

تحلیل لرزش در ماشین‌های دوار

نگارش:

وحید زارع - رییس خدمات مهندسی نگهداری و تعمیرات

شرکت بهره برداری نفت و گاز کارون

با توجه به نقش ماشین‌آلات در صنایع نفت و گاز، روش‌های پایش و آنالیز وضعیت کارکرد آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از این روش‌ها تحلیل لرزش است. از آنجایی که حالت‌های خرابی دارای مشخصه‌ی فرکانسی متفاوتی هستند که می‌توان آن‌ها را از هم جدا و شناسایی کرد از این رو ارزیابی پارامتر لرزش نسبت به روش‌های دیگر کارایی بیشتری داشته و در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد.

همان‌طوری که می‌دانید تمامی ماشین‌های دوار دارای ارتعاش هستند، و این ارتعاش‌ها حدود استاندارد دارند^۱. بروز عیوب مختلف در ماشین‌آلات یا عدم رعایت مقادیر مجاز و استاندارد در کارهای تعمیراتی باعث می‌شود مقدار ارتعاش افزایش یافته و به تبع آن قطعات دچار خرابی شوند و خسارات جبران‌ناپذیری را به وجود آورند. برای هر پدیده علتی است و هر علتی را معلولی، و برخی از علل ایجاد ارتعاش در ماشین‌آلات عبارتند از:

- ناهم‌محوری اجزا (کوپلینگ‌ها)
- نابالانسی قطعات ماشین
- عدم فونداسیون مناسب جهت استقرار تجهیزات (الکتروموتورهای بزرگ)
- خوردگی و فرسایش قطعات
- لق شدن پیچ و مهره‌ها و اجزای نگهدارنده‌ی ماشین در محل استقرار خود
- وجود هارمونیک‌های فرد به دلایل مختلف از جمله پایین بودن کیفیت تأمین و توان انرژی

الکتریکی

- عدم بهره‌برداری صحیح از دستگاه

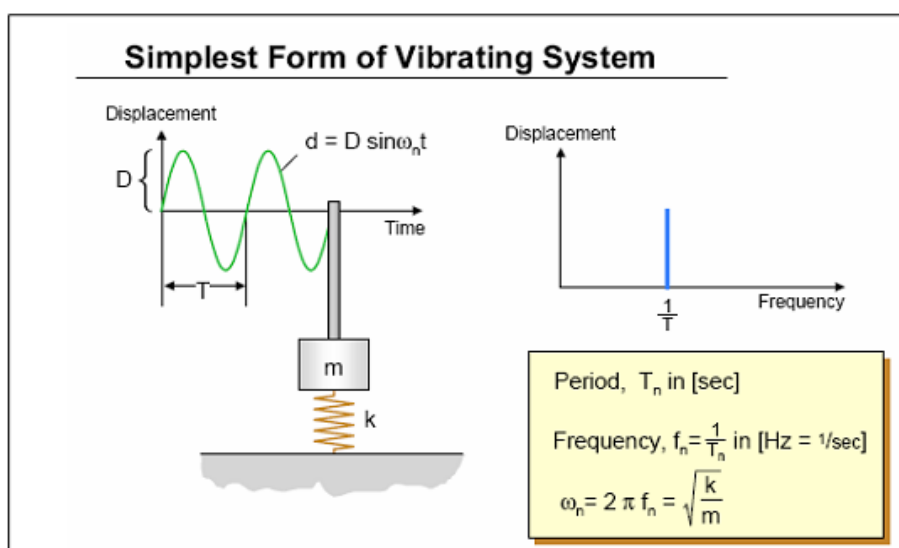
^۱. در این راستا به استاندارد ISO : 10816 مراجعه کنید.

۱. ارتعاش

ارتعاش به نوعی از حرکت سامانه‌های دینامیکی اطلاق می‌شود که به صورت نوسانی صورت پذیرفته و حرکت در یک پریود زمانی تکرار شود. به عبارت ساده‌تر ارتعاش، نوسان مکانیکی نسبت به یک موقعیت مرجع است، که مقدار آن بیانگر پارامتری از حرکت یک سامانه‌ی مکانیکی است.

