ارتعاشات

شناسایی عیوب تسمه به کمک آنالیز ارتعاشات

سعید کردی زاده
شرکت مدیریت تولید برق منتظر قائم
kordizade.s@gmail.com

شرکت مدیریت تولید برق منتظر قائم
(سهامی خاص)

گروه خبری نتصا را به نشانی NetsaNews در صفحات مجازی دنبال کنید.

به دلیل ظرفیت بالای تسمه‌ها[1] در جذب شوک‌ها و ارتعاشات، در بسیاری از موارد، برای انتقال قدرت از تسمه‌ها استفاده می‌شود. تسمه‌ها به نیروهای دیگر ماشین مانند آنبالانسی، خارج از مرکزی، ناهم‌راستایی و لقی، واکنش نشان می‌دهند و ارتعاش می‌کنند. از آنجایی که ارتعاشات، حالت حرکت و شلاق‌زدن تسمه‌ها بین پولی‌ها به‌آسانی دیده می‌شود، ارتعاشات آنها بیشتر از قسمت‌های دیگر به چشم می‌آید. معمولاً اولین اقدام برای رفع مشکل ارتعاش، تعویض تسمه است؛ اما ارتعاشات تسمه، نشانه مشکل مکانیکی است و خود تسمه در پدیدآمدن آن نقشی ندارد. بنابراین قبل از تعویض تسمه، باید وضعیت ارتعاشات ماشین بررسی شود.

اگر قسمتی از تسمه را با رنگ علامت بزنیم، فرکانسی که این نقطه رنگ‌شده از برابر یک نقطه ثابت (مثلاً چشمان ما) می‌گذرد، فرکانس تسمه[2] (BR) تعریف می‌شود. فرکانس تسمه با داشتن طول تسمه[3]، قطر پولی[4] و دور پولی[5]، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Belt\ Frequency = \frac{\pi \times Pulley\ RPM \times Pitch\ Diameter}{Belt\ Lenght}$$

در صورت وجود عیب در تسمه، فرکانس ارتعاشات، مضرب صحیحی از فرکانس تسمه است. عیوب متداول تسمه‌ها شامل ترک‌خوردگی، برجستگی پهلوهای تسمه و کنده‌شدن قسمت‌هایی از تسمه است. برای مثال، تسمه‌ای که پهنای یکسان ندارد، در شیار پولی بالا و پایین می‌رود و تغییر کشش ایجادشده روی تسمه، ارتعاشات را افزایش می‌دهد.

بسته‌بندی و شرایط انبارداری نادرست، باعث می‌شود تسمه پیچ و تاب بخورد و شکل‌های نامناسبی پیدا کند. تا زمانی که تسمه به شکل واقعی‌اش بازنگردد، اگر از آنها استفاده کنیم، با ارتعاشاتی با دامنه بالا روبه‌رو می‌شویم. در سیستم‌های چندتسمه‌ای معروف به تسمه‌های چندردیفه، کشش همه تسمه‌ها باید یکسان باشد. اگر یکی از تسمه‌ها شل باشد، ولی کشش تسمه‌های دیگر خوب باشد، ارتعاش تسمه شل، از تسمه‌های دیگر بیشتر است. همچنین سرخوردن تسمه شل روی پولی، سرعت سایش این تسمه را بیشتر می‌کند. همه این مسایل، ارتعاشاتی را ایجاد می‌کنند که فرکانس ارتعاشی آن، مضرب صحیحی از فرکانس تسمه است.

برای اندازه‌گیری ارتعاشات سیستم پولی و تسمه، سنسور را در جهت عمود بر کشش[6] تسمه، روی بیرینگ نگهدارنده پولی‌ها قرار می‌دهیم و سپس، لرزش را در جهت موازی با کشش، اندازه می‌گیریم. معمولاً عیوب تسمه با اندازه‌گیری ارتعاش در جهت موازی با کشش تسمه، دامنه بزرگتری را در طیف فرکانسی ایجاد می‌کند.

حال به بررسی مسایل و مشکلاتی می‌پردازیم که ارتعاشات تسمه‌ها را افزایش می‌دهند.

