این مقاله، ابتدا فرایند نظارت بر وضعیت بصورت مختصر بیان شده و سپس روش عیب یابی با استفاده از آنالیز ارتعاشات که یکی از روشهای نظارت بر وضعیت می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، روش شناسایی عیوبی نظیر نا بالانسی، خروج از مرکز، خمیدگی شافت، نا هم محوری، لقی، نیروهای هیدرولیک و آیرودینامیک و مشکلات چرخدنده‌ها با استفاده از این روش بیان شده است.

کلمات کلیدی: عیب یابی- نت- آنالیز ارتعاشات

---

[۱] - کارشناس ارشد پژوهشکده زیر سطحی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

[2]– عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

[3]– کارشناس ارشد پژوهشکده زیر سطحی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

تعمیر و نگهداری فعالیتی است که برای اجتناب، شناسایی، پیشگیری و یا مقابله با از کار افتادگی به منظور نگهداری امکانات و تجهیزات فیزیکی کارخانه یا ماشین آلات در یک وضعیت کارکرد بهینه یا قابل قبول صورت می‌گیرد.

اعمال یک برنامهٔ موثر کنترل و نظارت بر وضعیت تجهیزات و سیستمهای مکانیکی، کاهش هزینه های مستقیم و غیر مس‌تقیم را برای منابع تولیدی و پروژه های عمرانی به دنبال خواهد داشت. ایجاد، بکارگیری و توسعهٔ روشهای نظارتی بر سیستمهای مکانیکی به عنوان ابزار نگهداری و تعمیر باعث افزایش عمر مفید ماشین آلات، همچنین کاهش نیاز به قطعات یدکی از طرف مصرف کنندگان گردیده و این جریان به معنی کاهش فروش ماشین آلات و قطعات یدکی خواهد بود که مغایر سیاستهای شرکتهای عظیم چند ملیتی است چرا که تقویت و توسعهٔ روشهای پیشرفته در نگهداری و تعمیرات، تضاد قهری با رونق بازار فروش قطعات و ماشین آلات داشته و این خود دلیل روشنی بر عدم حمایتهای لازم از طرف این شرکتها در زمینهٔ تحقیق، توسعه و ترویج روشهای پیشرفتهٔ نگهداری است و در واقع حتی در مواردی که چنین تکنیکهایی جنبهٔ عملی و کاربردی یافته، مصرف کنندگان اغلب به بکارگیری آنها تشویق نشده‌اند.

منظور از نگهداری و تعمیرات با روش نظارت بر وضعیت عبارت است از بدست آوردن علائم و نشانه‌هایی از وضعیت ماشین آلات، در حالی که ماشین همچنان مشغول کار می‌باشد تا دستگاه بتواند در یک شرایط ایمنی و اقتصادی ادامهٔ کار دهد یا مورد تعمیر واقع شود. استراتژی«نظارت بر وضعیت» عبارت است از اینکه تعمیری نیاز نیست مگر آنکه وضعیت دستگاه از شروع تخریب یا عیب عضوی از ماشین خبر بدهد. اکثر عیوب ایجاد شده در تجهیزات نشانه‌ها و علائمی را به همراه دارند که با استفاده از این علائم می‌توان وقوع عیب را پیش بینی نمود. این روش نسبت به تعمیرات پیشگیرانه یا دوره‌ای هزینه کمتری در بر داشته و از تعویض زود هنگام قطعات جلوگیری می‌شود [۱] .همچنین قبل از وقوع خسارت می‌توان از آن جلوگیری نمود. یکی از این روشها آنالیز ارتعاشات تجهیزات است که در این مقاله به توضیح آن می‌پردازیم.

Archive of SID

www.SID.ir

آنالیز و پردازش سیگنالهای ارتعاشی

به طور کلی علت ایجاد حرکت ارتعاشی در ماشین آلات نیرویی است که در طول زمان تغییر می‌کند. نیرو از دو مشخصهٔ اندازه و جهت تشکیل شده است. بنابراین هر کدام از این دو مشخصه در صورتی که در طول زمان تغییر کند می‌تواند حرکت ارتعاشی ایجاد نماید.

هر یک از عیوب موجود در تجهیز، ارتعاش یا ارتعاشاتی را با فرکانسهای خاص ایجاد می‌نماید که وقتی با هم جمع می‌شوند، خود را به صورت یک طیف زمانی تناوبی نشان می‌دهند. افزایش غیر عادی ارتعاشات تجهیزات از ایجاد عیب در آنها خبر می‌دهد.[۲] سیگنالهای اندازه‌گیری شده در ماشینها شامل تعداد زیادی امواج با فرکانسهای خاص است که باهم ترکیب شده و سیگنال پیچیده‌ای را ایجاد می‌کنند که برای شناسایی عیوب ارتعاشی لازم است این سیگنالها از یکدیگر جدا شده و مورد بررسی قرار گیرند. یک قضیهٔ ریاضی که اولین بار توسط فوریه پیشنهاد شد بیان می‌کند که هر منحنی تناوبی را می‌توان بصورت ترکیبی از منحنیهای سینوسی نشان داد. [۳]

$$f(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos\frac{n\pi}{L}+b_n\sin\frac{n\pi}{L}) \qquad (۱)$$

$$a_0=\frac{1}{L}\int_{-L}^{L}f(t)dt \quad ,a_n=\frac{1}{L}\int_{-L}^{L}f(t)\cos\frac{n\pi}{L}dt \quad ,b_n=\frac{1}{L}\int_{-L}^{L}f(t)\sin\frac{n\pi}{L}dt \qquad (۲)$$