این نوع حرکت را در ساده‌ترین شکل می‌توان با یک جرم و یک فنر شبیه‌سازی کرد. با القای یک تغییر مکان اولیه به جرم متصل به فنر و رها کردن آن، حرکت نوسانی رخ می‌دهد که می‌توان دامنه‌ی آن را به کمک یک تابع سینوسی بیان نمود.

$$x = A \sin(\omega t + \varphi)$$



شکل ۱. حرکت جرم و فنر

ویژگی‌های مهم حرکت ارتعاشی عبارتند از:

- دامنه^۲، که معیاری از شدت ارتعاش است. از اشکالی که برای بیان دامنه بکار می‌رود می‌توان به مقدار دامنه و اندازه‌ی مؤثر اشاره کرد.

مقدار دامنه برای مشخص کردن سطح شوک‌های کوتاه مدت مناسب می‌باشد؛ اما سابقه‌ی زمانی موج به حساب نمی‌آید. وقتی خرابی‌های کوچکی روی ساچمه، غلتک و شیارهای^۳ خارجی و داخلی یاتاقان‌ها ایجاد می‌شود پالس‌های ارتعاشی فرکانس بالایی ایجاد می‌شود که به وسیله‌ی آشکارساز دامنه^۴ آشکار می‌شوند.

^۲ Peak

^۳ race, roller, ball

^۴ Peak Detector

در مراحل اولیه‌ی خرابی، این ارتعاشات به وجود آمده، انرژی بالایی ندارند و شاخص انرژی ارتعاش (RMS) تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند ولی دامنه به اندازه کافی افزایش می‌یابد. مقدار مؤثر شاخص انرژی ارتعاش (RMS) جذر مجموع مربعات مقادیر دامنه‌های مستقل می‌باشد:

$$(Root\ Mean\ Square)\ R.M.S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = 0.707 Peak$$

نسبت **0.707** بین RMS و دامنه‌ی تنها در موج سینوسی ساده صادق است و در موج‌های پیچیده صدق نمی‌کند. به عبارت دیگر RMS میانگین‌گیری دامنه‌ی خطوط یک طیف مستقل در طی مدت زمان معین است. شاخص انرژی ارتعاش یا RMS رایج‌ترین اندازه‌گیری دامنه است؛ زیرا هم سابقه‌ی زمانی موج را به حساب می‌آورد و هم مقدار دامنه‌ای که مستقیماً مرتبط با مقدار انرژی است را به دست می‌دهد و بنابراین قابلیت مخرب بودن ارتعاش را نشان خواهد داد. هر تغییری در ارتعاش، باعث تغییر در RMS به طور مشخص می‌شود، اما تغییر Peak-to-Peak قابل پیش بینی نیست.

- فرکانس، که معیاری از نرخ حرکت در واحد زمان است:

$$Frequency = 1/T \quad (\text{In Cycle per Second or Hertz})$$

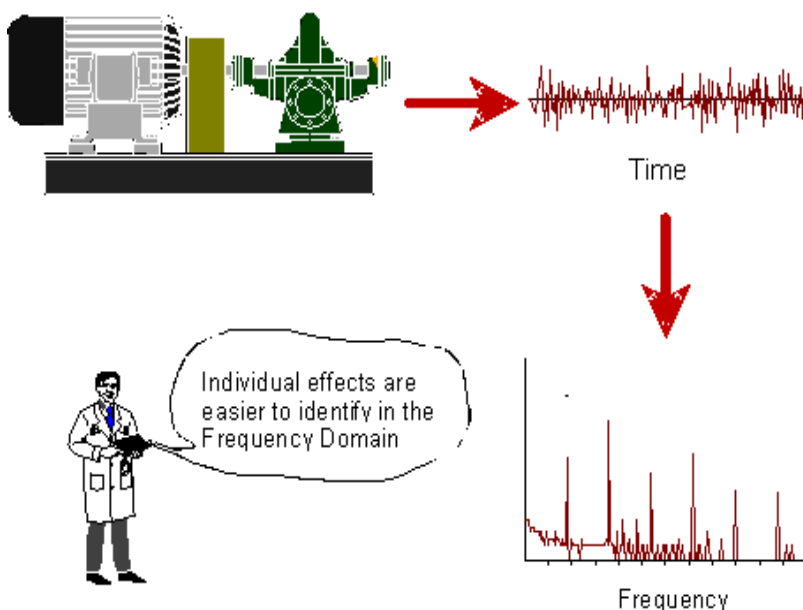
فرکانس به شکل دیگر هم نشان داده می‌شود:

$$60 \times \text{Freq. (Hz)} = \text{RPM} = \text{دور بر دقیقه}$$

- فاز، که توالی حرکت را نسبت به یک مرجع مشخص می‌سند.

اگر ارتعاش در فواصل زمانی معینی اتفاق بیفتد آن را لرزش متناوب می‌گویند.

