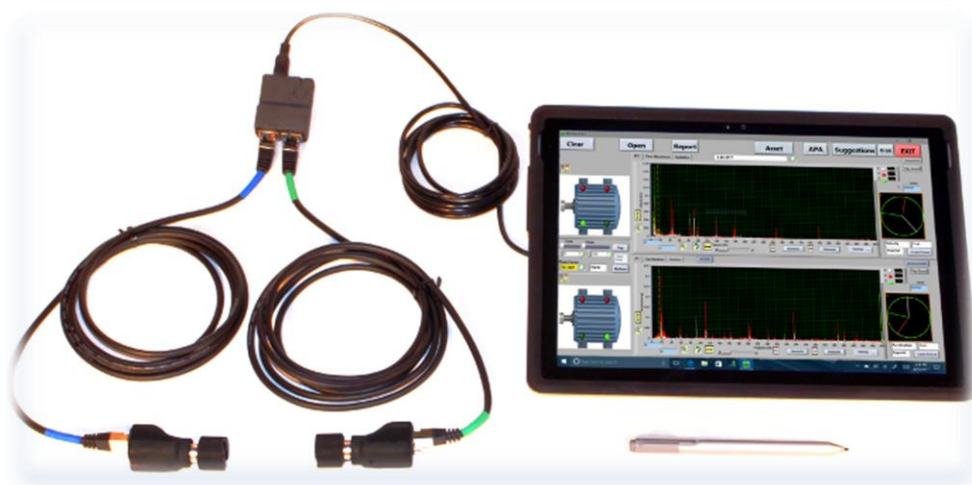


بررسی روش‌های جدید عیب‌یابی ماشین‌های دوار نیروگاهی با آنالیز ارتعاشات



مدیر پروژه: مهدی آقا امینی
واحد مجری: گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی



بررسی روش‌های جدید عیب‌یابی ماشین‌های دوار نیروگاهی با آنالیز ارتعاشات

مدیر پروژه: مهدی آقا امینی

گروه پژوهشی پشتیبان: گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی

واحد مجری: گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

خردادماه ۱۴۰۰

کد ثبت گزارش: NRI-ER-903-PMEPN39-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.334

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی
بررسی روش‌های جدید عیب‌یابی ماشین‌های دوار نیروگاهی با آنالیز ارتعاشات/ مدیر پروژه: مهدی آقا امینی.
کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۱۴۵ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. مدیر واحد مجری: توکلی، احسان. ۲. گروه پشتیبان: گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی.
۳. محور طراحی کاربردی مکانیکی



انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir



پژوهشگاه نیرو

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

پیوست:

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب **مهدی آقامینی**، مدیر پروژه "**بررسی روش‌های جدید عیب‌یابی ماشین‌های دوار نیروگاهی با آنالیز ارتعاشات**" و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام مرحله از مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. مهدی آقامینی

پیشگفتار

گزارش حاضر گزارش نهایی پروژه «بررسی روشهای جدید عیب‌یابی ماشینهای دوار نیروگاهی با آنالیز ارتعاشات» بوده که در بخش اول آن سیستم‌های جدید پایش وضعیت ارتعاشی و قابلیت‌های آنها در سه فصل بررسی شده‌اند:

- فصل اول به بررسی انواع سنسورهای ارتعاشی رایج در صنعت (شامل: شتاب سنج، سرعت سنج و جابجایی سنج) و مشخصات هر کدام از آنها اختصاص دارد. همچنین مشخصات فنی تعدادی از سنسورهای ارتعاشی تولید سازنده‌های معتبر بین‌المللی نیز در این فصل ارائه و با هم مقایسه شده‌اند.
- در فصل دوم قابلیت‌های سخت‌افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی متعلق به چند شرکت خارجی معتبر در سه گروه زیر بررسی و مقایسه شده‌اند:

- دستگاه‌های آنالیز ارتعاشات پرتابل

- کارتهای داده برداری ارتعاشی

- سخت‌افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی

- در فصل سوم نیز قابلیت‌های نرم‌افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی متعلق به چند شرکت خارجی معتبر بررسی و مقایسه شده‌اند.

در بخش دوم نیز انواع روشهای آنالیز ارتعاشات در پایش وضعیت ماشینهای دوار نیروگاهی در سه فصل زیر بررسی شده‌اند:

- فصل اول به بررسی انواع روشهای رایج آنالیز ارتعاشات و کاربردهای اختصاص دارد.

- در فصل دوم انواع روشهای پیشرفته و جدید آنالیز ارتعاشات و کاربرد آنها بررسی و مقایسه شده‌اند.

- در فصل سوم نیز روشهای جدید عیب‌یابی با آنالیز ارتعاشات در ماشینهای دوار نیروگاهی بررسی شده‌اند.

همچنین در انتها روشهای بهینه عیب‌یابی با آنالیز ارتعاشات تعیین شده و پروژه‌های جدید برای ادامه کار پیشنهاد شده‌اند.

این گزارش توسط آقای مهندس مهدی آقامینی تهیه و توسط آقای دکتر مجید شاهقلى داوری و نظارت شده است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
پیشگفتار.....	VI
مقدمه	XVI
بخش اول.....	۱
فصل اول: بررسی انواع سنسورهای ارتعاشی رایج در صنعت و مشخصات هر کدام	۲
مقدمه.....	۳
۱-۱-۱- پارامترهای ارتعاشی	۳
۱-۱-۲- سنسورهای اندازه‌گیری ارتعاشات.....	۴
۱-۱-۲-۱- سنسور جابجایی سنج	۵
۱-۱-۲-۲- سنسور سرعت	۷
۱-۱-۲-۳- سنسور شتاب	۹
۱-۱-۳- مشخصه های فنی شتاب سنجهای پیزوالکتریک	۱۳
۱-۱-۳-۱- حساسیت.....	۱۴
۱-۱-۳-۲- جرم و سازه شتاب سنج	۱۵
۱-۱-۳-۳- پاسخ فرکانسی	۱۵
۱-۱-۳-۴- حساسیت عرضی	۱۵
۱-۱-۳-۵- فرکانس رزونانس.....	۱۶
۱-۱-۳-۶- نویز ارتعاش کابل.....	۱۶
۱-۱-۳-۷- محدوده ی دینامیک	۱۷
۱-۱-۳-۸- مشخصه های الکتریکی و محیطی	۱۷
۱-۱-۴- روشهای نصب سنسورهای شتاب سنج و سرعت سنج	۱۷
۱-۱-۵- موقعیت نصب سنسورها	۱۹
۱-۱-۶- شرکتهای سازنده سنسورهای ارتعاشی	۲۱
۱-۱-۶-۱- شرکت BRÜEL & KJÆR VIBRO (دانمارک).....	۲۱
۱-۱-۶-۲- شرکت ANALOG DEVICES (آمریکا).....	۲۴

۲۵.....	۳-۶-۱-۱- شرکت بنتلی BENTLY NEVADA (آمریکا).....
۲۷.....	۴-۶-۱-۱- شرکت MEGGITT (VIBROMETER) (سوئیس).....
۲۹.....	۵-۶-۱-۱- شرکت EMERSON (آمریکا).....
۳۰.....	۶-۶-۱-۱- شرکت ASM (آلمان).....
۳۰.....	۷-۶-۱-۱- شرکت CEMB (ایتالیا).....
۳۱.....	۸-۶-۱-۱- شرکت EATON (نروژ).....
۳۱.....	۹-۶-۱-۱- شرکت MC-MONITORING SA (سوئیس).....
۳۱.....	۱۰-۶-۱-۱- شرکت METRIX (آمریکا).....
۳۲.....	۱۱-۶-۱-۱- شرکت SKF (سوئد).....
۳۴.....	۷-۱-۱- مقایسه سنسورهای مختلف.....
۴۲.....	فصل دوم: بررسی سخت افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی و قابلیت‌های هر کدام.....
۴۳.....	۱-۲-۱- دستگاه‌های آنالیز ارتعاشات پرتابل (PORTABLE).....
۴۳.....	۱-۲-۱-۱- شرکت LUDECA PRUFTECHNIK (آلمان).....
۴۵.....	۲-۲-۱-۲- شرکت BRÜEL & KJÆR VIBRO (دانمارک).....
۴۵.....	۳-۲-۱-۳- شرکت UPDATE INTERNATIONAL INC. (آمریکا).....
۴۸.....	۲-۲-۲- کارتهای داده برداری.....
۴۸.....	۱-۲-۲-۱- شرکت DATA TRANSLATION (آمریکا).....
۵۱.....	۲-۲-۲-۲- شرکت NATIONAL INSTRUMENT (آمریکا).....
۵۴.....	۳-۲-۱- سخت افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی.....
۵۴.....	۱-۲-۳-۱- شرکت OROS (فرانسه).....
۵۶.....	۲-۲-۳-۲- شرکت IOTECH (آمریکا).....
۵۷.....	۳-۲-۳-۳- شرکت BRÜEL & KJÆR VIBRO (دانمارک).....
۶۳.....	۴-۲-۳-۱- شرکت بنتلی BENTLY NEVADA (آمریکا).....
۶۳.....	۵-۲-۳-۱- شرکت MEGGITT (VIBROMETER) (سوئیس).....
۶۶.....	فصل سوم: بررسی نرم افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی و قابلیت‌های هر کدام.....
۶۷.....	۱-۳-۱- نرم افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی.....
۶۷.....	۱-۳-۱-۱- شرکت IOTECH (آمریکا).....

۶۷.....	۱-۳-۱-۲ شرکت DATA TRANSLATION (آمریکا)
۶۸.....	۱-۳-۱-۳ شرکت BRÜEL & KJÆR VIBRO (دانمارک)
۶۹.....	۱-۳-۱-۴ شرکت زیمنس SIEMENS (آلمان)
۷۰.....	۱-۴-مراجع بخش اول
۷۱.....	بخش دوم
۷۲.....	فصل اول: بررسی انواع روشهای رایج آنالیز ارتعاشات و کاربردها
۷۳.....	۲-۱-۱ مقدمه
۷۳.....	۲-۱-۲ نمونه برداری (SAMPLING)
۷۳.....	۲-۱-۳ انعکاس (ALIASING)
۷۴.....	۲-۱-۴ تقویت سیگنال
۷۴.....	۲-۱-۵ فیلتر کردن (FILTERING)
۷۵.....	۲-۱-۶ شکل موج زمانی (TIME WAVEFORM ANALYSIS)
۷۷.....	۲-۱-۷ حوزه فرکانس و حوزه زمان
۷۸.....	۲-۱-۸ طیف فرکانسی (نمودار FFT)
۷۹.....	۲-۱-۹ ویندوینگ (WINDOWING)
۸۰.....	۲-۱-۱۰ میانگین گیری (AVERAGING)
۸۴.....	۲-۱-۱۱ نمودار روند پیشرفت عیب (TRENDING)
۸۵.....	۲-۱-۱۲ مقیاس گذاری خطی و لگاریتمی
۸۶.....	۲-۱-۱۳ پارامترهای آماری مورد استفاده در تحلیل داده های ارتعاشی
۸۸.....	فصل دوم: بررسی انواع روشهای پیشرفته و جدید آنالیز ارتعاشات و کاربرد آنها
۸۹.....	۲-۲-۱ مقدمه
۸۹.....	۲-۲-۲ نمودار بود (BODE PLOT)
۸۹.....	۲-۲-۳ نمودار قطبی (POLAR PLOT)
۹۰.....	۲-۲-۴ نمودار سه بعدی آبشاری (3D, CASCADE, WATERFALL PLOT)
۹۱.....	۲-۲-۵ نمودار مدار شفت (SHAFT ORBIT)
۹۴.....	۲-۲-۶ روش تحلیل باندهای هشتگانه (OCTAVE BAND ANALYSIS)
۹۴.....	۲-۲-۷ روش تحلیل باندها با عرض ثابت (CONSTANT BANDWIDTH ANALYSIS)