یا به عبارت دیگر:

$$X(t)=X_0+X_1\sin(\omega+\varphi_1)+X_2\sin(2\omega+\varphi_2)+X_2\sin(3\omega+\varphi_3)+\ldots+X_n\sin(n\omega+\varphi_n) \qquad (۳)$$

بنابراین با گرفتن تبدیل فوریه از ارتعاش بدست آمده از تجهیز می‌توانیم آن را به صورت مجموعی از توابع سینوسی که هر یک مشخص کنندهٔ یکی از عیوب موجود در سیستم می‌باشند، نشان دهیم. بنابراین اکنون تعداد زیادی موج سینوسی موجود است که هر کدام دارای یک دامنه و یک فرکانس مخصوص به خود می‌باشند. دامنه و فرکانس، مشخصهٔ یک موج سینوسی است. یعنی با داشتن دامنه و فرکانس می‌توانیم موج را به صورت کامل مشخص کنیم. دامنه های بدست آمده روی محور عمودی و فرکانس‌های نظیر آنها روی محور افقی رسم می‌شوند[۴]. به دیاگرام بدست آمده طیف فرکانسی ارتعاشات گفته می‌شود. (شکل۱) حال باید بررسی شود که آیا میزان ارتعاش ایجاد شده در تجهیز در حد مجاز است یا اینکه بیش از حد مجاز می‌باشد و در صورتی که از حد مجاز بیشتر است قسمت معیوب تجهیز تعمیر و یا تعویض گردد.

Archive of SID
www.SID.ir

برای اندازه گیری ارتعاشات از سنسورهای ارتعاشی استفاده می‌گردد. در این سنسورها انرژی مکانیکی ناشی از ارتعاش که به سنسور وارد می‌گردد به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌گردد. سیگنال آنالوگ سنسور ارتعاشی از طریق تقویت کنندهٔ ورودی و فیلتر آنتی آلیاس و یک مدار «نمونه برداری و نگهداری» یا به عبارتی sample and hold به مبدل «آنالوگ به دیجیتال» (A/D) فرستاده می‌شود. این مدار از سیگنال زمانی نمونه برداری کرده و مقدار دامنهٔ مستقل متوالی زمانی را تشکیل می‌دهد. در این روش مقدار هر دامنهٔ مستقل تعیین شده و به اطلاعاتی در مبنای دودویی تبدیل می‌گردد. (کدگذاری)

نمونه گیری عبارت است از فرایند بدست آوردن مجموعه‌ای از مقادیر عددی مجزا از یک تابع پیوسته. مدارهای الکترونیکی ولتاژ لحظه‌ای سیگنال را در فواصل زمانی منظم حس نموده و آن را به یک سیگنال الکتریکی با یک مقدار عددی تبدیل می‌کند که همانند یا متناظر سیگنال اصلی است. (شکل ۲)

پس از این مرحله بایست سیگنال از حوزهٔ زمانی به حوزهٔ فرکانسی تبدیل شود تا سیگنالهای متناظر با عیوب مختلف بصورت طیف فرکانسی قابل نمایش شوند[۵]. در پردازشگرها این کار به دو صورت آنالوگ و دیجیتال انجام می‌گیرد. در روش آنالوگ از یک فیلتر میان گذر برای عبور دادن فرکانس خاص و محوکردن سایر فرکانسها استفاده می‌شود. در این حالت فرکانسهای واقع در محدوده‌ای کوچک از فیلتر عبور داده شده و تمام فرکانسهای دیگر حذف می‌شوند.

در روش دیجیتالی یک روش استفاده از فیلترهای دیجیتالی است. این فیلترها مشابه فیلترهای آنالوگ هستند از این لحاظ که توصیف ریاضی به یک الگوریتم عددی تبدیل می‌شود که مقادیر ورودی (از یک مبدل A/D) براساس آن پردازش می‌شوند. همچنین مقادیر RMS سریهای خروجی نیز به طور عددی محاسبه می‌شوند. ضمناً الگوریتمهای سریع ریاضی که در تحلیلگرهای پیشرفته بکار می‌روند صدها یا هزاران فیلتر آنالوگ موازی را شبیه‌سازی می‌کنند. روش دوم استفاده از تبدیل فوریهٔ دیجیتالی است که در ادامه در این رابطه بیشتر توضیح داده خواهد شد.

تبدیل فوریهٔ سریع (Fast Fourier Transform)

همانطور که گفته شد در تحلیل دیجیتالی برای جدا کردن ارتعاشات از یکدیگر می‌توان از تبدیل فوریهٔ سریع استفاده نمود. بدین طریق انجام تبدیلات سریع بین حوزه‌های زمان و فرکانس امکان‌پذیر می‌گردد. سیگنالی که باید آنالیز شود به شکل آنالوگ وارد می‌گردد و سپس:

Archive of SID
www.SID.ir

الف- نمونه برداری می‌شود ب- به مقادیر دیجیتالی تبدیل می‌شود ج- در حافظه ذخیره می‌شود د- با استفاده از آنالیز فوریه، طیف محاسبه می‌شود.

مبانی اساسی برای تبدیل فوریهٔ سریع نخستین بار توسط فوریه، ریاضی‌دان فرانسوی در سال ۱۸۲۲ بنیان نهاده شد. او نشان داد که هر موج متناوب می‌تواند به یک سری از ارتعاشات هارمونیک با دامنه و فاز مستقل تجزیه گردد.