ارتعاشات متناوب در دو حوزه‌ی زمانی (یعنی در طول مدت زمان تناوب) و حوزه‌ی فرکانسی نمایش داده



می‌شود. در عمل به دلیل امکان بررسی اجزای و مقادیر لرزش در فرکانس‌های مختلف ارتعاشات را در حوزه فرکانس نشان می‌دهند که اصطلاحاً به آن طیف لرزش^۵ می‌گویند.

شکل ۲. نمایش ارتعاشات متناوب در حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی فرکانس

^۵ Vibration Spectra

براساس بسط سری فوریه، هر موج متناوب را می‌توان به یک سری از ارتعاش‌های هارمونیک با دامنه و فاز مستقل تجزیه کرد. این اصلی است که برای تبدیل سیگنال‌ها از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس استفاده می‌گردد و به همین دلیل منحنی فرکانس (طیف فرکانسی) سیگنال لرزش را FFT^۶ نیز می‌نامند.

معمولاً ارتعاش اندازه‌گیری شده از روی ماشین، یک سیگنال پیچیده و ترکیبی از چندین سیگنال ارتعاشی با فرکانس‌های مختلف است. تحلیل فرکانسی که به آن آنالیز FFT یا اسپکتروم نیز گفته می‌شود، یک فرآیند پردازش سیگنال است که به کمک آن محتوای فرکانسی سیگنال ارتعاشی به دست می‌آید. برای به دست آوردن منحنی طیف فرکانسی از الگوریتم FFT یا تبدیل فوریه سریع استفاده می‌گردد. به همین دلیل به منحنی فرکانسی گاهی اوقات منحنی FFT نیز گفته می‌شود.

در منحنی‌های FFT، محور افقی فرکانس و محور عمودی دامنه ارتعاش را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، در بسیاری از عیوب، فرکانس ارتعاش ایجاد شده با دور ماشین ارتباط دارد و در واقع هارمونیک‌ها و یا به عبارت دیگر مضارب صحیحی از دور ماشین در منحنی FFT دیده می‌شود. این مضارب را به شکل‌های 1xRPM، 2xRPM، 3xRPM و ... نشان می‌دهند.

۱.۱. آنالیز فرکانسی و جداول عیب‌یابی

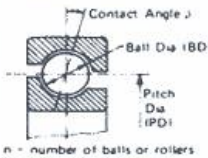
برای آن که تحلیل‌گر بتواند از طیف فرکانس برداشت درستی داشته باشد لازم است برای سؤالات زیر پاسخ مناسبی پیدا کند:

- در چه فرکانس‌هایی لرزش زیاد است و رابطه‌ی فرکانس‌ها با دور ماشین چیست (آیا فرکانس یک برابر، دو برابر و یا ضریبی از دور ماشین است)؟
- حداکثر لرزش اندازه‌گیری شده در هر فرکانس چقدر است؟
- رابطه‌ی فرکانس‌های با دامنه‌ی زیاد با یکدیگر چگونه است؟ آیا لرزش در دو برابر دور بیش از لرزش در یک برابر دور است؟ دامنه‌ی ارتعاش در چه فرکانسی زیاد است؟ ...

مهم‌ترین کار در فرآیند ارتعاش سنجی و آنالیز، تخصیص دادن^۷ فرکانس‌های مختلف در طیف ارتعاشی به اجزا و قطعات مختلف ماشین یا به عیوب متفاوت است. برای راحتی کار جداول عیب‌یابی تهیه شده است که می‌توان برای آنالیز فرکانسی از آن‌ها استفاده کرد.

^۶ FFT=Fast Fourier Transformation

^۷ Assign

Nature of Fault	Frequency of Dominant Vibration (Hz=rpm/60)	Direction	Remarks
Rotating Members out of Balance	1 x rpm	Radial	A common cause of excess vibration in machinery
Misalignment & Bent Shaft	Usually 1 x rpm Often 2 x rpm Sometimes 3&4 x rpm	Radial & Axial	A common fault
Damaged Rolling Element Bearings (Ball, Roller, etc.)	Impact rates for the individual bearing component* Also vibrations at high frequencies (2 to 60 kHz) often related to radial resonances in bearings	Radial & Axial	Uneven vibration levels, often with shocks. *Impact Rates:  For Outer Race Defect f(Hz) = $\frac{n}{2} f_r (1 + \frac{BD}{PD} \cos \phi)$ For Inner Race Defect f(Hz) = $\frac{n}{2} f_r (1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi)$ For Ball Defect f(Hz) = $\frac{PD}{BD} f_r \left[1 + \left(\frac{BD}{PD} \cos \phi \right)^2 \right]$ n = number of balls or rollers f _r = relative rev/s between inner & outer races
Journal Bearings Loose in Housings	Sub-harmonics of shaft rpm, exactly 1/2 or 1/3 x rpm	Primarily Radial	Looseness may only develop at operating speed and temperature (eg. turbomachines).
Oil Film Whirl or Whip in Journal Bearings	Slightly less than half shaft speed (42% to 48%)	Primarily Radial	Applicable to high-speed (eg. turbo) machines.