۹۴.....	۲-۲-۸- روش تحلیل طیف (CONSTANT PERCENTAGE BANDWIDTH ANALYSIS) CPB
۹۴.....	۲-۲-۹- روش تحلیل مستقیم (REAL TIME ANALYSIS)
۹۵.....	۲-۲-۱۰- کمپستروم (CEPSTRUM)
۹۶.....	۲-۲-۱۱- انولوپ (پوش)
۹۷.....	۲-۲-۱۲- تحلیل مرتبه (ORDER TRACKING ANALYSIS)
۹۸.....	۲-۲-۱۳- نمودار خط مرکز شفت (SHAFT CENTER LINE)
۹۹.....	۲-۲-۱۴- دیاگرام کمبل (CAMPBELL DIAGRAM)
۱۰۰.....	۲-۲-۱۵- تبدیل موجک (WAVELET TRANSFORM)
۱۰۲.....	۲-۲-۱۶- روش زمان بندی نوک پره (BLADE TIP TIMING)
۱۰۴.....	فصل سوم: بررسی روشهای جدید عیب یابی با آنالیز ارتعاشات در ماشینهای دوار نیروگاهی
۱۰۵.....	۲-۳-۱- مقدمه
۱۰۶.....	۲-۳-۲- انواع روشهای عیب یابی ماشینهای دوار
۱۰۷.....	۲-۳-۳- دسته بندی و کاربرد روشهای مختلف آنالیز ارتعاشات در عیب یابی
۱۰۸.....	۲-۳-۳-۱- روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه زمان
۱۱۱.....	۲-۳-۳-۲- روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه فرکانس و حوزه زمان-فرکانس
۱۱۳.....	۲-۳-۴- عیوب متداول ماشینهای دوار و مرور کارهای گذشته
۱۲۴.....	۲-۳-۵- مشخصات ارتعاشی عیوب متداول ماشینهای دوار (مطابق استاندارد ISO 13373-1)
۱۲۷.....	۲-۴- تعیین روشهای بهینه عیب یابی با آنالیز ارتعاشات و پیشنهاد پروژه های آتی
۱۲۸.....	۲-۵- نتیجه گیری
۱۲۹.....	۲-۶- مراجع بخش دوم

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱: انواع سنسورهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری ارتعاشات ماشینها.....	۵
شکل ۲: محدوده تقریبی پاسخ فرکانسی انواع سنسورهای مانیتورینگ ارتعاشات.....	۵
شکل ۳: سنسور جابجایی در حال نصب.....	۶
شکل ۴: اجزاء داخلی سنسور سرعت.....	۸
شکل ۵: اجزاء داخلی سنسور شتاب سنج پیزوالکتریک فشاری.....	۱۲
شکل ۶: حساسیت شتاب سنجها بر حسب فرکانس.....	۱۴
شکل ۷: حساسیت سنسورهای شتاب نسبت به فرکانس طبیعی.....	۱۵
شکل ۸: بررسی تاثیر روش نصب شتاب‌سنج‌ها در پاسخ فرکانسی آنها.....	۱۸
شکل ۹: موقعیتهای اندازه‌گیری پارامترهای ارتعاشی روی یاتاقان‌ها بر اساس استاندارد.....	۲۰
شکل ۱۰: چگونگی نصب سنسور جابجایی بر روی یاتاقان.....	۲۰
شکل ۱۱: سنسورهای شتاب سنج شرکت B&K.....	۲۲
شکل ۱۲: درایور (تغذیه) سنسورهای شتاب سنج و جانکشن باکس حاوی ۴ عدد درایور.....	۲۲
شکل ۱۳: سنسور سرعت سنج VS-077.....	۲۳
شکل ۱۴: سنسورهای جابجایی سنج (سمت راست) و نوسان سازشان (سمت چپ).....	۲۴
شکل ۱۵: دستگاه‌های آنالیز ارتعاشات پرتابل.....	۴۳
شکل ۱۶: آنالایزر VIBXPERT.....	۴۴
شکل ۱۷: آنالایزر VIBSCANNER.....	۴۵
شکل ۱۸: دستگاههای پرتابل شرکت B&K (به ترتیب از راست: VT60 و VT80 و VP80).....	۴۵
شکل ۱۹: دستگاه پرتابل DT6.....	۴۶
شکل ۲۰: کارت داده برداری DT9800.....	۴۸
شکل ۲۱: کارت داده برداری DT3000.....	۴۹
شکل ۲۲: کارت داده برداری DT9841.....	۵۰
شکل ۲۳: کارت داده برداری NI USB-9201.....	۵۱
شکل ۲۴: کارت داده برداری PCI-6013.....	۵۱
شکل ۲۵: کارت داده برداری PX-6122.....	۵۲

۵۶.....	شکل ۲۶: دستگاه های پایش وضعیت شرکت OROS
۵۷.....	شکل ۲۷: آنالایزر ZONIC BOOK (سمت راست) و WAVE BOOK (سمت چپ)
۵۷.....	شکل ۲۸: دستگاه ZONIC BOOK به همراه کامپیوتر و نرم افزار مربوطه
۵۸.....	شکل ۲۹: دستگاه VC800
۵۹.....	شکل ۳۰: دستگاه VC920
۵۹.....	شکل ۳۱: دستگاه VC1000
۶۰.....	شکل ۳۲: دستگاه VC1100
۶۱.....	شکل ۳۳: دستگاه VC 4000
۶۲.....	شکل ۳۴: دستگاه VC 6000
۶۲.....	شکل ۳۵: دستگاه VC 8000
۶۳.....	شکل ۳۶: سیستم بنتلی ۳۵۰۰
۶۴.....	شکل ۳۷: سیستم VM600 به همراه نرم افزار مربوطه
۷۳.....	شکل ۳۸: نمونه برداری از موج با سرعتی کمتر از معیار نایکویست
۷۴.....	شکل ۳۹: تاثیر انعکاس در طیف فرکانسی
۷۵.....	شکل ۴۰: فیلتر ایده آل
۷۵.....	شکل ۴۱: فیلتر واقعی
۷۶.....	شکل ۴۲: نمودار شکل موج زمانی مربوط به زمان راه اندازی برای یک ماشین خاص
۷۸.....	شکل ۴۳: مفهوم حوزه فرکانس و حوزه زمان
۷۹.....	شکل ۴۴: نمایش موج در حوزه فرکانس بدون استفاده از تایع ویندوینگ
۸۰.....	شکل ۴۵: نمایش موج در حوزه فرکانس با استفاده از تایع ویندوینگ (HANNING)
۸۲.....	شکل ۴۶: نمودار موج در حوزه زمان بدون میانگین گیری (سرعت دورانی محور ۸۲۲ دور در دقیقه)
۸۲.....	شکل ۴۷: نمودار موج در حوزه زمان پس از ۱۰۲۴ بار میانگین گیری بدون کاربرد نشانه زمانی
۸۳.....	شکل ۴۸: نمودار موج در حوزه زمان پس از ۱۰۲۴ بار میانگین گیری با کاربرد نشانه زمانی
۸۳.....	شکل ۴۹: نمودار موج در حوزه فرکانس
۸۴.....	شکل ۵۰: نمودار ارتعاشات (در حوزه فرکانس) گیربکس در یک ماشین چند ساعت قبل از شکست
۸۴.....	شکل ۵۱: نمودار ارتعاشات (در حوزه زمان) گیربکس ماشین قبل از شکست
۸۵.....	شکل ۵۲: نمونه ای از نمودار روند پیشرفت عیب

شکل ۵۳: نمودار بود در حالت ایده‌آل.....	۸۹
شکل ۵۴: نمونه‌ای از نمودار قطبی.....	۹۰
شکل ۵۵: نمودار آیشاری مربوط به ارتعاشات راه‌اندازی یک ماشین.....	۹۱
شکل ۵۶: چگونگی نصب دو سنسور جابجایی بطور عمود بر هم بمنظور ترسیم مدار شفت.....	۹۱
شکل ۵۷: نمونه‌ای از مدار شفت روی اسیلوسکوپ.....	۹۲
شکل ۵۸: مراحل ترسیم نمودار مدار شفت.....	۹۳
شکل ۵۹: شکل موجهای زمانی و مدار شفت اصلاح نشده (سمت چپ) در مقایسه با نمودارهای اصلاح شده (سمت راست).....	۹۳
شکل ۶۰: نمونه‌ای از نمودار شکل موج زمانی (بالا) و نمودار طیف فرکانسی مربوطه (پایین).....	۹۶
شکل ۶۱: نمودار کپستروم مربوط به شکل ۶۰.....	۹۷
شکل ۶۲: نمودار انولوپ مربوط به شکل ۶۰.....	۹۷
شکل ۶۳: موقعیت شفت درون یاتاقان و نمودار خط مرکز شفت.....	۹۹
شکل ۶۴: دیاگرام کمبل برای یک روتور ساده.....	۱۰۰
شکل ۶۵: چند نمونه موجک مادر.....	۱۰۱
شکل ۶۶: مراحل حذف نویز از سیگنال.....	۱۰۱
شکل ۶۷: محل قرارگیری سنسورها در روش BTT.....	۱۰۲
شکل ۶۸: زمان رسیدن پره به سنسور نسبت به حالت بدون ارتعاش.....	۱۰۳
شکل ۶۹: روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه زمان.....	۱۰۹
شکل ۷۰: مسیر دایره‌ای یا بیضوی مرکز شفت نامیزان.....	۱۱۵
شکل ۷۱: مسیر بیضوی با نسبت قطر زیاد ناشی از تشدید احتمالی.....	۱۱۵
شکل ۷۲: نامیزانی جرمی استاتیکی (راست) و دینامیکی (چپ).....	۱۱۵
شکل ۷۳: مسیر موزی شکل مرکز شفت ناشی از عدم‌هم‌محوری (در حالت $1 \times \text{RPM}$).....	۱۱۹
شکل ۷۴: مسیر مرکز شفت ناشی از عدم‌هم‌محوری (در حالت $2 \times \text{RPM}$ و $3 \times \text{RPM}$).....	۱۱۹
شکل ۷۵: مسیر مرکز شفت در اثر چرخش روغن.....	۱۲۳

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱: مشخصات کلی برخی از سنسورهای شتاب‌سنج شرکت B&K.....	۲۱
جدول ۲: مشخصات کلی سنسور سرعت‌سنج شرکت B&K.....	۲۳
جدول ۳: مشخصات سنسورهای جابجایی.....	۲۳
جدول ۴: مشخصات کلی سنسورهای شتاب‌سنج شرکت ANALOG DEVICES.....	۲۴
جدول ۵: مشخصات سنسورهای شتاب‌سنج شرکت BENTLY.....	۲۵
جدول ۶: مشخصات کلی سنسورهای سرعت‌سنج شرکت BENTLY.....	۲۶
جدول ۷: مشخصات سنسورهای جابجایی‌سنج شرکت BENTLY.....	۲۷
جدول ۸: مشخصات کلی سنسور شتاب‌سنج‌های شرکت MEGGITT.....	۲۷
جدول ۹: مشخصات کلی سنسور سرعت‌سنج شرکت MEGGITT.....	۲۸
جدول ۱۰: مشخصات کلی سنسور جابجایی‌سنج‌های شرکت MEGGITT.....	۲۸
جدول ۱۱: مشخصات کلی سنسورهای شتاب‌سنج شرکت EMERSON.....	۲۹
جدول ۱۲: مشخصات کلی سنسورهای سرعت‌سنج شرکت EMERSON.....	۲۹
جدول ۱۳: مشخصات کلی سنسورهای جابجایی‌سنج شرکت EMERSON.....	۳۰
جدول ۱۴: مشخصات کلی سنسور سرعت‌سنج شرکت ASM.....	۳۰
جدول ۱۵: مشخصات کلی سنسور سرعت‌سنج سزمیک شرکت CEMB.....	۳۰
جدول ۱۶: مشخصات کلی سنسور جابجایی‌سنج شرکت EATON.....	۳۱
جدول ۱۷: مشخصات کلی سنسور سرعت‌سنج شرکت MC.....	۳۱
جدول ۱۸: مشخصات کلی سنسور جابجایی‌سنج شرکت METRIX.....	۳۲
جدول ۱۹: مشخصات کلی سنسور سرعت‌سنج شرکت METRIX.....	۳۲
جدول ۲۰: مشخصات کلی سنسورهای شتاب‌سنج شرکت SKF.....	۳۳
جدول ۲۱: مشخصات کلی سنسورهای سرعت‌سنج شرکت SKF.....	۳۳
جدول ۲۲: مقایسه‌ی سنسورهای شتاب‌سنج.....	۳۵
جدول ۲۳: مقایسه‌ی سنسورهای سرعت‌سنج.....	۳۸