بعد از این طولی نکشید که انتگرال فوریه ابداع شد که امروزه هنوز اصول اساسی برای تبدیل سیگنالها از حوزهٔ زمانی به حوزهٔ فرکانسی را نشان می‌دهد. سیگنال به یک سری زمانی دیجیتال تبدیل می‌شود. تعداد ثابتی از نقاط متوالی در سری انتخاب می‌شوند و این سری زمانی با استفاده از FFT به مؤلفه‌های متناظر در حوزهٔ فرکانسی تبدیل می‌شود.

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f/t} dt \qquad (۴)$$

در تبدیل FFT بخش کوچکی از موج زمانی که پنجرهٔ زمانی نامیده می‌شود انتخاب شده، طیف فرکانسی با استفاده از الگوریتم FFT محاسبه می‌شود. در طول این فرآیند فرض می‌شود که سیگنال داخل این پنجرهٔ زمانی در طول زمان مرتباً تکرار می‌شود.

تقریباً همهٔ آنالایزرهای فوریه براساس جفت انتگرال فوریه کار می‌کنند.

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \qquad (۵)$$

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \qquad (۶)$$

که رابطهٔ اخیر مؤلفه فرکانسی مختلط $F(\omega)$ مربوط به تابع زمانی f(t) برای هر فرکانس زاویه‌ای ω را تعریف می‌کند. معادلهای گسستهٔ این معادلات را می‌توان به صورت تبدیل فوریهٔ گسسته (DFT) نوشت:

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{(-jkn2\pi)/N} \qquad (۷)$$

$$F(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{(-jkn2\pi)/N} \qquad (۸)$$

Archive of SID

www.SID.ir

برای محاسبهٔ مستقیم همه ضرایب $F(k)$ براساس رابطهٔ فوق به انجام N^2 عملیات مختلط نیاز است. در حالی که الگوریتم FFT که تبدیل فوریه را سریعتر انجام می‌دهد به منظور بدست آوردن همان مقادیر با تعداد عملیات $N \log_2 N$ کاهش قابل توجهی در محاسبات بوجود آورده است.

انواع نمایش طیف فرکانسی

این تابع امکان ایجاد حداکثر میزان قدرت تفکیک پذیری تحلیل کننده را بوسیلهٔ انتخاب مرحله به مرحلهٔ بخشهای مختلف محدودهٔ فرکانسی آنالیز، فراهم می‌سازد. البته مشروط به اینکه طیف با قدرت تفکیک پذیری متناظر محاسبه شده باشد تحلیلگرهای پیشرفتهٔ FFT امکان نمایش محورهای دامنه و فرکانس در هر دو مقیاس خطی و لگاریتمی را فراهم آورده‌اند که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند.

روند دیگری که برای نمایش وجود دارد نمودار آبشاری است. در این روش طیفهای فرکانسی بدست آمده برای مقایسه در یک نمودار که به نمودار آبشاری معروف است رسم می‌شوند که روش ارزشمندی برای محاسبه و مشاهدهٔ تأثیرات شرایط مختلف عملیاتی روی رفتار ارتعاشی یک ماشین می‌باشد. (شکل۳) از دیگر روشهای نمایش طیف، طیف تفاضل است که مقایسه‌ای است بین خطوط طیف فرکانسی در دو طیف که همزمان اندازه‌گیری می‌شوند. خطوط طیف فرکانسی در دو طیف از یکدیگر تفریق شده و در نتیجه می‌توان اختلاف در رفتار ارتعاشی دو نقطه را مشاهده نمود.

مروری بر مشکلات و عیوب تجهیزات

نابالانسی [۶]: نابالانسی مهمترین علت بوجود آمدن ارتعاشات در ماشین آلات می‌باشد. نابالانسی عبارت است از توزیع غیر یکنواخت وزن یک قطعه حول خط مرکزی دوران آن. وجود حباب هوا در موقع ریخته‌گری، جان (web) ضخیم‌تر در پولیها، سوراخ خارج از مرکز و ماشینکاری غیر یکنواخت شیار پولیها باعث می‌شوند که در یک طرف خط مرکزی دوران، وزن بیشتری متراکم گردد. تقریباً در تمام قطعات دوار این عیوب وجود دارند.

Archive of SID
www.SID.ir

مثلاً در پروانهٔ موتورها یا فنها نابالانسی در اثر ایجاد رسوب روی پره‌ها و یا شکستگی در پروانه و یا در اثر سایش ایجاد می‌شود. به هنگام کنده شدن ذرات انباشته شده، نامیزانی به طور ناگهانی و به صورت قابل توجهی پدیدار می‌گردد. خوردگی نیز از عوامل مهمی است که در تأسیسات دریایی منجر به افزایش نابالانسی و ایجاد ارتعاشات می‌گردد. از دیگر عوامل مهم ایجاد کنندهٔ نابالانسی، جمع شدن تلرانسها در موقع سوارکردن قطعات دوار است. قطر سوراخ پولی باید کمی‌بیشتر از قطر شافت باشد و وقتی از یک خار با پیچ تنظیم برای سوار کردن استفاده می‌شود خط مرکزی پولی به یک طرف خط مرکزی شافت منتقل می‌شود. در نتیجه در سیستم نابالانسی بوجود می‌آید. نابالانسی عدم انطباق مرکز ثقل سیستم بر خط مرکزی (هندسی) محور دوران است. به عبارت دیگر، توزیع غیر یکنواخت وزن قطعات باعث می‌شود که عدم بالانس در نقطه‌ای متمرکز باشد. به‌این نقطه، نقطهٔ سنگین (Heavy spot) گفته می‌شود.

نقطهٔ سنگین نشان دهندهٔ نابالانسیهاست. وزنه‌ای برابر ولی در جهت مقابل نقطهٔ سنگین، روتور را بالانس می‌کند.