تسمه‌های پوسیده، شل و نامناسب

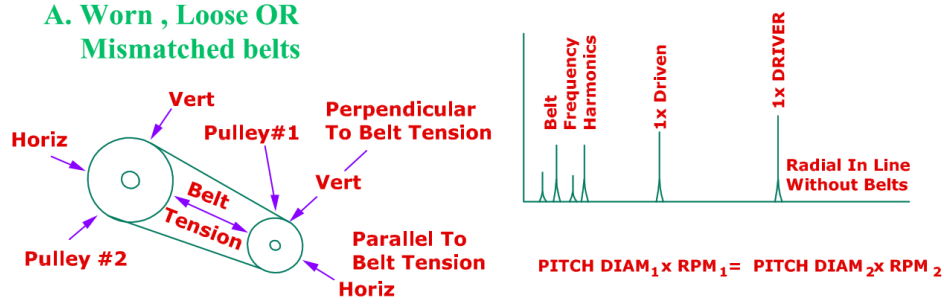
فرکانس تسمه (BR) همیشه از فرکانس ماشین محرک و ماشین متحرک کمتر است؛ اما وقتی تسمه ساییده، شل یا کهنه شود، قله شاخص دامنه ارتعاشات، معمولاً در 2BR اتفاق می‌افتد و 3BR و 4BR در نمودار طیف فرکانسی ایجاد می‌شوند. دامنه‌ها معمولاً ناپایدار هستند و گاهی با دور پولی محرک یا دور پولی متحرک، نوسان می‌کنند. از طرفی، ممکن است به دلیل فیلتر بالاگذر[7] اعمال‌شده روی دستگاه آنالایزر، این دستگاه، ارتعاشات فرکانس تسمه را فیلتر کند؛ اما وجود هارمونیک‌های فرکانس تسمه که فیلتر نشده‌اند، نشان‌دهنده این عیب هستند. لازم به ذکر است که مشاهده سیگنال حوزه زمان، به تشخیص پوسیدگی تسمه کمکی نمی‌کند؛ اما اگر تنها یک نقطه از تسمه آسیب دیده باشد، با هر بار دوران، یک ضربه در شکل موج زمانی ایجاد می‌شود.

1 Belt
2 Belt Rate
3 Belt Length
4 Pitch Diameter
5 Pulley RPM
6 Tension
7 High Pass Filter

در تسمه‌های دنده‌دار[8]، وقتی که شیارهای پولی‌ها ساییده شده یا پولی‌ها ناهم‌محور باشند، بیشترین دامنه ارتعاشات، روی فرکانس تایمینگ تسمه[9] نمایان می‌شود و معمولاً باعث سرخوردن تسمه می‌شود.

فرکانس تایمینگ تسمه، به کمک این رابطه محاسبه می‌شود:

$$\text{Timing Frequency} = \text{Belt Frequency} \times \text{Belt Teeth} = \text{Pulley RPM} \times \text{Pulley Teeth}$$



شکل ۱- تسمه‌های پوسیده، گشاد و نامناسب

سرخوردن تسمه

سرخوردن تسمه معمولاً به علت کم‌بودن کشش تسمه، ترازنبودن پولی‌ها، نامناسب‌بودن جنس تسمه و شیارهای پولی و یا بر اثر بار و قدرت بیش‌ازحد توان تسمه پدید می‌آید. با سرخوردن تسمه، ارتعاشات و صدایی با فرکانس بالا ایجاد می‌شود. دامنه ارتعاشات ناپایدار است و این ناپایداری، در سیستم‌های چندتسمه‌ای، بیشتر دیده می‌شود.

گاهی دامنه ارتعاشات بسته به شکل‌های مختلف سرخوردن تسمه، کم و زیاد می‌شود و نتیجه آن، ارتعاشاتی با دامنه متغیر است که در یک شکل پریودیک، کم و زیاد می‌شود. چراغ استربوسکوپ ابزار سودمندی برای تشخیص میزان سرخوردن تسمه‌های چند ردیفه است. بدین منظور، ابتدا ماشین را خاموش می‌کنیم و با یک تکه گچ، روی تمام تسمه‌ها، خط عرضی می‌کشیم. سپس ماشین را روشن و فرکانس فلش‌زنی چراغ استربوسکوپ را به گونه‌ای تنظیم می‌کنیم که خطی که با گچ کشیده بودیم، ثابت دیده شود. حال اگر تسمه‌ها نسبت به یکدیگر حرکت داشته باشند، خط کشیده‌شده روی تسمه‌ها نیز، نسبت به هم حرکت دارند. سیگنال حوزه زمان در تشخیص سرخوردن تسمه، به‌ویژه در مراحل اولیه، سودمند نیست.