جدول ۲۴: مقایسه‌ی سنسورهای جابجایی سنج.....	۴۰
جدول ۲۵: مقایسه قابلیت‌های دستگاه‌های آنالیز ارتعاشات پرتابل.....	۴۷
جدول ۲۶: مقایسه قابلیت‌های کارتهای داده برداری ارتعاشی.....	۵۳
جدول ۲۷: مقایسه قابلیت‌های سخت افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی.....	۶۵
جدول ۲۸: مقایسه قابلیت‌های نرم افزارهای آنالیز ارتعاشات.....	۶۹
جدول ۲۹: روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه فرکانس و زمان-فرکانس.....	۱۱۲
جدول ۳۰: مشخصه های ارتعاشی عیوب متداول ماشینهای دوار.....	۱۲۴
جدول ۳۱: عیوب متداول ماشینهای دوار و علل پیدایش آنها.....	۱۲۵

مقدمه

امروزه به دلیل رقابت‌های شدید در تولید نیرو، سیستم‌های پایش وضعیت که به منظور ایجاد و حفظ حالت بهینه عملکرد ماشینها ایجاد شده‌اند، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف از اعمال این سیستمها در ماشینهای تولید نیرو علاوه بر حفظ راندمان آنها، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش زمان بازرسی و تعمیر و افزایش عمر مفید ماشینها می‌باشد. به منظور جلوگیری از پیشرفت عیوب ماشینها، لازم است که به طور مداوم از وضعیت دستگاه مطلع بوده و اقدامات لازم جهت جلوگیری از بروز حوادث خطرناک انجام گیرد. این اقدامات علاوه بر کاهش زمان و هزینه تعمیر، مانع آسیب دیدگی جدی دستگاه شده و موجب حفظ دستگاه و افزایش عمر مفید آن می‌شود.

بخش اول

فصل اول:

بررسی انواع سنسورهای ارتعاشی رایج در
صنعت و مشخصات هر کدام

مقدمه

ارتعاشات در ماشینها، معمولاً در اثر وجود عیب (یا عیوب) تولید می‌شود. برای تشخیص علت آن باید مشخصه‌ها و علائم ارتعاشی اندازه‌گیری و بررسی و تحلیل شوند. بنابراین آشنایی با انواع حسگرهای ارتعاشات و همچنین قابلیت‌ها و محدودیت‌های آنها الزامی است، چرا که انتخاب نوع حسگر از لحاظ محدوده کاربرد و محل نصب در جمع‌آوری داده‌های صحیح نقش مهمی دارد. در این فصل ابتدا پارامترهای ارتعاشی و سپس حسگرهای متداول ارتعاشات و مزایا و معایب آنها توضیح داده می‌شوند.

۱-۱-۱- پارامترهای ارتعاشی

بررسی رفتار ارتعاشی ماشینهای دوار با بررسی پارامترهای ارتعاشی (فرکانس، دامنه و زاویه فاز) انجام می‌گیرد که بطور خلاصه به صورت زیر بیان می‌شوند [۱]:

♦ فرکانس

فرکانس ارتعاشات تعداد نوسانات کامل (دوره‌های تناوب) ارتعاشی در واحد زمان می‌باشد و یکی از مهمترین پارامترها جهت بررسی رفتار ارتعاشی ماشینهای دوار می‌باشد. بیشتر مشکلات ارتعاشی ماشینهای دوار با بررسی طیف فرکانسی (نمودار دامنه ارتعاشی بر حسب فرکانس) مشخص می‌شوند. فرکانس معمولاً با واحد دور بر دقیقه (RPM) یا دور بر ثانیه (CPS) که همان هرتز (Hz) می‌باشد اندازه‌گیری می‌شود.

برای مثال اگر در یک طیف فرکانسی، در فرکانس ۵۰ هرتز مقدار دامنه ارتعاش برابر A باشد به این معنی است که در آن نقطه اندازه‌گیری در هر ثانیه ۵۰ بار دامنه ارتعاشات به مقدار ماکزیمم A و مینیمم $-A$ می‌رسد (به عبارت دیگر ۵۰ دوره تناوب در هر ثانیه انجام می‌شود).

♦ دامنه

دامنه ارتعاشات مقدار حداکثر تغییرات دینامیکی یکی از پارامترهای جابجایی، سرعت یا شتاب نسبت به حالت استاتیکی (برابر با نصف مقدار (peak to peak) می‌باشد.

در بررسی رفتار ارتعاشی معمولاً مقدار میانگین (RMS: root mean square) دامنه ارتعاشات در حالت کلی (کل بازه فرکانسی دریافتی: overall) بکار می‌رود و واحد آن معمولاً یکی از حالات زیر می‌باشد:

جابجایی: با واحد (1 micron = 0.001milimeter) یا (1 mil = 0.001in)

سرعت: با واحد (mm/sec) یا (inch/sec)

شتاب: با واحد (m/s²) یا (1g = 9.8 m/s²)

♦ فاز

از دیگر پارامترهای مهم ارتعاشات، پارامتر فاز یا زاویه فاز است. این پارامتر معمولاً وقتی استفاده می‌شود که بخواهیم ارتعاشات چند نقطه را نسبت به هم یا نسبت به یک مرجع مقایسه کنیم.

عموماً در ماشینهای دوار یک نقطه از شفت را علامت (key phasor, trigger mark) می‌زنند و سنسور زاویه فاز در هر دور چرخش با رسیدن به این علامت یک پالس تولید می‌کند که این سیگنال، مرجع زاویه فاز تمامی سیگنالهای ارتعاشی دریافتی از آن ماشین می‌شود.

در هنگام اندازه‌گیری و کار با زاویه فاز نکات زیر باید مورد توجه قرار گیرد :

برای اندازه‌گیری فاز به دو سیگنال احتیاج است: یک سیگنال ارتعاشی و یک سیگنال فاز (trigger signal) و لازم است که هر دو سیگنال مذکور دارای یک فرکانس باشند.

اندازه‌گیری فاز به این صورت است که از نقطه ماکزیمم روی سیگنال شکل موج زمانی ارتعاشات به سمت عقب روی محور زمان حرکت می‌کنیم تا به پالس سیگنال فاز برسیم، این زاویه همان فاز سیگنال ارتعاشی می‌باشد.

معمولاً زاویه فاز سیگنال بر حسب درجه و بصورت پس فاز (phase lag) بیان می‌شود. کلمه پس فاز بمعنی تأخیر زمانی وقوع ماکزیمم ارتعاشات پس از علامت روی شفت می‌باشد.

۱-۲- سنسورهای اندازه‌گیری ارتعاشات

از آنجائیکه پارامترهای جابجایی، سرعت و شتاب، هر کدام به طور مجزا اندازه‌گیری می‌شوند، گاهی محدودیتهایی وجود دارند که انتخاب یکی از آنها را اجباری می‌کنند. برای مثال ممکن است سازنده یک ماشین محدوده مجاز ارتعاشات را در واحد جابجایی مشخص نموده باشد در این حالت بهتر است مشخصه جابجایی به عنوان پارامتر اندازه‌گیری ارتعاش در نظر گرفته شود.

همچنین گاهی ممکن است محدودیت‌های ابزارهای اندازه‌گیری جابجایی، سرعت یا شتاب (از قبیل دما، فرکانس، نسبی یا مطلق بودن ارتعاشات و ...)، کاربرد برخی از آنها را غیر ممکن کند و ناچار شویم پارامتر ارتعاشی دیگری را اندازه‌گیری نماییم.

البته از طریق انتگرال‌گیری یا مشتق‌گیری می‌توان این پارامترها را به هم تبدیل نمود ولی باید به نکات زیر توجه شود:

- خروجی سنسورهای سرعت و شتاب ارتعاشات مطلق است و نمی‌توان آن را با ارتعاشات نسبی خروجی سنسور جابجایی مقایسه نمود.
- با هر بار انتگرال‌گیری مقدار دامنه ارتعاشات در فرکانسهای بالا کاهش می‌یابد چون در هر انتگرال‌گیری مقدار سیگنال به فرکانس تقسیم می‌شود.

برای اندازه‌گیری ارتعاشات مطلق لازم است از سنسورهای شتاب سنج یا سرعت سنج و برای اندازه‌گیری ارتعاشات نسبی باید از سنسور جابجایی سنج استفاده نمود. البته علاوه بر سنسورها تجهیزات جانبی دیگری (از قبیل: تقویت کننده‌های سیگنال (آمپلی‌فایرها)، فیلترها، مبدل آنالوگ به دیجیتال، دستگاه ذخیره کننده اطلاعات ارتعاشی، دستگاه تحلیلگر فرکانس و وسایل نمایشگر و ...) ممکن است نیاز شود. در این قسمت انواع متداول سنسورهای ارتعاشی (که حسگر، ترانسدویسر Transducer یا پیک‌آپ Pickup نیز نامیده می‌شوند) توضیح داده می‌شوند [۱]:

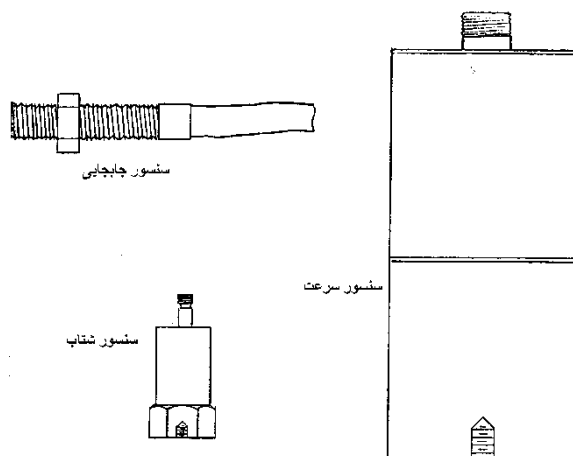
۱- جابجایی سنج

۲- سرعت سنج

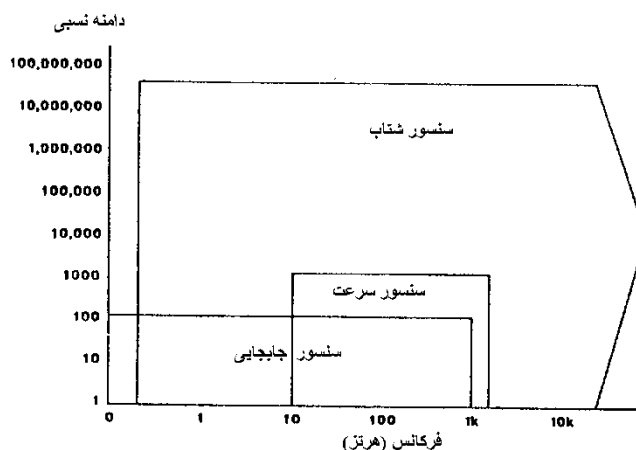
۳- شتاب سنج

همچنین برای تشخیص عیوب ارتعاشی از طریق آنالیز ارتعاشات به سنسور اندازه‌گیری زاویه فاز و همچنین سنسور دورسنج نیاز می‌باشد که در ادامه به توضیح آنها می‌پردازیم.