با استفاده از طیف فرکانسی می‌توانیم وجود نابالانسی را تشخیص دهیم. نابالانسی خود را در فرکانس دور اصلی نشان می‌دهد. (1*RPM) برای نابالانسی می‌توانیم یک جرم معادل (نقطهٔ سنگین) در نظر بگیریم. این جرم نامیزان با سرعتی برابر سرعت دوران شافت در حال دوران است و همیشه سنسور ارتعاشی مؤلفهٔ نیروی عمودی آن ($FCos\omega t$) را در این حالت دریافت می‌نماید. همانطور که می‌دانیم $FCos\omega t$ یک موج سینوسی با فرکانس ω می‌باشد. بنابراین با مشاهدهٔ طیف فرکانسی دستگاهی که دارای نابالانسی می‌باشد یک پیک ارتعاشی در سرعت دوران شافت در جهت شعاعی مشاهده خواهد شد. در نابالانسی فاز اندازه گیری شده در جهتهای افقی و عمودی با هم ۹۰ درجه اختلاف دارند.

روتور خارج از مرکز: خارج از مرکز بودن زمانی اتفاق می‌افتد که مرکز چرخش پولی، چرخ دنده، یاتاقان، آرمیچر، موتور و ... منطبق بر مرکز هندسی آن نباشد. در این حالت بیشترین ارتعاش در 1* RPM عضو خارج از مرکز در جهت خط و اصل دو روتور اتفاق می‌افتد. فازهای قرائت شده در جهت افقی و عمودی معمولاً ۰ تا ۱۸۰° اختلاف دارند (که هر کدام نشان دهنده حرکت مستقیم الخط می‌باشند).

خمیدگی شافت: شافت خمیده باعث بوجود آمدن ارتعاشات محوری زیاد همراه با اختلاف فاز محوری تقریباً ۱۸۰° در روی همان عضو دستگاه می‌شود[۷].

Archive of SID
www.SID.ir

اگر خمش در نزدیکی مرکز شافت باشد معمولاً در 1*RPM (سرعت دوران) بوده و اگر در نزدیکی کوپلینگ باشد در ارتعاش غالب 2*RPM (دو برابر فرکانس دوران) می‌باشد. دامنهٔ نوسانات در جهت محوری ۵۰٪ یا کمی‌بیشتر از نوسانات شعاعی است.

ناهم محوری:

۱- ناهم‌محوری زاویه‌ای: این نوع ناهم‌محوری باعث بوجود آمدن ارتعاشات محوری زیاد و اختلاف فاز ۱۸۰° در دو طرف کوپلینگ می‌شود. دامنهٔ 2*RPM اغلب بزرگتر از دامنهٔ 1*RPM می‌باشد، اما ارتفاع آن نسبت به 1*RPM اغلب به نوع کوپلینگ و طریقهٔ نصب آن بستگی دارد.

۲- یاتاقان ناهم‌محور با شافت: یاتاقانی که کج قرار گرفته باشد باعث تولید ارتعاشات محوری قابل توجهی می‌شود. این عیب باعث ایجاد حرکت پیچشی با اختلاف فاز تقریباً ۱۸۰° می‌شود که با اندازه گیری در بالا و پایین یا در طرفین پوستهٔ یاتاقان و در جهت محور قابل مشاهده است.

لقی مکانیکی: لقی مکانیکی بوسیله طیفهای نوع A یا B یا C مشخص می‌شود. (شکل ۴) نوع A به دلیل شل بودن (ضعف سازه‌ای) پایهٔ ماشین، صفحهٔ پایه یا فونداسیون، همچنین خراب شدن بتن فونداسیون، شل شدن پیچهای نگهدارندهٔ پایه و اعوجاج پوسته یا فونداسیون (یعنی پایهٔ نرم) بوجود می‌آید. آنالیز فازی ممکن است اختلاف فازی تقریباً برابر با ۱۸۰° را بین اندازه‌گیریهای عمودی در روی پایهٔ ماشین، صفحهٔ پایه و خود پایه نشان داد. نوع B معمولاً در اثر شل بودن پیچهای بدنهٔ یاتاقان و وجود ترک در سازهٔ پوسته یا پایهٔ یاتاقان بوجود می‌آید.

نوع C معمولاً در اثر سفت نبودن مناسب اجزاء با یکدیگر بوجود می‌آید که باعث ایجاد هارمونیکهای زیادی می‌شود که اثر پاسخ غیرخطی اجزاء لق به نیروهای دینامیکی حاصل از روتور است. از طرف دیگر باعث قطع شدن دامنهٔ شکل موج زمانی می‌شود. نوع C اغلب در اثر لقی بدنهٔ داخلی و یاتاقان و بدنهٔ آن، لقی زیاد در یاتاقانهای نوع غلتشی یا آستینیتی یا شل بودن پروانه (ایمپلر) روی شافت بوجود می‌آید. فاز در نوع C اغلب ناپایدار است و ممکن است در دو نوبت اندازه گیری اختلاف زیادی با هم داشته باشد، این حالت مخصوصاً زمانی روی می‌دهد که روتور در زمان راه‌اندازی در روی شافت تغییر مکان دهد.

Archive of SID

www.SID.ir

لقی مکانیکی اغلب نسبت به جهت، بسیار حساس است و چنانچه زاویهٔ اندازه گیری در جهت شعاعی هر دفعه ۳۰° افزایش داده شود مقادیر قرائت شده روی پوستهٔ یاتاقان ممکن است بسیار متفاوت باشد. همچنین لقی اغلب باعث بوجود آمدن مضاربی از زیر هارمونیکها دقیقاً در (۱/۵RPM ،۲/۵RPM ، etc و ۰/۵RPM) می‌شود.