شکل ۲ - شناسایی تسمه شل به کمک چراغ استربوسکوپ

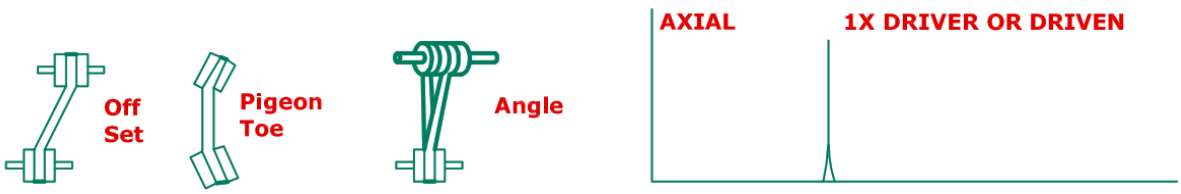
8 Timing Belt
9 Timing Frequency

گروه خبری نتصا را به نشانی NetsaNews در صفحات مجازی دنبال کنید.

ناهم‌راستایی پولی‌ها

ناهم‌راستایی پولی‌ها[10] ارتعاش قابل‌توجهی در فرکانس 1X و در جهت محوری ایجاد می‌کند. نسبت دامنه 1X پولی محرک[11] که معمولاً الکتروموتور است، به دامنه 1X پولی متحرک[12] که معمولاً فن است، به محل اندازه‌گیری و سختی شاسی بستگی دارد. به عبارت دیگر، در 1X پولی محرک و یا 1X پولی متحرک، بسته به اینکه سازه نگهدارنده کدام قسمت ضعیف‌تر است، دامنه بزرگ‌تری دارد.

اگر ماشین عیب دیگری نداشته باشد، سیگنال حوزه زمان در ناهم‌راستایی تسمه و پولی، سینوسی‌شکل است. همچنین زاویه فاز اندازه‌گیری‌شده در جهت محوری پولی محرک با پولی متحرک، ۱۸۰ درجه اختلاف دارد.

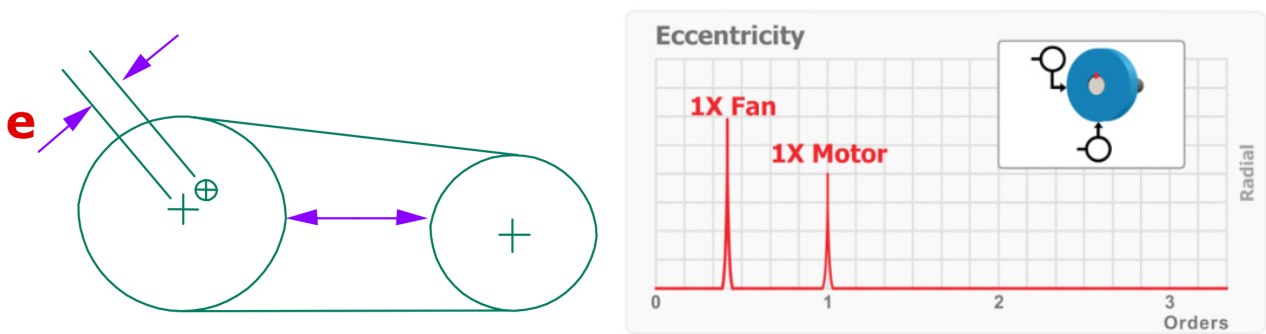


شکل ۳ - ناهم‌محوری تسمه و پولی

پولی خارج از مرکز

پولی‌های خارج از مرکز[13]، دامنه 1X متعلق به همان پولی خارج از مرکز را افزایش می‌دهند و بیشترین دامنه معمولاً در جهت طولی تسمه است. همچنین روی هر دو پولی محرک و متحرک و نیز بیرینگ‌های نگهدارنده این پولی‌ها، ارتعاش با این فرکانس دیده می‌شود. خارج از مرکزی پولی، با اندازه‌گیری زاویه فاز تایید می‌شود. در این شرایط، اختلاف فاز افقی و عمودی صفر یا ۱۸۰ درجه است.

ارتعاش پولی‌های خارج از مرکز را می‌توان با افزودن واشر به پیچ‌های قفل‌کن پولی و بالانس، کاهش داد. با این‌حال، خارج از مرکزی پولی تنش‌های خستگی معکوس را روی تسمه ایجاد می‌کند و تسمه فرسوده می‌شود.