هر سه نوع سنسور بطور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده‌اند و محدوده عکس‌العمل فرکانسی و دینامیکی آنها در شکل ۲ با هم مقایسه شده‌اند.



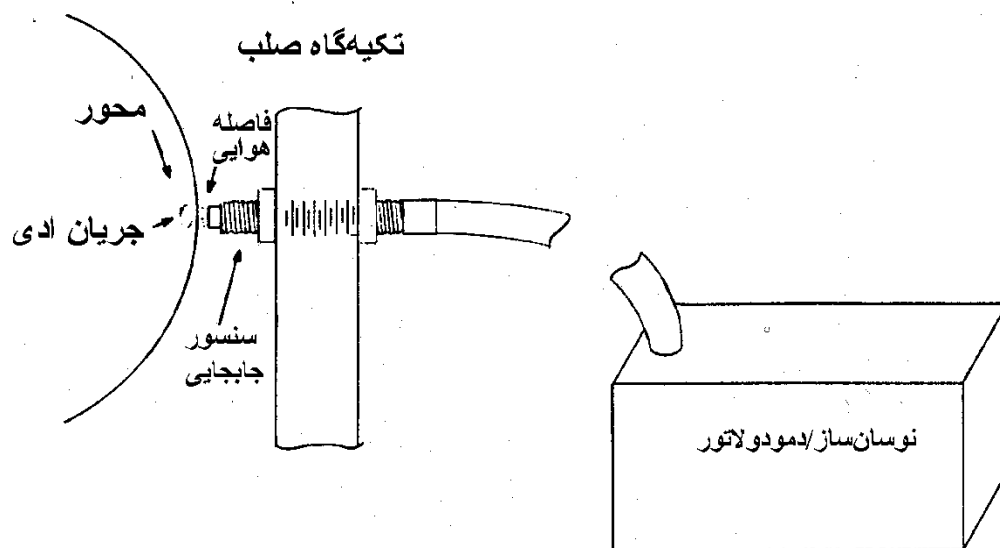
شکل ۱: انواع سنسورهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری ارتعاشات ماشینها



شکل ۲: محدوده تقریبی پاسخ فرکانسی انواع سنسورهای مانیتورینگ ارتعاشات

۱-۲-۱- سنسور جابجایی سنج

متداول‌ترین انواع سنسورهای جابجایی غیر تماسی پراکسیمیتی پراب (proximity probe) نام دارند (شکل ۳) و شامل قسمتهای حسگر یا پراب (Probe)، نوسان ساز یا پراکسیمیتور (proximitor, Oscillator/Demodulator) و کابل رابط می‌باشند.



شکل ۳: سنسور جابجایی در حال نصب

اساس کار سنسورهای غیرتماسی بدین صورت است که نوسان ساز با ایجاد یک جریان نوسانی با فرکانس حدوداً $1/5 \text{ MHz}$ در نوک پراب یک میدان مغناطیسی تولید می‌کند که این میدان مغناطیسی هنگام قرارگرفتن پراب در نزدیکی شفت باعث ایجاد جریان ادی در شفت می‌گردد که معادل اتلاف انرژی بوده و باعث کاهش دامنه نوسان جریان تحریک کننده می‌شود.

از آنجاییکه جریان ادی ایجاد شده به فاصله نوک پراب و شفت بستگی دارد هرگونه تغییر در این فاصله بصورت تغییر ولتاژ جریان (DC) خروجی از نوسان ساز ظاهر می‌گردد. هر چه فاصله نوک پراب با شفت بیشتر باشد اتلاف انرژی کمتر شده و در نتیجه ولتاژ خروجی نوسان ساز بیشتر خواهد بود.

دامنه کاربرد این سنسورها با توجه فاصله تقریبی نوک پراب از شفت مشخص می‌شود. از آنجاییکه رفتار جریان ادی به رسانایی و نفوذپذیری جنس شفت بستگی دارد، لذا تنظیم یک سنسور غیرتماسی برای شفت‌های مختلف متفاوت خواهد بود و نوع عملیات سطحی روی شفت یا ماشین کاری، بر روی سیگنال خروجی سنسور تأثیر دارد.

بنابر اساس کارکرد سنسورهای غیرتماسی، وجود مواد غیرهادی مانند هوا، روغن، گاز، پلاستیک و ... در فضایی بین نوک پراب و سطح شفت تأثیری بر اندازه‌گیری نخواهد داشت ولی از طرف دیگر هرگونه ناهمگونی و ناصافی سطح و دایروی نبودن مقطع شفت (runout) تأثیر مستقیم بر اندازه‌گیری داشته و موجب خطا خواهد شد.

معمولاً این پرابها برای فاصله هوایی بین 10 mils تا 90 mils مناسب هستند. به هنگام نصب این سنسور باید پراب، نسبت به جنس شفت کالیبره شود. محدوده فرکانسی مجاز برای این نوع سنسورها از صفر تا حدود ۱۵۰۰ هرتز می‌باشد و توانایی اندازه‌گیری جابجایی استاتیکی را نیز دارد و بطور کلی قدرت تشخیص جابجایی‌های خیلی آرام و جابجایی‌های خیلی سریع (در محدوده مجاز فرکانسی) را دارد.

این سنسور معمولاً بصورت دائمی روی پوسته یا تاقان نصب می‌شود و جابجایی نسبی سطح شفت دوار را نسبت به نوک پراب اندازه‌گیری می‌کند. در هنگام نصب این نوع سنسور می‌بایست موارد زیر رعایت شود:

- محل نصب آنها می‌بایست از صلیبیت کافی برخوردار باشد.

- نوک پراب بنحوی در مقابل شفت قرارگیرد که میدان القایی ایجاد شده از اجزاء دیگری به غیر از شفت عبور نکند.
- سطح مقطع شفت در محل نصب سنسور باید کاملاً دایره‌ای باشد.

قابلیت‌ها و مزایای سنسور جابجایی

- اندازه‌گیری حرکت دینامیکی شفت (ارتعاشات شفت)
- اندازه‌گیری موقعیت استاتیکی شفت (موقعیت مرکز شفت shaft center line)
- حساسیت مناسب در محدوده کاری از صفر (حالت استاتیکی یا DC) تا ۱۵۰۰ هرتز
- کالیبراسیون ساده
- استحکام فیزیکی بالا
- دارای انواع مختلف از نظر ساختار فیزیکی
- مناسب نصب در محیط‌های خشن و سخت
- قابلیت استفاده بعنوان:
- سنسور جابجایی سنج شفت (اندازه‌گیری استاتیکی (shaft center line) و دینامیکی (vibration))
- سنسور اندازه‌گیری خارج از مرکزی شفت (اندازه‌گیری استاتیکی: rod drop, eccentricity)
- سنسور اندازه‌گیری زاویه فاز (به همراه علامت زمانی، اندازه‌گیری استاتیکی)
- سنسور دورسنج (به همراه چرخ دنده، اندازه‌گیری استاتیکی)
- سنسور اندازه‌گیری جابجایی محوری (نصب بر روی یاتاقان تراست، اندازه‌گیری استاتیکی)

معایب سنسور جابجایی

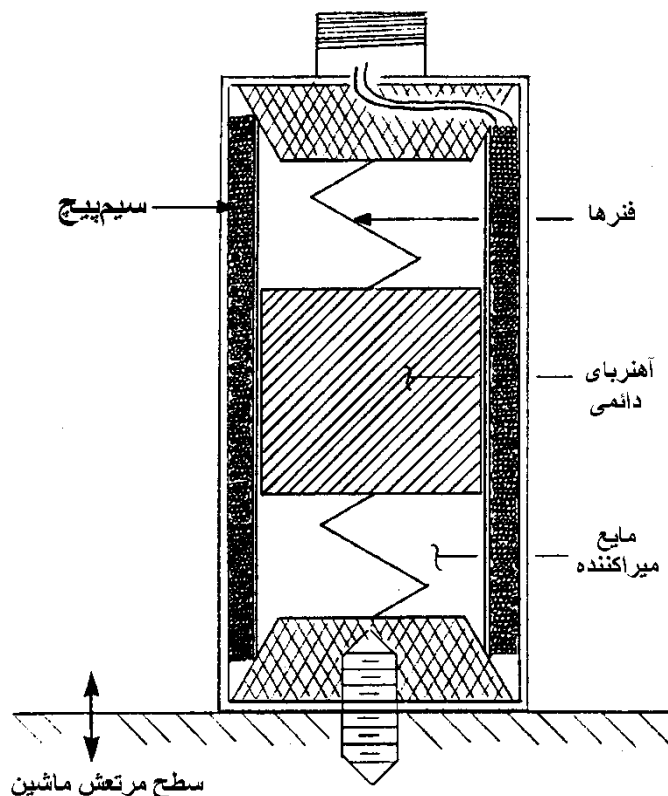
- حساس به ناهمواریهای سطح شفت و همچنین حساس به ضریب مغناطیسی جنس شفت
- نیازمند به منبع انرژی الکتریکی خارجی برای تغذیه پراکسیمیتور
- نیاز به انتخاب صحیح طول کابل هنگام سفارش سنسور (چون متناسب با مقاومت کابل رابط سنسور در کارخانه سازنده کالیبره می شود)
- حساسیت به تداخل امواج پرابهای جابجایی مجاور
- نصب مشکل (معمولاً سوراخکاری لبه های یاتاقان نیاز است)

۱-۲-۲- سنسور سرعت

این ابزار یکی از قدیمی‌ترین سنسورهای الکترونیکی برای اندازه‌گیری ارتعاشات به حساب می‌آید. این سنسور دارای یک آهنربای دائمی نسبتاً بزرگ لرزان (به همین دلیل به این سنسورها گاهی سنسورهای seismic گفته می شود) است که بین دو فنر (با سختی کم) قرار داده شده است، بطوریکه در فرکانس‌های بالای ۱۰ هرتز تقریباً در فضا ثابت

می‌ماند. محیط اطراف آهنربا با یک مایع میراکننده (مانند روغن) پر شده است. همچنین پوسته خارجی سنسور سیم‌پیچی شده است.

شکل ۴ ساختمان داخلی یک سنسور سرعت را نشان می‌دهد. طرز کار این سنسور به این صورت است که سنسور روی سطح جسم نصب می‌شود. سیم پیچ متصل به پوسته خارجی سنسور به همراه جسم ارتعاش می‌کند، در حالیکه آهنربای داخل سیم پیچ تقریباً ساکن می‌ماند. حرکت نسبی آهنربا و سیم‌پیچ باعث ایجاد جریان الکتریکی می‌شود که ولتاژش با سرعت حرکت متناسب است و بدین صورت می‌توان سرعت مطلق حرکت ارتعاشی را بدست آورد.