جدول (۱) جدول عیب یابی

Hysteresis Whirl	Shaft critical speed	Primarily Radial	Vibrations excited when passing through critical shaft speed are maintained at higher shaft speeds. Can sometimes be cured by checking tightness of rotor components.
Damaged or worn gears	Tooth meshing frequencies (shaft rpm x number of teeth) and harmonics	Radial & Axial	Sidebands around tooth meshing frequencies indicate modulation (eg. eccentricity) at frequency corresponding to sideband spacings. Normally only detectable with very narrow-band analysis.
Mechanical Looseness	2 x rpm		Also sub and interharmonics, as for loose Journal bearings
Faulty Belt Drive	1, 2, 3 & 4 x rpm of belt	Radial	
Unbalanced Reciprocating Forces and Couples	1 x rpm and/or multiples for higher order unbalance	Primarily Radial	
Increased Turbulence	Blade & Vane passing frequencies and harmonics	Radial & Axial	Increasing levels indicate increasing turbulence
Electrically Induced Vibrations	1 x rpm or 1 or 2 times synchronous frequency	Radial & Axial	Should disappear when turning off the power

جدول (۲) جدول عیب یابی

۲.۱. ارتعاش در ماشین‌آلات دوار

به طور کلی دو نوع نیروی استاتیکی و دینامیکی در ماشین‌آلات وجود دارد. ارتعاش نتیجه‌ی نیروهای دینامیکی ماشین‌هایی است که قطعات متحرک دارند. البته قطعات مختلف ماشین با فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلفی ارتعاش می‌کنند که بر اثر وجود خرابی از مقادیر مجاز تجاوز می‌کنند. برخی از زمینه‌های بروز لرزش (اختلاف از حالت ایده‌آل) عبارتند از:

- اشکال در نصب اولیه
- اشکالات بهره‌برداری
- بروز اشکالات در حین تعمیرات

از آن جایی که رسیدن به حالت ایده‌آل امکان‌پذیر نیست، همیشه تا حدی ارتعاش در ماشین‌آلات وجود دارد که مجاز شمرده می‌شود. اما با گذشت زمان و بر اثر بروز اشکالات بعدی، بعضاً ارتعاشات نسبت به حد مجاز افزایش می‌یابد که با آنالیز و انجام اقدام اصلاحی مناسب، می‌توان وضعیت را به حالت قبل برگرداند.

رابطه‌ی زیر میزان ارتعاش ماشین را تعیین می‌کند:

$$\text{Vibration} = \text{Vibratory Force} / \text{Impedance}$$

همان‌طوری که در بالا به آن اشاره شد نیروهای ارتعاش‌زا^۸ در داخل ماشین و معمولاً توسط بخش در حال دوران تولید می‌شوند مانند:

- نیروهای الکترومغناطیسی
- تماس قطعات متحرک و ثابت
- اصطکاک

امپدانس از مشخصات هر سامانه‌ی مکانیکی و از جمله ماشین‌آلات دوار است و مسیر انتقال ارتعاش را توصیف می‌کند. مقاومت مکانیکی در برابر حرکت، از ویژگی‌های هر سامانه‌ی مکانیکی است.