سایش شافت: سایش معمولاً توسط تماس یک جسم دوار با عضو ثابت در یک ماشین بوجود می‌آید. به عنوان مثال آب بندهای مارپیچی، دیافراگمها و ... . سایشها معمولاً نرمال و لق یا نرمال و محکم می‌باشند. سایش کاملاً محکم در بیشتر موارد به خرابی سریع ماشین منجر خواهد شد. تماس ممکن است در اثر پدیده‌هایی نظیر افزایش جرم نابالانس و یا افزایش خیز یا خمش شافت در محدوده خارج از لقی مجاز در اثر حرارت یا پدیده های مشابه بوجود آید .

سایش کامل معمولاً با سایشهای خفیف شروع می‌شود. سایشهای خفیف بر اثر برخورد بوجود می‌آیند. با گذشت زمان این سایشها شدیدتر می‌شود و هنگامی‌که نقطهٔ سایش همانند یک یاتاقان روغنکاری نشده عمل می‌کند ارتعاشات افزایش می‌یابد. با افزایش خرابی، نسبت مدت زمانی که شافت با عضو ثابت در تماس است افزایش می‌یابد و باعث افزایش سریع ضریب فنریت کلی اصطکاک تماسی متقابل می‌شود. مدارهای این سایشهای ضربه‌ای فشرده‌تر شده و در فرکانس بالاتری رخ می‌دهند. مدارهای مربوط به‌این تاثیرات در شکل ۵ الف نشان داده شده است.

مشاهدات فاز که از آن به عنوان کیفازور یاد می‌شود در نتیجهٔ تاثیرات سایش شافت به میزان قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. بروز سایش باعث تغییر شدید کیفازور (بیش از ۱۰ درجه تغییر فاز) می‌شود و چنان گسترش می‌یابد که در مورد سایش کامل، یک مدار در خلاف جهت دوران شافت بوجود می‌آید.(شکل۵ب). این حرکت عکس به‌این علت بوجود می‌آید که نیروی اصطکاک در خلاف جهت دوران شافت است، بطوری که وقتی خیلی بزرگ می‌شود (همانند حالتی که در مورد سایش کامل بوجود می‌آید) محور را وادار می‌کند تا در روی مداری در جهت عکس حرکت کند. فرکانس حرکت مداری سایش معکوس، علیرغم آنکه ممکن است سرعت محور بر اثر اصطکاک کم شود، دارای مقدار ثابتی است.

در سایش روتور، زمانی که قطعات چرخنده با قطعات ثابت تماس پیدا می‌کنند طیفی مشابه با لقی مکانیکی تولید می‌نماید.

Archive of SID
www.SID.ir

سایش ممکن است در قسمتی از یک دوران و یا در طی یک دوران کامل اتفاق افتد. معمولاً یک سری از فرکانسها را تولید می‌نماید و اغلب یک یا چند رزونانس را تحریک می‌نماید. اغلب زیر هارمونیکهای اعشاری از سرعت کاری را (1/n و ... ۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)، بسته به موقعیت فرکانسهای طبیعی روتور، تحریک می‌نماید. (شکل ۶)

نیروهای هیدرولیک و آیرودینامیک: در اثر عبور سیالات در کانالها یا از فنها و پمپها، نیرویی به‌این تجهیزات وارد می‌شود که باعث ایجاد اتعاش در آنها می‌گردد. فرکانس این ارتعاشات با حاصلضرب تعداد تیغه‌ها یا پره‌ها در RPM برابر است. این فرکانس همواره در پمپها فنها و کمپرسورها وجود دارد و معمولاً نشان دهندهٔ مشکلی نمی‌باشد. اگر فرکانس این ارتعاشات با فرکانس طبیعی سازه برابر شود ممکن است باعث تخریب سازه شود. همچنین خمهای ناگهانی در لوله یا کانال و یا وجود موانعی که باعث اغتشاش جریان می‌شوند همچنین خارج از مرکز بودن روتور فن یا پمپ می‌تواند باعث ایجاد اغتشاش در سیال شود. اغتشاش جریان اغلب در دمنده‌ها به علت تغییرات فشار یا سرعت هوا که از میان فن یا کانالهای متصل به آن می‌گذرد بوجود می‌آید. در این حالت ورتکسهایی روی سازه ایجاد شده و از آن جدا می‌شود. این جدایش نیرویی به سازه وارد می‌کند که باعث ایجاد ارتعاش در آن می‌شود.

مشکلات ایجاد شده در چرخدنده‌ها: اکثر عیوب موجود در چرخدنده‌ها خوردگی و فرسودگی است که ۹ مورد بوده و در دو گروه طبقه بندی می‌شود.[۸]

گروه ۱: عیوب سطحی : ۱- خوردگی ۲ـ تغییر فرم پلاستیک ۳ـ scoring ۴ـ خستگی سطحی ۵ـ خرابیهای مختلف سطح دنده

گروه ۲: شکستگی دنده : ۱ـ خستگی ۲ـ خوردگی شدید ۳ـ بار اضافی ۴ـ ترک خوردگی

عواملی که باعث ارتعاش دنده ها می‌باشد عبارتند از: ضربه های دنده ها در آغاز تماس آنها، تغییر در نیروی اصطکاک ناشی از لغزش دنده‌ها، هوای فشرده بین دو دنده، خرابی فیلم روغن و تغییر سختی درگیری.