شکل ۴: اجزاء داخلی سنسور سرعت

فرکانس طبیعی سنسورهای سرعت (که برای مانیتورینگ ماشینها بکار می‌روند) معمولاً در حدود ۸ هرتز می‌باشد، که در واقع مربوط به فرکانس طبیعی جرم آهنربای داخلی می‌باشد. بعلاوه وجود روغن در دو طرف جرم داخلی، پاسخ سنسور در فرکانس تشدید، بشدت میرا می‌شود. محدوده فرکانسی مفید برای این سنسورها حدوداً از فرکانس ۸ تا ۱۵۰۰ هرتز می‌باشد (زیرا در این محدوده، سنسور بصورت خطی عمل می‌کند). جرم این سنسور نسبتاً زیاد است و هنگامیکه روی ماشینها و اجسام سبک نصب شود، ممکن است در رفتار ارتعاشاتی جسم تأثیر بگذارد. احتمال بروز شکست و خرابی در این سنسور بعلاوه وجود قسمتهای متحرک داخلی سنگین، بیشتر می‌باشد. سیم‌پیچ جانبی این سنسور باعث می‌شود که نسبت به میدانهای الکترومغناطیسی خارجی نیز حساسیت داشته باشد و در نتیجه امواج الکترومغناطیسی خارجی را دریافت و با سیگنال ارتعاشی جمع می‌کند و این سیگنال برآیند را به آنالایزر می‌فرستد. یک روش ساده برای کنترل عدم وجود میدانهای الکترومغناطیس در اطراف سنسور این است که سنسور در نزدیکی

سطح اندازه‌گیری بدون تماس ثابت نگهداشته شود، در صورت وجود یک سیگنال نسبتاً قوی در خروجی سنسور می‌توان به وجود میدانهای خارجی پی برد. از آنجاییکه سنسورهای سرعت براساس میدان الکترومغناطیسی القایی عمل می‌کنند، در هنگام نصب آنها می‌بایست نکات زیر رعایت شود :

- نزدیک به میدان مغناطیسی مانند میدان مغناطیسی ژنراتورها یا موتورهای نباشند.
- جرم سنسور تأثیری بر رفتار ارتعاشی سیستم نداشته باشد.

قابلیت‌ها و مزایای سنسور سرعت

- اندازه‌گیری حرکت مطلق پوسته سنسور
- نصب آسان روی قسمت‌های خارجی ماشینها
- حساسیت مناسب در محدوده فرکانسی مجاز
- بی نیاز به منبع تغذیه خارجی
- دارا بودن انواع مختلف از نظر ساختار فیزیکی

معایب سنسور سرعت

- ناتوانی در اندازه‌گیری ارتعاشات نسبی یا موقعیت شفت
- کالیبراسیون مشکل
- محدوده کاری بالاتر از فرکانس طبیعی سنسور (حدود ۸ هرتز)
- احتمال زیاد شکست در اثر خستگی در قطعات متحرک داخلی
- نصب مشکل در فضاهای کوچک بعلا ابعاد هندسی نسبتاً بزرگ
- حساس به میدان‌های مغناطیسی اطراف سنسور

لازم به ذکر است که نوع جدیدتری از سنسور سرعت سنج بنام سنسور سرعت پیزوالکتریک (Piezoelectric velocity sensors) وجود دارد که نوعی سنسور شتاب سنج مجهز به انتگرال گیر داخلی می باشد. خروجی این سنسور از جنس سرعت است و مزایا و معایب آن مانند سنسورهای شتاب سنج است و محدودیت فرکانسی سرعت سنج‌های معمولی را ندارد و بازه بزرگتری را پوشش می دهد.

۱-۲-۳- سنسور شتاب

یک شتاب سنج حسگری می باشد که شتاب مکانیکی را به سیگنال الکتریکی متناسب با آن تبدیل می کند. شتاب نرخ تغییرات سرعت در واحد زمان می باشد و بر حسب m/s^2 و یا بر حسب شتاب جاذبه زمین ($g = 9.8 m/s^2$) اندازه گیری می شود [۱-۵].

شتاب سنج عموماً برای اندازه‌گیری ارتعاش، شوک و ضربه به کار می‌رود؛ ولی می‌تواند برای کاربردهای دیگری نیز به کار رود. به کمک انتگرال‌گیری از شتاب می‌توان سرعت و جابجایی را اندازه‌گیری نمود. به کمک مقدار شتاب استاتیک می‌توان زاویه قرارگیری جسم نسبت به محور جاذبه زمین و یا میزان تراز سطح را اندازه‌گیری نمود.

بعضی از سازندگان محصولات شتاب سنج خود را بر حسب کاربرد شتاب سنج دسته‌بندی می‌کنند (از قبیل: شتاب سنج‌های مصرف عمومی، شوک، فرکانس بالا، فرکانس پایین، مودال، مینیاتوری، خازنی و...). این شتاب سنج‌ها در انواع تک محوره، دومحوره و سه محوره تولید می‌شوند و می‌توانند خروجی‌های بارالکتریکی، ولتاژ، جریان و ... داشته باشند.

شتاب سنج‌ها انواع مختلفی دارند که عبارتند از: پیزوالکتریک (Piezo Electric)، پیزو رزیستیو (Piezo Resistive)، کرنش سنج (Strain Gauge)، خازنی، پتانسیومتری، لیزری، نیمه هادی (MEMS)، مغناطیسی، اثر هال (Hall Effect)، حرارتی رزونانسی و... در ادامه به شرح بعضی از متداول‌ترین آنها پرداخته می‌شود:

• شتاب سنج پتانسیومتری

ساده‌ترین نوع شتاب سنج می‌باشد؛ که شامل یک جرم، یک فنر و یک پتانسیومتر است که جرم به سر متغیر پتانسیومتر وصل است و با تغییر شتاب، نیروی وارده بر فنر تغییر کرده و در نتیجه طول فنر نیز تغییر میکند. با تغییر طول فنر و جابجایی جرم، مقدار مقاومت تغییر کرده و شتاب اندازه‌گیری می‌شود. این روش برای شتاب‌های ثابت و یا فرکانس پائین تا 30 Hz بکار می‌رود.

• شتاب سنج LVDT

این نوع شتاب سنج مانند شتاب سنج پتانسیومتری می‌باشد ولی بجای پتانسیومتر از LVDT (linear variable differential transformer) برای اندازه‌گیری جابجایی جرم استفاده شده است. جرم در این نوع شتاب سنج، همان هسته LVDT می‌باشد. این روش نیز برای شتاب ثابت و فرکانس پائین تا 80 Hz کاربرد دارد.

• شتاب سنج مغناطیسی متغیر

مانند شتاب سنج LVDT می‌باشد. جرم متحرک یک ماده مغناطیسی دائم می‌باشد که در یک سیم پیچ القایی حرکت کرده و در اثر حرکت ولتاژ القا می‌کند. در شتاب ثابت خروجی ندارد و فقط برای شتاب متغیر و برای فرکانس‌های کمتر از 100 Hz بکار می‌رود.

• شتاب سنج خازنی

در این نوع شتاب سنج با تغییر شتاب، ظرفیت خازنی شتاب سنج تغییر می‌کند و به وسیله یک مدار الکتریکی خروجی متناسب با شتاب تولید می‌شود. خازن‌ها به روش پل قرار می‌گیرند و با تغییر شتاب، صفحه‌الکترومیان جابجا می‌شود و خروجی تغییر می‌کند و می‌تواند شتاب ثابت (فرکانس صفر) تا حدود 1 KHz را نمایش دهد.

• شتاب سنج کرنشی

در این شتاب سنج اندازه‌گیری شتاب با تغییر فرم یک جرم معلق بوسیله یک استرین گیج سیلیکونی یا فویلی انجام می‌شود و می‌تواند شتاب ثابت تا چند صد هرتز را اندازه‌گیری کند.

• شتاب سنج پیزو رزیستیو

در این شتاب سنج جرم متحرک به یک لایه پیزورزیستیو وصل می‌شود و با تغییر شتاب، فشار وارد بر لایه پیزورزیستیو و به دنبال آن مقاومتش تغییر می‌کند و در نهایت خروجی سنسور تغییر کرده و می‌تواند شتاب ثابت تا 5 KHz را نمایش دهد.

• شتاب سنج خازنی MEMS

با پیشرفت صنایع نیمه هادی و آمدن تکنولوژی MEMS و نیاز گسترده صنایع خودروسازی و صنایع لوازم خانگی مصرفی به شتاب سنجهای ارزان قیمت، روشهای متنوعی برای طراحی و تولید شتاب سنجهای نیمه هادی با سایز کوچک، وزن کم، مدار تقویت ساده و از همه مهمتر قیمت پایین ابداع شدند و باعث انقلابی در صنایع مصرف کننده شتاب سنج شدند. برای مثال امروزه در اکثر خودروها در سیستم ایمنی کیسه هوای سرنشین، سیستم ترمز ضد قفل و سیستم پایداری خودرو در پیچ جاده، از شتاب سنجهای MEMS استفاده می‌شود.

در این نوع سنسورها، صفحات خازنی و جرم متحرک، با تغییر شتاب و تغییر فاصله الکترودها ظرفیت خازنی متغیر ایجاد می‌کنند و شتاب اندازه‌گیری می‌شود. این نوع شتاب سنج درباره شتاب ثابت دارای حساسیت بالا، دقت بالا و نویز کم می‌باشند.

شتاب سنجهای میکرو ماشین شده از پر مصرف ترین وسایل MEMS هستند؛ که به خاطر حجم، وزن، قیمت کم، کیفیت و عملکرد بهبود یافته آنها در حال افزایش مصرف در صنعت و یافتن کاربردهای جدید می‌باشند. این شتاب سنجهای با چند نوع مکانیزم از قبیل خازنی، استرین گیجی، پیزوالکتریک و تونل الکتریکی ساخته می‌شوند.

• شتاب سنج لیزری

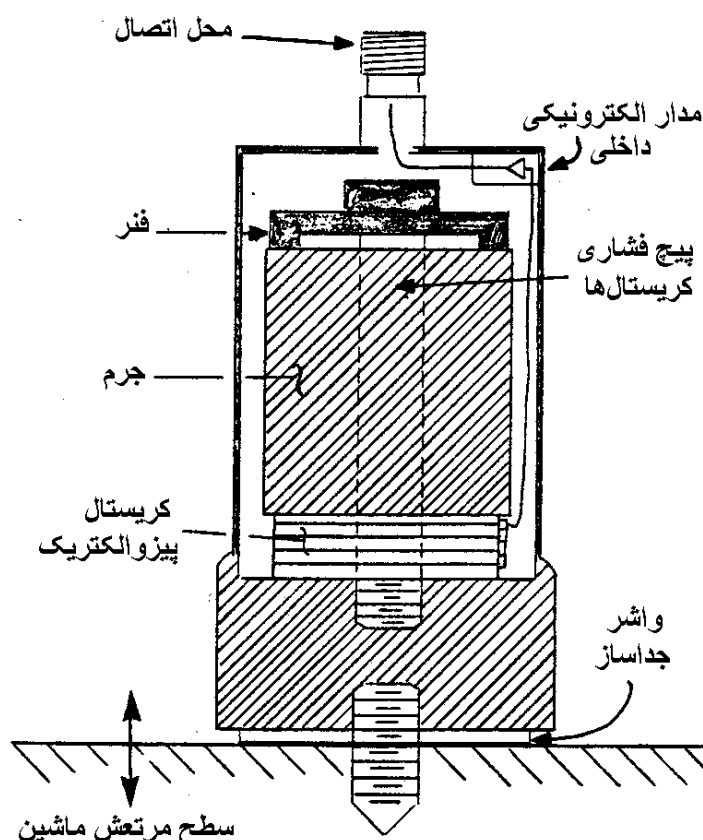
شتاب سنج های لیزری به روش غیر تماسی ارتعاشات را اندازه‌گیری می‌نمایند. در این شتاب سنجهای یک اشعه لیزر به سطح مورد نظر تابیده و با اندازه‌گیری جابجایی داپلر فرکانس یا فاز اشعه برگشتی از سطح، دامنه و فرکانس ارتعاش به دست می‌آید. معمولاً سیگنال خروجی این شتاب سنجهای که ویبرومتر لیزری داپلر (Laser Doppler Vibrometer) نیز نامیده می‌شوند، یک سیگنال ولتاژ آنالوگ پیوسته می‌باشد که متناسب با سرعت جسم در جهت ارتعاش مورد اندازه‌گیری می‌باشد. مهم ترین مزیت این نوع سنسورها استفاده در محلهایی است که امکان دسترسی به آنها خیلی مشکل می‌باشد یا خیلی کوچک هستند یا دارای حرارت خیلی بالایی باشند. در ضمن؛ این شتاب سنجهای هیچ گونه بارگذاری جرمی ندارند و برای اندازه‌گیری ارتعاش اجسام خیلی کوچک مفید می‌باشند. این شتاب سنج ها در بازرسی غیر مخرب هواپیماها، طراحی بلندگوها، عیب یابی تجهیزات موسیقی، تست سازه ها و پلها، آزمونهای خودرو، عیب یابی هارد دیسک کامپیوتر، معدن یابی و مسائل امنیتی و جاسوسی کاربرد دارند. این شتاب سنجهای دارای انواع نقطه ای، سه بعدی، زاویه ای، تفاضلی و... می‌باشند.