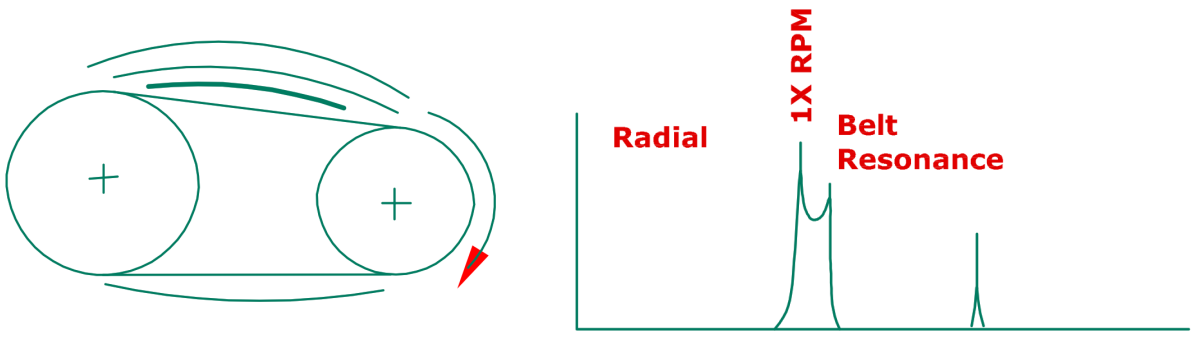


شکل ۴- پولی خارج از مرکز

10 Pulley Misalignment
11 Driver
12 Driven
13 Eccentric Pulley

رزونانس تسمه

اگر فرکانس طبیعی تسمه، بر سرعت دورانی محرک یا متحرک، منطبق یا به آنها نزدیک باشد، تسمه دچار رزونانس می‌شود و ارتعاشات زیادی ایجاد می‌کند. رزونانس تسمه[14] می‌تواند ارتعاشات روی فرکانس طبیعی تسمه و فرکانس دور هر دو پولی را افزایش دهد.



شکل ۵- رزونانس تسمه

برای تشخیص این عیب به کمک دستگاه آنالایزر ارتعاشات، باید به تغییرات دامنه ارتعاشات 1X، در زمان دوردادن ماشین توجه کنیم. اگر هنگام دور دادن ماشین و رسیدن به دور نامی، دامنه 1X به طور ناگهانی افزایش یابد، به احتمال زیاد فرکانس طبیعی تسمه و دور ماشین، بر هم منطبق شده‌اند. همچنین می‌توانیم با استفاده از چراغ استربوسکوپ، فرکانس فلش‌زنی را به‌گونه‌ای تنظیم کنیم که پولی‌ها، ثابت دیده شوند. در این حالت، می‌توانیم بال‌بال‌زدن[15] تسمه را در فرکانس طبیعی خودش، مشاهده کنیم. شکل موج در حوزه زمان، در تشخیص این عیب به‌ویژه در مراحل اولیه، کارایی ندارد.

ضربان تسمه

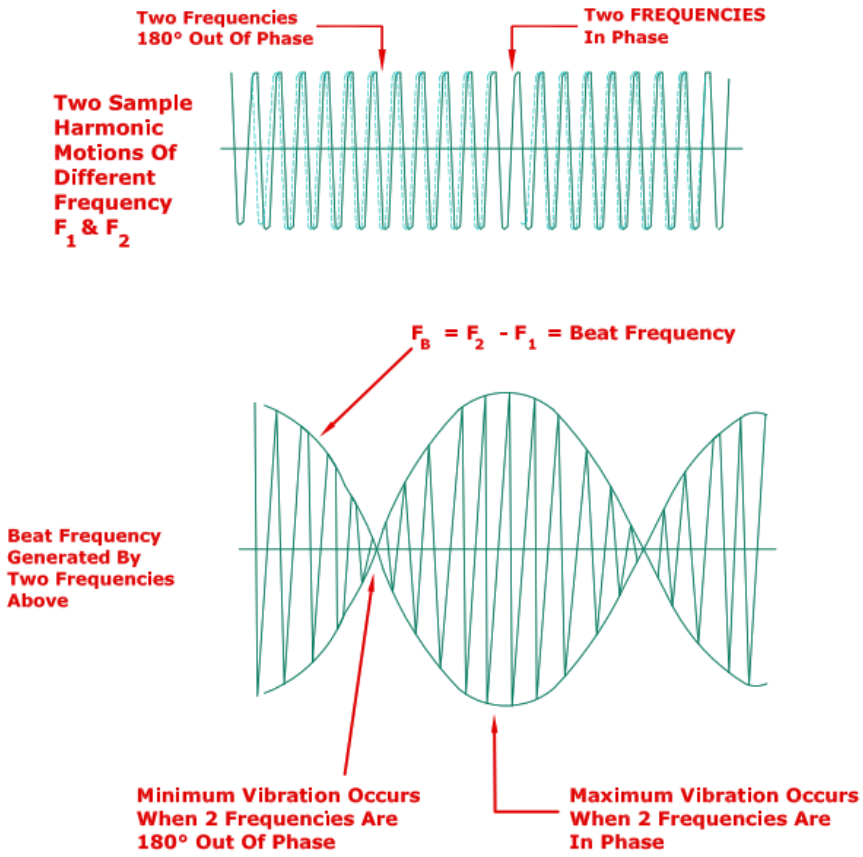
همان گونه که در فصل تکنیک‌های عیب‌یابی صحبت کردیم، پدیده ضربان، پیامد وجود هم‌زمان دو سیگنال ارتعاشی، با فرکانس‌های نزدیک به یکدیگر است که به صورت پریودیک، با هم جمع یا از هم کم می‌شوند. از این رو، فرکانس ضربان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_B = F_2 - F_1$$