مهمترین معیار شناسایی عیب در چرخ دنده‌ها وجود هارمونیک (باندهای جانبی) در ارتعاشات است. ضرایب صحیح یک فرکانس را هارمونیکهای آن فرکانس می‌گویند. عامل ایجاد هارمونیک تغییر شکل اجزاء درگیر می‌باشد. در عیوبی نظیر ناهم‌محوری یا عیب در دنده‌ها که دو قطعه باهم در تماس بوده و به هم نیرو وارد می‌نمایند، دو قطعه در یک نقطه کمی تغییر شکل (لهیدگی) پیدا می‌کنند تا مقداری از نیروی وارد شده به‌این طریق خنثی شود. در این حالت دیاگرام تنش به صورت کاملاً سینوسی نمی‌باشد بلکه در قسمت پیک خود تغییر شکل پیدا می‌کند.

Archive of SID
www.SID.ir

انرژی ذخیره شده احتمالاً در محدوده‌ای از فرکانسهای باند جانبی ظاهر می‌شود که توسط هارمونیکهای بالاتر فرکانس اصلی، تنظیم (مدوله) می‌شوند. بطور کلی هنگامی که دو حرکت هارمونیک با دامنه‌های یکسان اما با فرکانسهایی که اندکی با یکدیگر متفاوتند به جسمی اعمال شوند ارتعاشات ترکیبی تولید خواهند کرد که دارای فرکانس ضربان خاصی است. بنابراین اگر دو حرکت با فرکانس ω_1 و ω_2 به صورت زیر باشند:[۱]

$$x_1 = ACos\omega_1 t \qquad (۹)$$

$$x_2 = ACos\omega_2 t \qquad (۱۰)$$

حرکت ترکیبی به‌این شکل خواهد بود:

$$x = x_1 + x_2 \qquad (۱۱)$$

$$x = ACos\omega_1 t + ACos\omega_2 t \qquad (۱۲)$$

$$x = 2A\cos\left[\left(\frac{\omega_1+\omega_2}{2}\right)t\right]\cos\left[\left(\frac{\omega_1-\omega_2}{2}\right)t\right] \qquad (۱۳)$$

نمودار این منحنی در شکل۷ نشان می‌دهد که

۱-دامنه بین ۰ تا ۲A تغییر می‌کند.

۲-حرکت کلی یک موج کسینوسی با فرکانس $\frac{\omega_1+\omega_2}{2}$ است.

۳-الگوی خاصی که به پدیدهٔ ضربان مشهور است دارای فرکانس ضربان $\frac{\omega_1-\omega_2}{2}$ می‌باشد.

یک مثال عددی از مدولاسیون ۱۰۰٪ را در نظر می‌گیریم که در آن، فرکانسهای باند جانبی کاملاً با اثرات چرخش چرخ دنده مدوله می‌شوند:

سرعت چرخ دندهٔ شماره ۱:

$F_۱ = 40/4HZ = 2400\ RPM$

تعداد دنده های چرخ دندهٔ شمارهٔ ۲: ۵۳عدد

بنابراین سرعت چرخ دندهٔ شمارهٔ ۲برابر است با $F_2 = 29.1Hz = 1310rpm$ وفرکانس تماس دندانه‌ها برابر خواهد بود با:

$$F_c = ۲۹ \times ۴۰/۴ = ۵۳ \times ۲۱/۹ = ۱۱۶۰\,HZ$$

Archive of SID
www.SID.ir

مدولاسیون بین F_1 و F_c بصورت جمع یا تفاضلی بصورت $f_1 \pm f_c, f_1 \pm 2f_c$ و... ظاهر می‌شود. به طور مشابه مدولاسیون بین f_c و f_2 به صورت مدولاسیون باند جانبی $f_c \pm f_2$ خواهد بود.

بنابراین اگر یک نمودار طیفی مورد تحلیل واقع شود که در آن باندهای جانبی دارای فواصل مساوی از f_1 باشند نشان دهندهٔ وجود عیب در چرخ دندهٔ شمارهٔ ۱ می‌باشد. در حالی که اگر باند جانبی دارای فواصل مساوی از فرکانس f_2 باشد عیب مربوط به چرخ دندهٔ شمارهٔ ۲ می‌باشد. (شکل ۸)

در چرخ دنده های بدون عیب به طور معمول ۱×RPM و ۲×RPM به همراه فرکانس درگیری چرخدنده‌ها (GMF) وجود دارد. معمولاً GMF در اطراف خود دارای باندهای جانبی مربوط به سرعت کاری است.

نشانهٔ بارز سایش در دنده‌ها تحریک فرکانس طبیعی چرخدنده همراه با باندهای جانبی اطراف آن می‌باشد که با فاصله‌ای باندازهٔ سرعت کاری چرخدندهٔ خراب قرار گرفته‌اند.

باندهای جانبی با دامنهٔ نسبتاً بالا در اطراف فرکانس درگیری چرخدنده (GMF) اغلب نشان دهندهٔ خروج از مرکز چرخدنده‌ها، بک‌لش یا غیر موازی بودن شفتها است. بک‌لش نامناسب معمولاً GMF و فرکانس طبیعی چرخدنده را تحریک می‌نماید که هر دو آنها در ۱×RPM دارای باندهای جانبی می‌شوند. اگر مشکل بک‌لش وجود داشته باشد اغلب با افزایش بار، دامنه‌های GMF کاهش می‌یابد. ناهم‌محوری چرخدنده‌ها تقریباً همواره هارمونیکهای مرتبه ۲ یا بالاتر GMF را تحریک می‌کند که آنها نیز دارای باندهای جانبی در سرعت کاری هستند.