• شتاب سنج پیزو الکتریک

این شتاب سنج پر مصرف ترین و متداول ترین سنسور در اندازه گیری ارتعاشات و شوک بوده و دارای پهنای باند مناسب و نویز کم و حساسیت مطلوب می باشند. در این شتاب سنج یک جرم متحرک به یک کریستال پیزوالکتریک وصل می شود. با تغییر شتاب، نیروی وارده از جرم به کریستال پیزوالکتریک تغییر می کند و در اثر تنش ناشی از این نیرو، کریستال بار الکتریکی تولید می کند که شارژ نامیده می شود. برای تبدیل شارژ به ولتاژ یا جریان، آمپلی فایر استفاده می شود. با توجه به تولید شارژ توسط کریستال پیزوالکتریک، نیاز به منبع تغذیه ندارند. قطعات متحرک و بالطبع سایشی نیز ندارند تا به مرور مستهلک شوند. این شتاب سنج در شتاب ثابت خروجی ندارد. این شتاب سنجها می توانند در بازه چند هرتز تا حدود 30 KHz با حساسیت خروجی، وزن، اندازه و شکل مناسب برای کاربرد مورد نظر ساخته شوند.

کریستال پیزو در این شتاب سنج ها به سه روش فشاری (Compression) و برشی (Shear) و خمشی (Bender) نصب می شوند. در سالهای اخیر با توجه به مزایای ساختار برشی، این نوع شتاب سنج نسبت به بقیه کاربرد بیشتری دارد.

در عمل وقتی که سنسور به جسم در حال ارتعاش بسته شود، جرم تمایل به سکون دارد ولی پوسته سنسور همراه با جسم ارتعاش می کند و در نتیجه ماده پیزوالکتریک دائماً فشرده و رها می شود و در خروجی اش یک جریان الکتریکی (که دائماً علامتش عوض می شود) بدست می آید (شکل ۵). جریان خروجی متناسب با نیروی وارد شده به ماده پیزوالکتریک و در نتیجه (بر اساس قانون دوم نیوتن) متناسب با شتاب جسم مرتعش می باشد.



شکل ۵: اجزاء داخلی سنسور شتاب سنج پیزوالکتریک فشاری

در صورتی که محل نصب شتاب سنج به خاطر تغییرات دما و یا ساختار انعطاف پذیر آن و یا به هر دلیل دیگر دچار اعوجاج شود، باعث تولید یک سیگنال ناخواسته در خروجی می گردد که می تواند باعث بروز خطای اندازه گیری و تحلیل گردد.

با توجه به آنکه شتاب سنجهای پیزو به روش برشی نسبت به اعوجاج محل نصب حساسیت کمی دارند؛ در محل هایی که اعوجاج محل نصب زیاد است؛ مفید می باشند.

شتاب سنجهای پیزوالکتریک می توانند با کریستال های طبیعی و یا سرامیک ساخته شوند. کریستال های طبیعی کوارتز دارای حساسیت خروجی کم و قیمت بالاتر می باشند و می توانند در دماهای بالا نیز کار کنند و با گذشت زمان یا افزایش درجه حرارت، دچار تنزل درجه نمی شوند و پایداری و دقت و تکرارپذیری بیشتری دارند. کریستال های سرامیک ساخت بشر می باشند و می توانند حساسیت خروجی بیشتر و قیمت کمتر داشته باشند ولی نمی توانند در دماهای بالا کار کنند و با گذشت زمان یا افزایش درجه حرارت نیز دچار تنزل درجه می شوند. در بعضی مدلها از یک مدار مجتمع الکتریکی، در داخل شتاب سنج استفاده می شود که خروجی شارژ را به سیگنال ولتاژ تبدیل می کند.

این نوع شتاب سنجهای با منبع جریان ثابت تغذیه می شوند و یک خروجی ولتاژ که سوار بر یک ولتاژ DC می باشد؛ تولید می کنند، کلاً دارای دو سیم می باشند و خروجی، حساس به طول کابل نمی باشد. ولی این نوع سنسورها در کاربردهای دما بالا و یا محیط های دارای تشعشعات بالا قابل استفاده نمی باشند. این نوع سنسورهای دارای مدار تقویت کننده داخلی را گاهی IEPE یا ICP می نامند.

مزایای سنسورهای شتاب پیزوالکتریک

- اندازه گیری حرکت مطلق پوسته سنسور
- نصب آسان به قسمتهای خارجی ماشینها از طریق چسباندن و یا روشهای دیگر
- حساسیت یا عکس العمل دینامیکی خوب در محدوده فرکانسی ۵ تا ۱۰۰۰۰ هرتز
- ساختمان الکترونیکی با استحکام بالا
- محدوده کاری پایین تر از فرکانس طبیعی سنسور
- دارای انواع ویژه برای کار در محدوده های دمایی بالا
- دارای ساختارهای فیزیکی بسیار متنوع

معایب سنسور شتاب

- حساسیت به روش نصب و شرایط سطح
- ناتوانی در اندازه گیری موقعیت یا ارتعاشات شفت
- کالیبراسیون مشکل
- نیازمند به منبع انرژی الکتریکی خارجی (برای مدل های IEPE یا ICP)

۱-۳- مشخصه های فنی شتاب سنجهای پیزوالکتریک

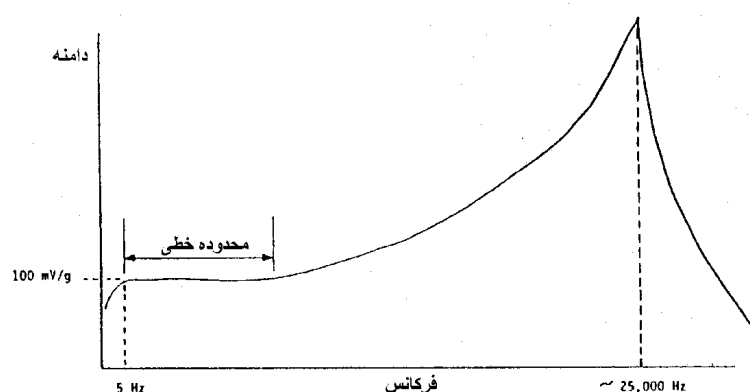
۱-۱-۳-۱- حساسیت

حساسیت (Sensitivity) یک شتاب سنج نسبت خروجی الکتریکی سنسور به ورودی مکانیکی آن می باشد و معمولاً بر اساس mV/g تعریف می شود و فقط در یک فرکانس اعتبار قطعی دارد (معمولاً در 100 یا 160 هرتز توسط سازنده یا مرکز کالیبراسیون اندازه گیری و ثبت می شود).

از طرف دیگر چون شتاب سنجها به دما نیز حساس می باشند این عدد در یک بازه ی دمایی خاص، برای مثال $25 \pm 5^\circ \text{C}$ اندازه گیری می شود. گاهی اوقات حساسیت با یک تِلرانس، معمولاً 5 یا 10 درصد مشخص می شود. این تضمین می دهد که تغییرات حساسیت نسبت به حساسیت نامی شتاب سنج در این ناحیه ی تِلرانس خواهد بود. این شاخص مهم ترین مشخصه در انتخاب شتاب سنج می باشد و باید سعی گردد تا با توجه به حداکثر شتاب مورد اندازه گیری، حساسیت مناسب انتخاب گردد. برای شتابهای خیلی بالا لازم است از حساسیت پایین و برای شتابهای خیلی کم از حساسیت بالا استفاده گردد تا مقدار سیگنال به نویز مناسبی داشته باشیم.

حساسیت سنسور در سیگنال کاندیشنر یا سیستم داده برداری برای تعریف و اندازه گیری سیگنال ورودی شتاب از سنسور به کار می رود. در بعضی از مدل‌های شتاب سنج یک حافظه ی قابل برنامه ریزی وجود دارد که اطلاعات سازنده، مشخصات سنسور، حساسیت و کالیبراسیون در آن ذخیره می باشد که به آن مشخصه ی فنی الکترونیک سنسور یا TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) گفته می شود. این نوع از شتاب سنجها در صورتی که به سیستم داده برداری یا کاندیشنر دارای قابلیت TEDS وصل شوند علاوه بر امکان ارتباط آنالوگ جهت خواندن اطلاعات شتاب، امکان برقراری ارتباط دیجیتال و خواندن اطلاعات فنی سنسور را دارا می باشند. در این صورت دیگر نیاز به تعریف حساسیت سنسور برای سیستم واسط نمی باشد.

حساسیت شتاب سنجها نسبت به فرکانس بطور کلی در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس سختی کریستال‌ها و فنر فولادی، عموماً شتاب سنجهایی که برای مانیتورینگ ماشینها بکار می‌روند، دارای فرکانس تشدید بسیار بالایی می‌باشند (بالاتر از ۲۵۰۰۰ هرتز).

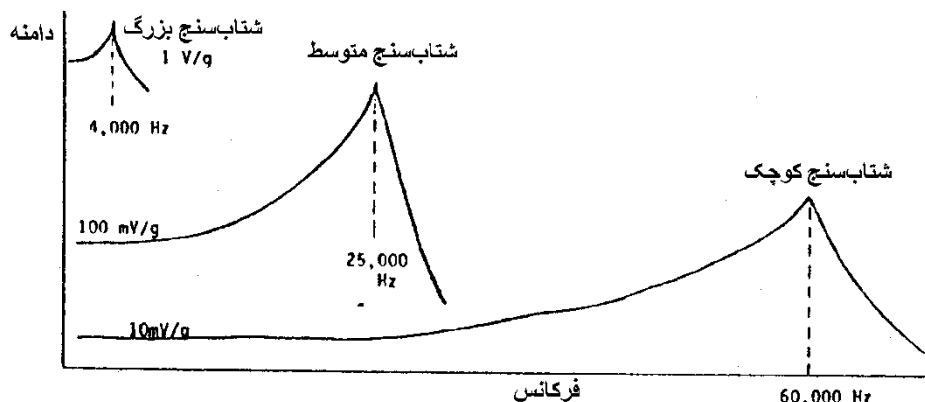


شکل ۶: حساسیت شتاب سنجها بر حسب فرکانس

(محدوده خطی کمتر از ۳۰ درصد فرکانس تشدید سنسور می باشد)

با توجه به شکل ۶ مشخص است که محدوده خطی عملکرد سنسور از حدود ۲ هرتز تا حدود ۳۰ درصد فرکانس تشدید می باشد. بر خلاف سنسور سرعت، شتاب سنج در محدوده فرکانسی پایین‌تر از فرکانس تشدیدش کار می‌کند.

محدوده کاری مفید شتاب‌سنجها معمولاً بین ۵ تا ۱۰۰۰۰ هرتز می‌باشد (که به ابعاد شتاب‌سنج بستگی دارد). بنابراین وسعت کاربرد شتاب‌سنجها خیلی بیشتر از سنسورهای سرعت و جابجایی می‌باشد. حساسیت و پاسخ فرکانسی شتاب‌سنجها، با ابعاد هندسی آنها رابطه مستقیم دارد (شکل ۷) شتاب‌سنجهای کوچک حساسیت کمتری دارند، اما دارای محدوده کاری وسیعی می‌باشند (زیرا فرکانس تشدید بالایی دارند). شتاب‌سنجهایی بزرگ، حساسیت بیشتری دارند اما محدوده فرکانسی آنها کوچکتر است (زیرا فرکانس تشدید پایینی دارند).