برخی عوامل بدون این که از خود نیرویی تولید کنند و تنها از طریق تأثیر بر امپدانس، منجر به تشدید ارتعاش می‌شوند. مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- لقی مکانیکی
- تحریک فرکانس‌های طبیعی اجزا^۹
- ضعف در فونداسیون و یا شاسی ماشین‌آلات
- ضعیف بودن سازه^{۱۰}

به طور کلی با توجه به مکانیزم کاری، ارتعاشات مکانیکی در قالب سه نوع اندازه‌گیری می‌شود:

^۸ . Vibratory Forces

^۹ . Resonance

^{۱۰} . Structure

- جابجایی ارتعاش^{۱۱}: عبارت است از میزان انحراف نقطه‌ی اندازه‌گیری شده از موقعیت سکون/اولیه خود؛ واحد اندازه‌گیری آن در استانداردهای صنعتی میلی‌متر و یا میلز^{۱۲} می‌باشد. این نوع لرزش توسط حسگرهای از نوع جریان گردابی^{۱۳} اندازه‌گیری می‌شود.
- سرعت ارتعاش^{۱۴}: عبارت است از میزان سرعت حرکت نقطه‌ی اندازه‌گیری شده^{۱۵} حول نقطه‌ی موقعیت سکون/اولیه؛ واحد اندازه‌گیری آن در استانداردهای صنعتی mm/sec و یا inch/sec می‌باشد.
- شتاب ارتعاش^{۱۶}: عبارت است از میزان شتاب حرکتی نقطه‌ی اندازه‌گیری شده حول نقطه‌ی سکون/اولیه؛ واحد اندازه‌گیری آن در استانداردهای صنعتی mm/sec² و یا g^{۱۷} می‌باشد. اگر فرض کنیم که لرزش یک سیگنال هارمونیک ساده باشد می‌توانیم روابط زیر را بنویسیم:

Displacement: $x = A \sin \omega t$, **Velocity:** $v = dx/dt = A\omega \cos \omega t$, **Acceleration:**

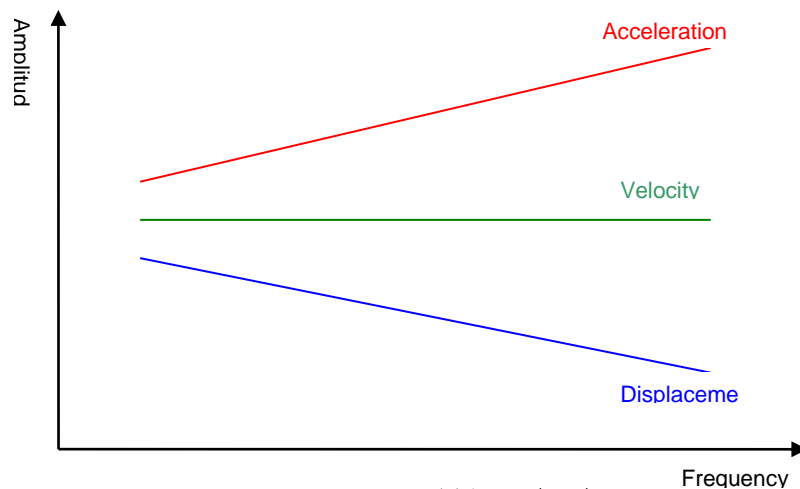
$$a = dv/dt = -A\omega^2 \sin \omega t$$

= $A\omega$ (Velocity amplitude) دامنه سرعت

= A دامنه جابجایی $f =$ فرکانس ارتعاش
 = $(A\omega^2)$ (Acceleration amplitude) دامنه‌ی شتاب

با توجه به روابط بالا می‌توانیم بنویسیم:

Displacement amplitude = $Velocity/\omega$; Acceleration amplitude = $Velocity \times \omega$



تغییرات دامنه و فرکانس

شکل ۲.

با توجه به شکل ۲ نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱. تغییرات دامنه‌ی سرعت در محدوده‌ای از فرکانس یک خط راست است.