F_1 فرکانس سیگنال اول، F_2 فرکانس سیگنال دوم و F_B فرکانس ضربان است. ارتعاشات ضربانی به کمک شکل موج زمانی، به‌آسانی تشخیص داده می‌شود. قسمت بالای شکل ۲۴، دو موج را با فرکانس‌های F_1 و F_2 به صورت جداگانه و تصویر پایین، حاصل ترکیب آن دو را نشان می‌دهد. بیشترین ارتعاش زمانی اتفاق می‌افتد که شکل موج زمانی فرکانس F_1، با فرکانس F_2 هم‌فاز شود و کمترین ارتعاش نیز زمانی پدید می‌آید که بین دو سیگنال، ۱۸۰ درجه اختلاف فاز وجود داشته باشد.

14 Belt Resonance
15 Flapping

گروه خبری نتسا را به نشانی NetsaNews در صفحات مجازی دنبال کنید.



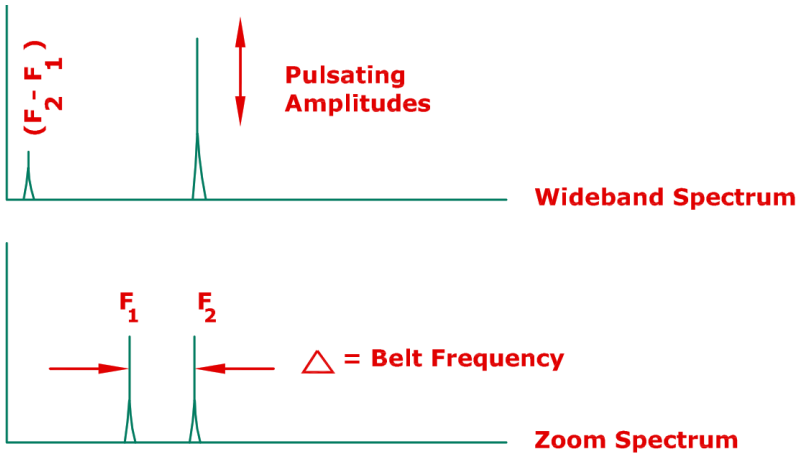
شکل ۶- سیگنال حوزه زمان ضربان تسمه

اگرچه این نوع ارتعاش با تحلیل فرکانسی مشخص می‌شود، اما به استفاده از رزولوشن بالای دستگاه آنالایزر ارتعاشات نیاز دارد. پاسخ ارتعاشی سیستم که سنسور اندازه‌گیری می‌کند، معمولاً پیوسته است. حال آنکه در هنگام ذخیره سیگنال روی کامپیوتر، پاسخ ارتعاشی به صورت گسسته ذخیره می‌شود. گسسته‌سازی سیگنال ارتعاشات، بر اساس تنظیمات آنالایزر ارتعاشات صورت می‌گیرد. یکی از پارامترهای گسسته‌سازی، رزولوشن[16] است. با افزایش رزولوشن، تعداد خطوط فرکانسی [17] و دقت سیگنال ثبت‌شده در حوزه فرکانس، افزایش می‌یابد. از طرفی، در صورت اندازه‌گیری با نرخ نمونه‌برداری ثابت، برای افزایش خطوط فرکانسی لازم است تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری‌شده نیز، افزایش یابد. این موضوع زمان اندازه‌گیری و هزینه‌های ذخیره داده‌ها را افزایش می‌دهد. از این رو، معمولاً برای اندازه‌گیری ارتعاشات، سیگنال رزولوشن متوسطی در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل، گسسته‌سازی سیگنال سبب می‌شود که بعضی از فرکانس‌ها، مضارب صحیحی از خطوط فرکانسی نباشند. در این شرایط، انرژی سیگنال بین نقاط قبل و بعد فرکانسی تقسیم می‌شود که بر خطوط فرکانسی منطبق است. بنابراین این نگرانی هست که در طیف فرکانسی، فرکانس با بیشترین دامنه، بر فرکانس واقعی منطبق نباشد و فرکانس و دامنه متناظر آن، اشتباه خوانده شوند. از این رو، به خاطر نزدیک‌بودن مقادیر F_1 و F_2، لازم است که رزولوشن دستگاه در زمان داده‌برداری، افزایش داده شود.