شکل ۷: حساسیت سنسورهای شتاب نسبت به فرکانس طبیعی

۱-۳-۲- جرم و سائز شتاب سنج

وزن و سائز شتاب سنج در بسیاری از کاربردها اهمیت بالایی دارند و هر چه وزن و سائز آن کمتر باشد اثرش بر روی پاسخ ارتعاش محل آزمون و در نتیجه اندازه گیری ارتعاش کمتر خواهد شد. در مورد قطعات و سازه های سبک و کوچک این مسئله اهمیت بیشتری می یابد ولی کاهش وزن و سائز معمولاً منجر به کاهش حساسیت خروجی شتاب سنج و همینطور افزایش قیمت آن می شود. معمولاً لازم است وزن شتاب سنج کمتر از یک دهم وزن جسم مرتعش باشد.

۱-۳-۳- پاسخ فرکانسی

پاسخ فرکانسی شتاب سنج، حساسیت آن را در کل بازه ی فرکانسی کارکرد آن نشان می دهد. معمولاً بازه ی کاری شتاب سنج در فرکانس های کمتر از یک سوم فرکانس رزونانس آن می باشد. بنابراین باید در انتخاب شتاب سنج به این مسئله دقت نمود. در حین کار نیز می توان از یک فیلتر الکتریکی یا مکانیکی برای حذف فرکانس های نزدیک به فرکانس رزونانس استفاده نمود.

۱-۳-۴- حساسیت عرضی

حساسیت عرضی (Transverse Sensitivity)، حساسیت شتاب سنج در حالتی می باشد که بصورت ۹۰ درجه نسبت به محور ارتعاش نصب شده باشد و با درصد نسبت به حساسیت سنسور نمایش داده می شود. حالت ایده آل

آن صفر است اما تا حدود 5% هم می‌تواند مورد قبول واقع شود. حساسیت عرضی گاهی حساسیت عمود بر محور نیز نامیده می‌شود. این شاخص به این دلیل اهمیت دارد که شما می‌خواهید مطمئن باشید خروجی دریافتی از شتاب سنج شما فقط مربوط به ارتعاشات در محوری است که شتاب سنج را نصب کرده‌اید. شتاب سنج‌های سه محوره برای اندازه‌گیری ارتعاش در سه محور عمود برهم در یک نقطه وجود دارند.

در هنگام کالیبراسیون سنسور ارتعاش، معمولاً تجهیزات ارتعاشی کالیبراسیون (شیکرها Shakers) بنحوی ساخته می‌شوند که حرکت‌های جانبی بسیار کمی داشته باشند و ارتعاش تقریباً فقط در یک محور ایجاد می‌شود. لذا حساسیت اندازه‌گیری شده فقط ناشی از ارتعاش در محور شتاب سنج می‌باشد. ولی در سازه‌های واقعی، ارتعاش در تمامی جهات وجود دارد و همین امر باعث اهمیت بیشتر حداقل بودن حساسیت عرضی می‌شود.

۱-۱-۳-۵- فرکانس رزونانس

فرکانسی می‌باشد که بالاترین حساسیت را در منحنی پاسخ فرکانسی شتاب سنج داراست و برحسب Hz بیان می‌شود و ناشی از رزونانس طبیعی سازه‌ی مکانیکی بدنه‌ی شتاب سنج می‌باشد. فرکانس رزونانس شتاب سنج در حالتی که به عنوان یک سازه‌ی آزاد بررسی شود متفاوت می‌باشد ولی به لحاظ کاربرد در اندازه‌گیری ارتعاش، فرکانس رزونانس شتاب سنج به صورت نصب شده، مهم می‌باشد. این فرکانس حداقل فرکانسی است که قبل از آن رزونانسی رخ نمی‌دهد و حد بالای پاسخ فرکانسی شتاب سنج را تعیین می‌کند. در شتاب سنج‌های پیزوالکتریک دامنه‌ی فرکانس رزونانس بسیار زیاد است. واضح است که خروجی شتاب سنج در اطراف فرکانس رزونانس بسیار زیاد و غیر واقعی می‌باشد. هنگام انتخاب شتاب سنج یا بازه‌ی اندازه‌گیری ارتعاش، باید سعی شود محدوده‌ی اندازه‌گیری نزدیک به فرکانس رزونانس سنسور نباشد.

اگر به طور صحیح شتاب سنج نصب نشود، سختی آن کم و میرایی آن زیاد می‌شود و در نتیجه ضریب کیفیت مکانیکی کم می‌شود و فرکانس رزونانس کاهش و دامنه‌ی رزونانس افزایش می‌یابد و در نتیجه بر پاسخ فرکانسی اثر می‌گذارد. فرکانس رزونانس نصب شده وابسته به سختی نصب می‌باشد. روش نصب سنسورهای شتاب به کمک موم زنبور عسل، چسب دو طرفه، چسب قطره‌ای یا پیچ و مهره می‌باشد. نصب با پایه مغناطیسی دارای کمترین سختی نصب و نصب با پیچ و مطابق با گشتاور مشخص توسط سازنده بر روی سطح صاف سخت، بالاترین سختی نصب را دارد.

در هنگام نصب باید مطمئن شد که رزوه‌ی اضافه‌ی پیچ، بین شتاب سنج و سطح نصب باقی نماند؛ یعنی تمام رزوه‌ی مورد نیاز در شتاب سنج پیچیده شده باشد و الباقی رزوه همگی در محل نصب بسته شده باشد تا به بالاترین فرکانس ممکن برسد.

۱-۱-۳-۶- نویز ارتعاش کابل

در شتاب سنج‌های خروجی شارژ، با حرکت و ارتعاش کابل شتاب سنج، مقداری نویز در خروجی تولید می‌شود که برای حذف آن لازم است کابل شتاب سنج بوسیله چسب یا بست مهار شود تا ارتعاش نداشته باشد.

۱-۳-۷- محدوده ی دینامیک

محدوده ی بین حداقل و حداکثر شتاب قابل اندازه گیری توسط شتاب سنج را محدوده ی دینامیک آن می نامند. در حداقل شتاب، عامل محدود کننده ی تقویت سیگنال خروجی شتاب سنج، نویز سیستم الکترونیک می باشد و در حداکثر شتاب، عامل محدود کننده، حداکثر ولتاژ تغذیه مدار می باشد. عامل محدود کننده ی دیگر در حداکثر شتاب، ساختار مکانیکی سنسور و حداکثر تحمل شتاب آن (پیش از آسیب دیدن اجزای داخلی آن) است. اگر حداکثر ولتاژ خروجی شتاب سنج 5 V و حساسیت آن 100 mV/g باشد، محدوده ی دینامیک سنسور ± 50 g خواهد بود و اگر حساسیت آن 10 mV/g باشد، محدوده ی دینامیک سنسور ± 500 g خواهد بود.

۱-۳-۸- مشخصه های الکتریکی و محیطی

در بخش مشخصه های الکتریکی به پارامترهایی از قبیل ولتاژ و جریان تغذیه، امپدانس خروجی، مقاومت عایقی، ظرفیت خازنی و ... اشاره می شود. در بخش مشخصه های محیطی، محدوده ی قابل تحمل شرایط محیطی کارکرد شتاب سنج از قبیل دما، رطوبت، ارتعاش، شوک و ... مشخص می باشند. در صورتی که شرایط محیطی عملکردی خارج از محدوده های مشخص شده قرار گیرند اطلاعات خروجی شتاب سنج معتبر نمی باشند و حتی ممکن است شتاب سنج آسیب دائمی دیده و خراب شود.

۱-۴- روشهای نصب سنسورهای شتاب سنج و سرعت سنج

سنسورها به طرق مختلفی روی ماشینهای در حال ارتعاش نصب می شوند. معیار انتخاب یک روش، راحتی نصب و بدست آوردن پاسخ فرکانسی مطلوب می باشد. لازم است که سنسورها طوری به سطح متصل شوند، که سطح و سنسور بدون جدایش و با هم حرکت کنند. در مرحله نصب سنسورها باید به نکات زیر توجه داشت [۵-۱]:

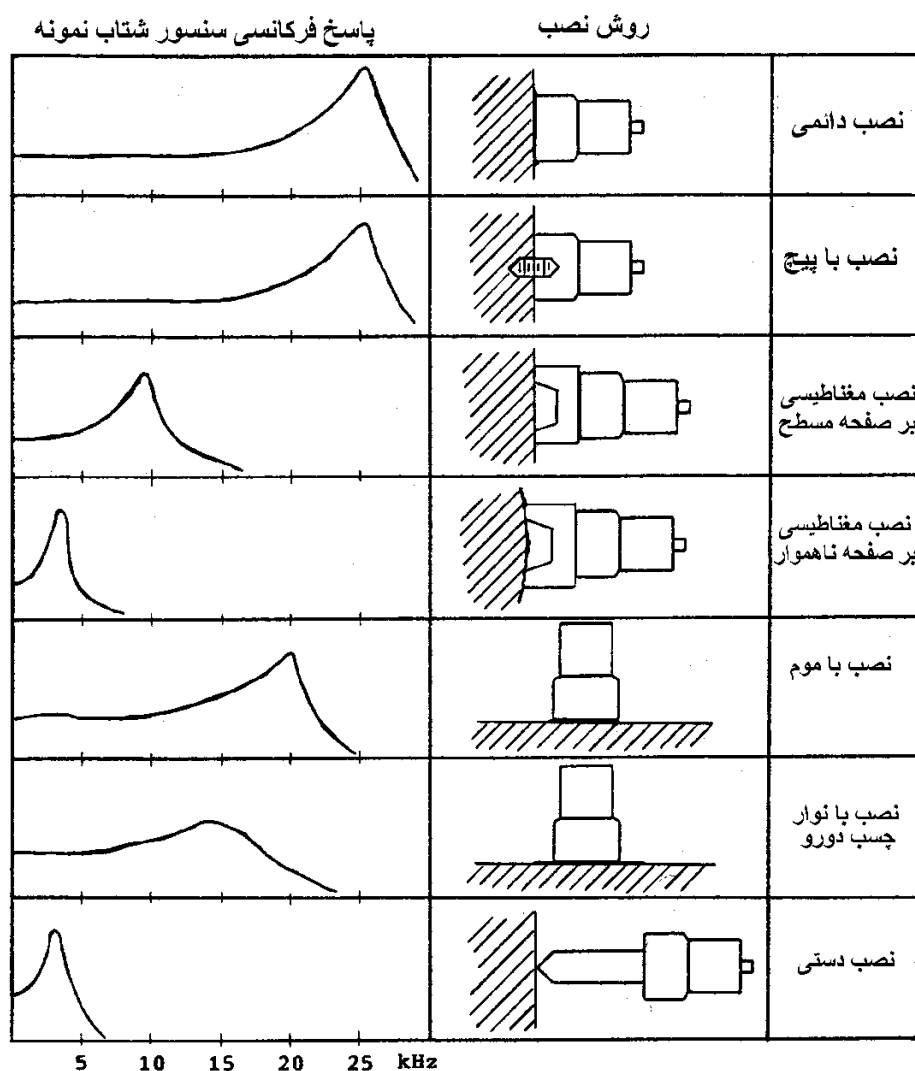
- فرکانس ارتعاشات بدون تغییر به تمام اجزاء ماشین انتقال می یابد (زیرا فرکانس مشخصه منبع ارتعاش است و با جابجایی نقطه اندازه گیری روی جسم تغییر نمی کند).
- با نزدیک شدن به منبع ارتعاشات، دامنه ارتعاشات افزایش می یابد. زیرا دامنه ارتعاشات، وابسته به سختی جسم و مسیر انتقال امواج ارتعاشی (از منبع تا نقطه اندازه گیری) می باشد.
- فرکانسهای بالا خیلی سریع میرا می شوند، بنابراین برای اندازه گیری دامنه ارتعاشات فرکانسهای بالا باید سنسور در نزدیکترین نقطه ممکن به منبع ارتعاش نصب شود.
- بطور کلی هرچه اتصال سنسور به جسم محکم تر و صلب تر باشد فرکانسهای بالاتری را می تواند دریافت کند و برعکس هرچه اتصال ضعیف تر باشد، سختی مسیر انتقال کمتر شده و فرکانسهای بالا میرا شده و از دست می روند.