^{۱۱} . Vibration displacement

^{۱۲} Mils=10⁻⁶ inch

^{۱۳} . Eddy Current

^{۱۴} . Vibration velocity

^{۱۵} . Measured point

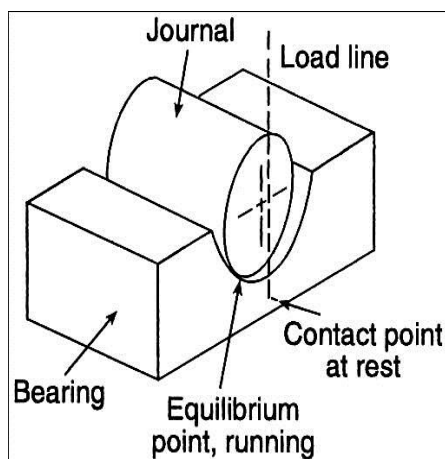
^{۱۶} . Vibration acceleration

^{۱۷} g=9.81 m/sec²

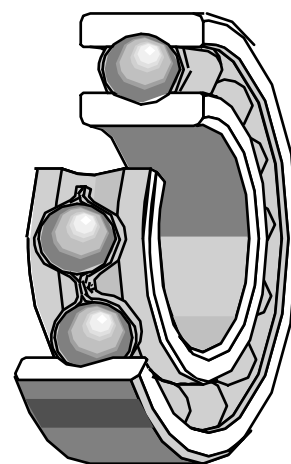
۲. میزان دامنه‌ی شتاب با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر میزان لرزش شتاب در فرکانس‌های پایین تضعیف می‌شود و از این رو می‌توان گفت که اندازه‌گیری شتاب برای فرکانس‌های پایین اطلاعات کاملی برای تحلیل ارائه نمی‌دهد.
۳. میزان دامنه‌ی لرزش جابجایی در فرکانس‌های بالا تضعیف می‌شود. از این رو می‌توان گفت که اندازه‌گیری لرزش جابجایی برای فرکانس‌های بالا اطلاعات کاملی برای تحلیل ارائه نمی‌دهد.

۲. انواع ارتعاش

معمولاً در ماشین‌آلات دوار دو نوع یاتاقان مورد استفاده قرار می‌گیرد: یاتاقان غلتشی/لغزشی و یاتاقان ژورنال.



شکل ۴. یاتاقان ژورنال

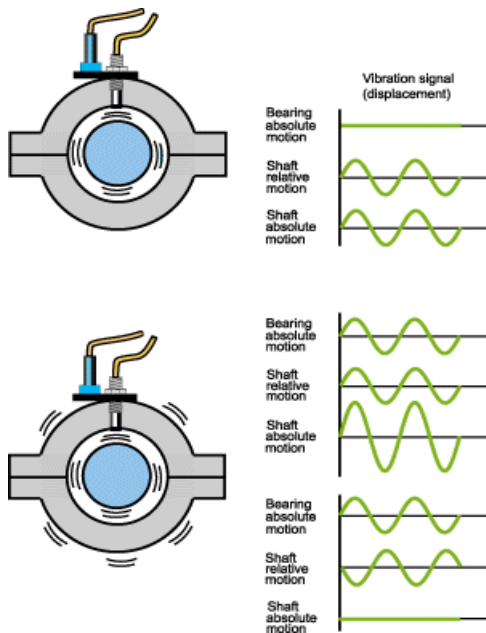


شکل ۳. یاتاقان غلتشی

نیروها و ارتعاشات به وسیله‌ی اجزای غلتشی در یاتاقان‌های غلتشی (ضد اصطکاکی) یا فیلم روغن در یاتاقان‌های ژورنال به محفظه‌های یاتاقان‌ها و از آن جا به فونداسیون ماشین منتقل می‌گردد.

معمولاً سه نوع لرزش روی ماشین‌ها اندازه‌گیری می‌گردد:

- ارتعاشات مطلق یاتاقان^{۱۸}: عبارت است از حرکات بدنه/پوسته نسبت به یک نقطه‌ی ثابت در فضا. در این حالت، میزان لرزش یاتاقان یا تا آن‌جا که ممکن است به یاتاقان‌ها نزدیک باشد اندازه‌گیری می‌شود و معمولاً توسط حسگرهای لرزش سرعت و شتاب اندازه‌گیری می‌شود.
- ارتعاشات نسبی محور^{۱۹}: عبارت است از حرکات محور دوران نسبت به محلی که المان اندازه‌گیری نصب شده است. این ارتعاش در ماشین‌هایی که دارای یاتاقان‌های ژورنال^{۲۰} هستند کاربری دارد.
- وجود لایه‌ی روغن بین محور دوران و یاتاقان باعث میرایی^{۲۱} سیگنال لرزش می‌شود. از این رو در این وضعیت حسگرهای غیرتماسی^{۲۲} نسبت به تماسی کاربری بیشتری دارند.
- ارتعاشات مطلق محور دوران: عبارت است از حرکات سریع محور دوران نسبت به نقطه‌ی ثابت در فضا،



شکل ۵. نمایش سه نوع ارتعاشات

ادامه دارد: مبحث بعدی «آشنایی با حسگرهای لرزش»

منابع:

1. Introduction to machinery analysis and monitoring ,By Mitchell,1993
2. Machinery vibration measurement and analysis, By Wowk,1991
3. Machine diagnosis -Schenck manual

^{۱۸} . Absolute Bearing Vibration

^{۱۹} . Relative Shaft Vibration

^{۲۰} . Sleeve Bearing

^{۲۱} . damping

^{۲۲} . Non-Contact