برای تشخیص از راه شکل موج زمانی، محور زمان باید به اندازه کافی، طولانی در نظر گرفته شود. به‌ویژه هنگامی که فرکانس دو موج ارتعاشی به یکدیگر بسیار نزدیک باشد، پریود ضربان زیاد می‌شود و این موضوع باید در تنظیمات دستگاه آنالایزر، لحاظ شود. یکی دیگر از مشخصه‌های ضربان، زاویه فاز نوسانی و ناپایدار است.

16 Resolution
17 Frequency Line

رایج‌ترین حالت برای ارتعاشات ضربانی، مواقعی است که دو ماشین با سرعت کاری تقریباً یکسان و با فاصله کمی از یکدیگر، در حال کار باشند. پدیده ضربان در الکتروموتورهای دو قطب، بیشتر گزارش شده است. اگر در موتور دو قطب، عیبی مانند ناهم‌راستایی یا هر اشکالی با مشخصه ارتعاشی 2X وجود داشته باشد و هم‌زمان، ارتعاشات دو برابر فرکانس برق یا $2f_L$ نیز به علت اشکال الکتریکی پدید آید، چون سرعت کاری این موتورها اندکی کمتر از 50 Hz است، فرکانس 2X و $2f_L$ به یکدیگر نزدیک می‌شوند و طیف باند پهن، معمولاً یک قله با نوسان را نشان می‌دهد. اگر این قله بزرگنمایی شود (طیف پایین)، این دو قله بسیار نزدیک به هم دیده می‌شوند.



شکل ۷- طیف فرکانسی ضربان در موتور دو قطبی با عیب ناهم‌راستایی

اختلاف این دو قله (F_1–F_2) فرکانس ضربان است که در طیف پهن ظاهر می‌شود. فرکانس ضربان معمولاً در محدوده فرکانس اندازه‌گیری عادی، دیده نمی‌شود؛ زیرا ذاتاً فرکانس پایینی دارد و محدوده آن، معمولاً حدود 0/08 Hz تا 66/1 Hz است.

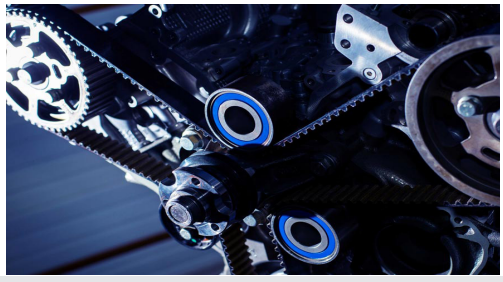
منابع و مراجع

[1] Ahmed, Hosameldin, and Asoke K. Nandi. Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines. John Wiley & Sons, 2020.

[2] ISO 17359: condition monitoring and diagnostics of machines - general guidelines.

[3] ISO 20816-1: mechanical vibration - evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - part 1: general guidelines and appendix ISO 20816-1/amd.1.

[4] بهزاد، مهدی و سپانلو، کیوان و آسایش، مسعود و روحانی‌بسطامی، عباس، «اصول و مبانی ارتعاشات در نگهداری، تعمیرات و عیب‌یابی ماشین‌های دوار»، انتشارات شرکت ملی صنایع پتروشیمی ۱۳۸۶.



گروه خبری نتصا را به نشانی NetsaNews در صفحات مجازی دنبال کنید.