وجود یک دندانهٔ شکسته یا ترک دار باعث تولید دامنهٔ بالایی در ۱×RPM آن چرخدنده می‌شود و علاوه بر آن فرکانس طبیعی چرخدنده (F_n) را در حالی که دارای باندهای جانبی در دور کاری است، تحریک می‌نماید که این مشکل به بهترین نحو توسط شکل موج در حوزهٔ زمان قابل شناسایی است، بدین صورت که هر زمان دندانه مشکل‌دار می‌خواهد با دندانهٔ چرخدندهٔ مقابل درگیر شود، یک پیک با دامنهٔ زیاد تولید می‌نماید. (شکل ۹) فرکانس مربوط به دندانه با شکل هانتینگ (F_{HT}) مخصوصاً برای تشخیص عیوبی که هم در چرخدنده و هم در پیستون در حین ساخت و یا حمل و نقل نادرست بوجود می‌آید مؤثر است. این مشکل می‌تواند باعث بوجود آمدن ارتعاشات با دامنهٔ نسبتاً زیاد شود اما از آنجا که در فرکانس‌های پایین و اکثراً کوچکتر از ۶۰۰ CPM اتفاق می‌افتد اغلب به آن توجه نمی‌شود. در جفت چرخ دنده‌ای که‌این مشکل را دارد معمولاً صدای غرش از چرخدندهٔ محرک منتشر می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

بیشترین اثر زمانی اتفاق می‌افتد که دندهٔ خراب چرخدنده و دندهٔ خراب پیستون هر دو با هم در یک زمان تماس پیدا کنند. (شکل ۹)

پیشرفتهای جدید در زمینه نگهداری و تعمیرات (Condition Monitoring)

امروزه پیشرفتهای زیادی در زمینه نگهداری و تعمیرات (C.M) انجام گرفته است. در زمینه آنالیز ارتعاشات، استفاده از سیستمهایی که به صورت دائم ارتعاشات را اندازه‌گیری کرده و نشان می‌دهد، در حال پیشرفت است. بدین منظور سنسورهای ارتعاشی بصورت دائم در قسمتهای حساس ماشین جاسازی می‌شود و ارتعاشات بطور ممتد اندازه‌گیری شده و به اپراتور نشان داده می‌شود. به‌این ترتیب اپراتور می‌تواند به‌ایجاد عیب در سیستم پی ببرد. حتی می‌توان سیستم‌های هشدار دهنده را طراحی کرد که به محض اینکه ارتعاشات سیستم به حد اخطار رسید، به اپراتور اعلام خطر نموده و یا سیستم را از کار بیاندازد. بنابراین می‌توان اجزاء اصلی را بصورت دائم به سیستم CM متصل نمود و اجزاء فرعی سیستم را با کمک ابزارهای دستی، بازرسی نمود. قرار دادن کابلها و سیمهای ارتباطی روی دستگاههای در حال کار، مهمترین مشکل این روش می‌باشد. تعدادی از شرکتها، تکنولوژی ارتباطات رادیویی را در این زمینه توسعه داده‌اند ولی برای اغلب کاربردها در نیروگاههای حرارتی این روش با مشکل مواجه می‌شود. در زمینه مدل کردن سیستمهای نگهداری و تعمیرات و بخصوص تعمیرات و نگهداری بر پایه نظارت بر وضعیت پیشرفتهای زیادی انجام گرفته است. امروزه از روش‌های منطق فازی برای مدل کردن این سیستمها بهره گرفته می‌شود. از جمله این موارد محاسبه زمان باقیمانده CRT (Condition Residual Time) مربوط به سیستم یا قطعه‌ای می‌باشد که عیب در آن ایجاد شده است[۹]. مدت زمانی که عیب مشاهده می‌شود تا زمانی که به شکست و نابودی منجر می‌شود را زمان باقیمانده می‌نامند. محاسبه زمان باقیمانده برای ما حائز اهمیت است زیرا با دانستن آن می‌توانیم از قطعه معیوب حداکثر استفاده را ببریم و از تعویض زود هنگام آن جلوگیری کنیم.

Archive of SID

www.SID.ir

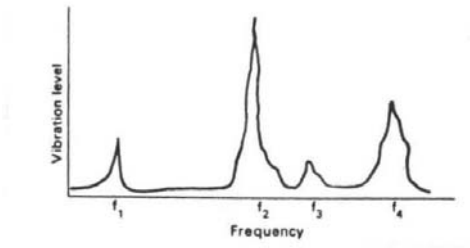
نتیجه‌گیری

یکی از روشهای نوین برای تشخیص عیوب، استفاده از آنالیز ارتعاشات است. هر یک از عیوب، در فرکانس خاصی ارتعاش ایجاد می‌کنند که با شناسایی و پردازش آنها می‌توانیم عیوب ایجاد شده در تجهیزات را برطرف نماییم. در جدول شماره ۱ تعدادی از عیوب و فرکانس مربوط به آنها نشان داده شده‌اند. با این کار هزینه‌های ناشی از تعمیرات کاهش یافته و از تخریبهای ناگهانی جلوگیری می‌شود.

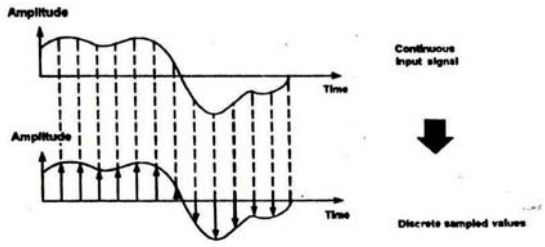
جدول ۱- تعدادی از عیوب و فرکانس شناسایی آنها

علت ایجاد عیب	فرکانس	علت ایجاد عیب	فرکانس
نابالانسی	N,2N,3N,…,nN	لقی مکانیکی	2N
خروج از مرکز روتور	N	آیرودینامیک	N,2N,3N,…,nN
خمیدگی شافت	N	سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای	N,2N,3N,…,nN

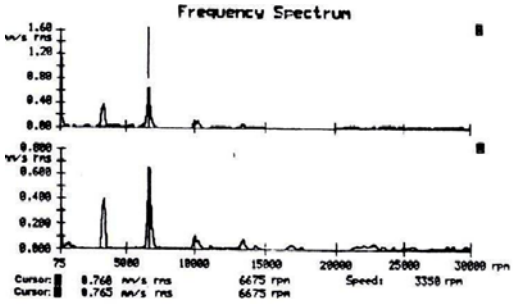
شکلها و نمودارها



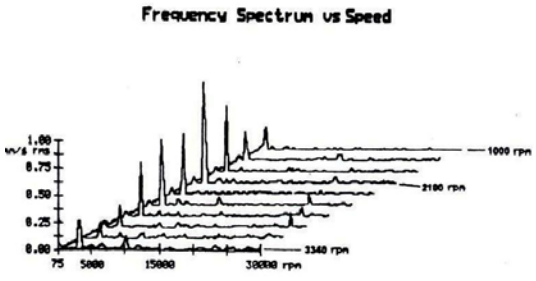
شکل ۱- طیف فرکانسی خصوصیات ماشین



شکل۲- نمونه برداری یک سیگنال در حوزه زمانی

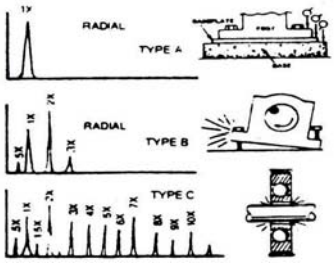


شکل ۳ الف- شناسایی علت ارتعاشات در یک کمپرسور بخار با استفاده از طیفهای ارتعاشی. اسپکترام فرکانسی وضعیت ارتعاشی را با کارکرد موتور نشان می‌دهد.

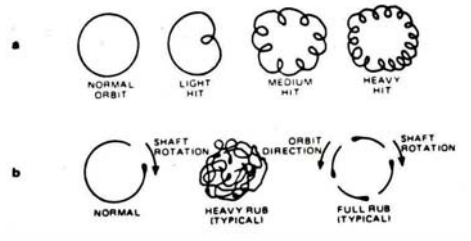


شکل ۳ب- نمودار آبشاری وضعیت ارتعاشی را در حالت خاموش شدن موتور و توقف ماشین نشان می‌دهد.

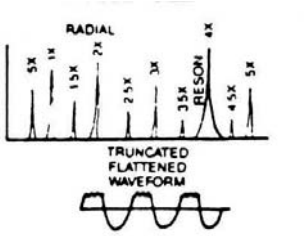
Archive of SID
www.SID.ir



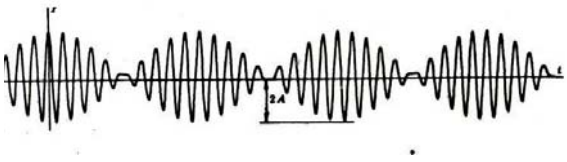
شکل ۴- طیف‌های مربوط به انواع لقی‌های مکانیکی



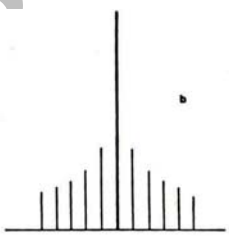
شکل۵- مدارهای سایش ضربه و جهش-مدارهای سایش کامل و شدید



شکل ۶- طیف مربوط به سایش روتور



شکل ۷- پدیده ضربان



شکل ۸- فرکانسهای باند جانبی

شکل۹- طیف مربوط به دندانه ترکدار- شکسته

مراجع

[۱]سیامک اسماعیل زاده خادم، محمد رضا نسرین امید خواه، ابوالفضل درویزه، تکنولوژی‌های نگهداری و تعمیرات و آنالیز ارتعاشی ماشین آلات، انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۸۰.

[2] Heinz P. Bloch, Improving Machinary Reliability, Vol. 1, Gulf Publishing Company, 1998.

[۳] هومن تمیزی، وحید رضایی، محمد اسماعیل خسروی، عیب یابی ماشین آلات دوار، پرس صانکو، ۱۳۸۱

[4] Mitchell, John S., An Introduction to Machinary Analysis and Monitoring, Mitchell Turbomachinary Consulting, San Juan Capistrano, California (Seminar Textbook).

[5]Zierau, S., Machinary Vibration Spectrum Analysis: A Blend of problem Solving and Advancement of Diagnostic Know-How, Petrotech Maintenance Symposium, Amesterdam, Netherlands, April, 1976.

[6]Heinz P. Bloch & Fred K. Geitner, Machinary Component Maintenance and Repair, Vol. 3, ELSEVIER, 2005

[۷] سیامک اسماعیل زاده خادم، محمد رضا نسرین امید خواه، ابوالفضل درویزه، بالانس فن‌های گریز از مرکز و عیب یابی ماشین آلات، انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۸۰.

[۸] علی حاج شیر محمدی، مجموعه مقالات اولین کنگره ملی نگهداری و تعمیرات (نت)، دانشگاه صنعتی اصفهان، شهریور ۱۳۷۳.

[۹]Yardly, E.D., Condition Monitoring Engineering The Practice, Professonal Engineering Publishing, 2002.

Archive of SID
www.SID.ir