روشهای مختلف نصب شتابسنجها (یا سرعتسنجها) عبارتند از:

- نصب دائمی (Permanently bonded)

- نصب با پیچ (Stud mounted)
- نصب مغناطیسی (Attached with a magnet)
- نصب با موم مخصوص (Attached with beeswax)
- نصب با نوار چسب دو رو (Attached with double sticky tape)
- نصب دستی (نگهداشتن پراب با دست) (Hand held)

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، پاسخ فرکانسی به روش نصب بستگی دارد. در این شکل فرکانس تشدید شتاب‌سنج حدود ۲۵ KHz می‌باشد و برای اندازه‌گیری صحیح و پاسخ خطی، همیشه لازم است که محدوده اندازه‌گیری خیلی کمتر از مقدار فرکانس تشدید شتاب‌سنج باشد (حدود ۳۰ درصد فرکانس تشدید).



شکل ۸: بررسی تاثیر روش نصب شتاب‌سنج‌ها در پاسخ فرکانسی آنها

در زیر سه روش معمول نصب سنسورها شرح داده شده است:

♦ نصب با پیچ

مناسبت‌ترین روش برای اندازه‌گیری مداوم ارتعاشات با فرکانس بالا نصب دائمی سنسور می‌باشد که نصب با پیچ نوعی از آن است. برای حذف خطا از تکنیک‌های مونتاز (روش دستی یا مغناطیسی)، بهتر است که از روش مونتاز دائمی توسط پیچ کردن سنسور به ماشین استفاده شود. با این روش هم تکرار اندازه‌گیری‌ها امکان‌پذیر می‌شود و هم امکان اندازه‌گیری در فرکانس‌های بالا بوجود می‌آید.

♦ نصب مغناطیسی

متداول‌ترین روش نصب سنسورهای سرعت‌سنج یا شتاب‌سنج بمنظور پایش وضعیت موقت ماشین‌ها، نصب مغناطیسی می‌باشد. برای اینکه سنسور روی سطح نوسان نکند، باید موقعیت آهن‌ربا تنظیم شود. در صورتیکه اندازه‌گیری‌ها متناوباً برای مقایسه لازم به تکرار باشند، باید موقعیت سنسور روی نقطه قبلی تنظیم شود.

♦ نصب دستی

وقتی یک شتاب‌سنج بطور محکم در دست گرفته شود، فرکانس تشدید مونتاز آن کاهش می‌یابد. نگهداشتن سنسورها در دست، برای اندازه‌گیری ارتعاشات سطح خارجی ماشین، در زمان کم (در صورتیکه فرکانس ارتعاشات خیلی کم باشد و پایه مغناطیسی در دسترس نباشد) استفاده می‌شود.

۱-۱-۵- موقعیت نصب سنسورها

انتخاب محل مناسب نصب سنسورها برای اندازه‌گیری پارامترهای ارتعاشی بسیار مهم می‌باشد زیرا که انتخاب نامناسب مساوی با اتلاف وقت، هزینه و ثبت داده‌های غلط می‌باشد. سنسورها معمولاً در محل یاتاقانها یا در مکانهایی که محور دارای بیشترین حرکت باشد نصب می‌شوند. بنابراین نقاطی مانند کوپلینگها، آبدها، فلنجهای محور و یاتاقانها معمولاً محل‌های مناسبی جهت نصب سنسورها می‌باشند. همچنین باید توجه شود که نقطه ای که سنسور نصب می‌شود صلب و استحکام بالایی داشته باشد و درپوشها و ورق‌های خیلی نازک برای نصب مناسب نیستند چون سختی کمی دارند. در حالت ایده آل بهتر است که روی هر یاتاقان، ۳ سنسور در راستاهای افقی، عمودی و محوری نصب شوند. برای مانیتورینگ ساده، لازم نیست که روی هر یاتاقان ۳ سنسور نصب شود (در سه راستا)، بلکه یک سنسور در راستایی که بیشترین ارتعاشات را دارد کافی است.

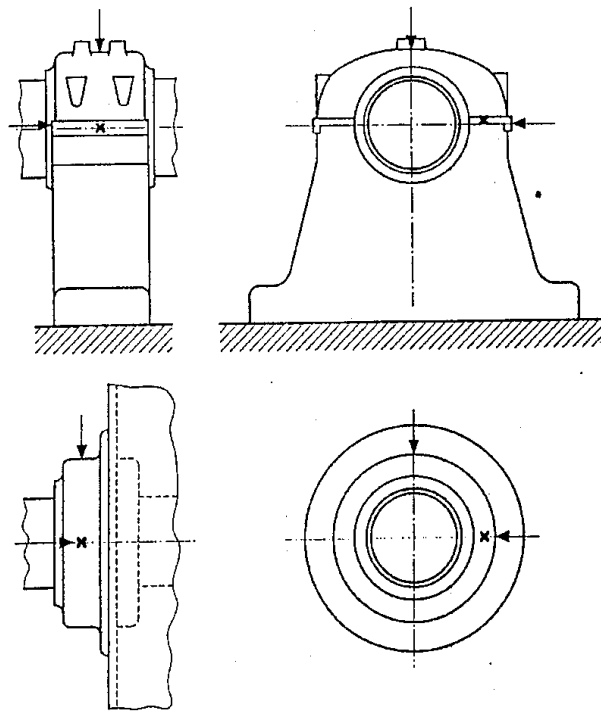
بطور کلی اجزائی از ماشین که سنسورها روی آنها نصب می‌شوند بر دو نوعند :

♦ اجزاء ثابت

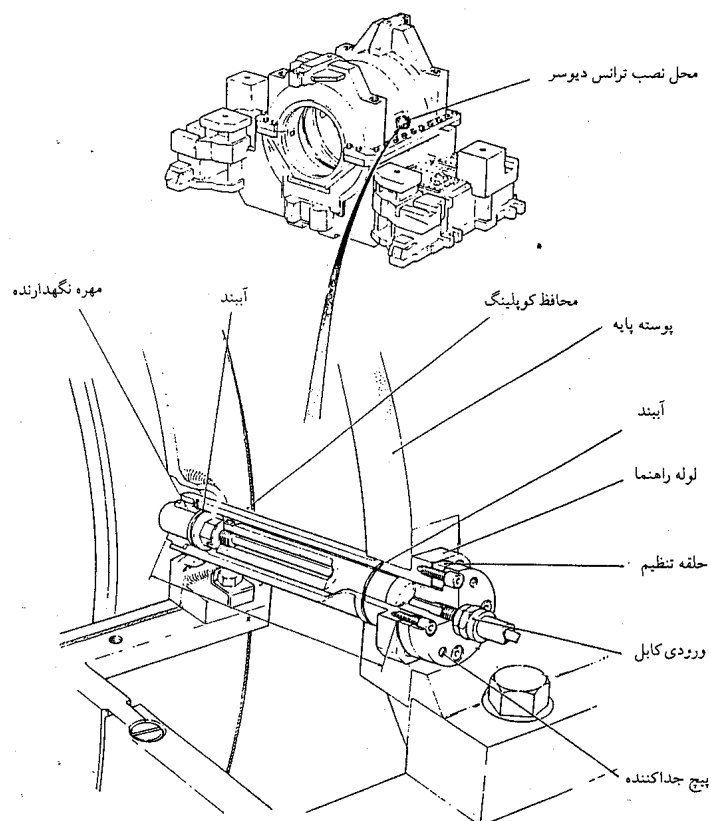
برای این کار از سنسورهای شتاب سنج یا سرعت سنج استفاده می‌شود. استاندارد ISO 10816-1، محل نگهدارنده‌های یاتاقانها را مطابق شکل ۹ پیشنهاد می‌دهد. اندازه‌گیری در سه جهت قائم، افقی و محوری ترجیح داده می‌شوند. عموماً ارتعاشات محوری را در نزدیکی یاتاقانی که نیروی محوری به آن وارد می‌شود، اندازه‌گیری می‌کنند.

♦ اجزاء دوار

در این حالت که برای اندازه‌گیری ارتعاشات و یا موقعیت استاتیکی شفت استفاده می‌شود، معمولاً محل قرار گیری سنسور غیرتماسی بر روی پوسته یاتاقانها می‌باشد (شکل ۱۰).



شکل ۹: موقعیتهای اندازه‌گیری پارامترهای ارتعاشی روی یاتاقان‌ها بر اساس استاندارد



شکل ۱۰: چگونگی نصب سنسور جابجایی بر روی یاتاقان

۱-۱-۶- شرکت‌های سازنده سنسورهای ارتعاشی

شرکت‌های زیادی در دنیا در زمینه ساخت سنسورهای ارتعاشی فعالیت می‌کنند که نام برخی از معتبرترین آنها در زیر آورده شده است:

Bently Nevada, Metrix, Monitran, PCB, B&K Vibro, Endevco, Analog Devices, Motorola, Silicon-Designs, Polytec, HBM, Update International,...

در ادامه مشخصات برخی از سنسورهای ارتعاشی برای نمونه آورده شده است [۶].

۱-۱-۶-۱- شرکت Brüel & Kjær Vibro (دانمارک)

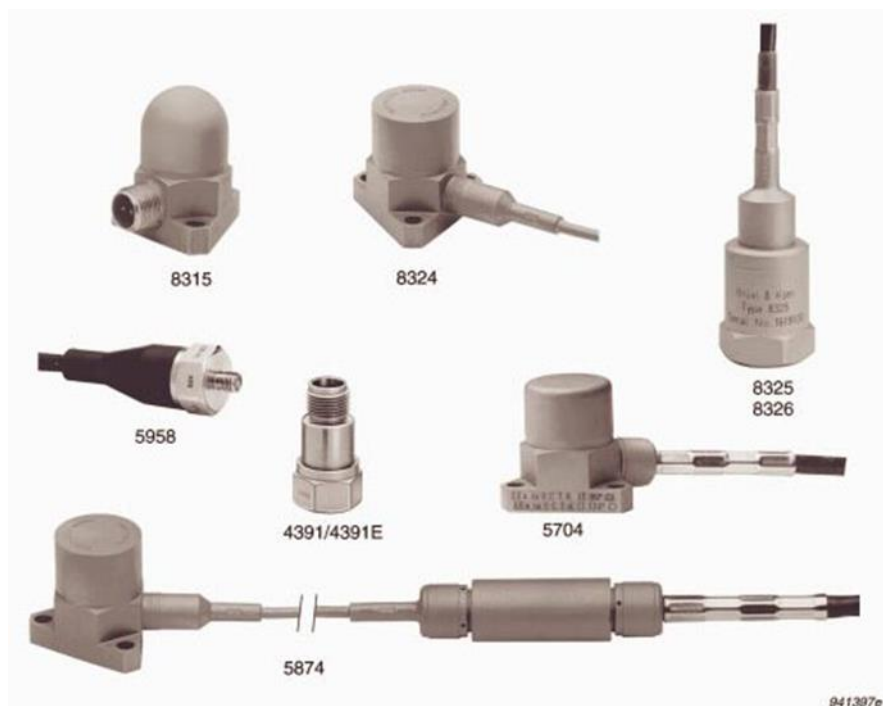
سنسورهای این شرکت دانمارکی در زمینه ارتعاشات به سه دسته (شتاب سنج، سرعت سنج و جابجایی سنج) تقسیم می‌شوند که در زیر به خصوصیات برخی از این سنسورها اشاره می‌شود:

الف) شتاب سنج

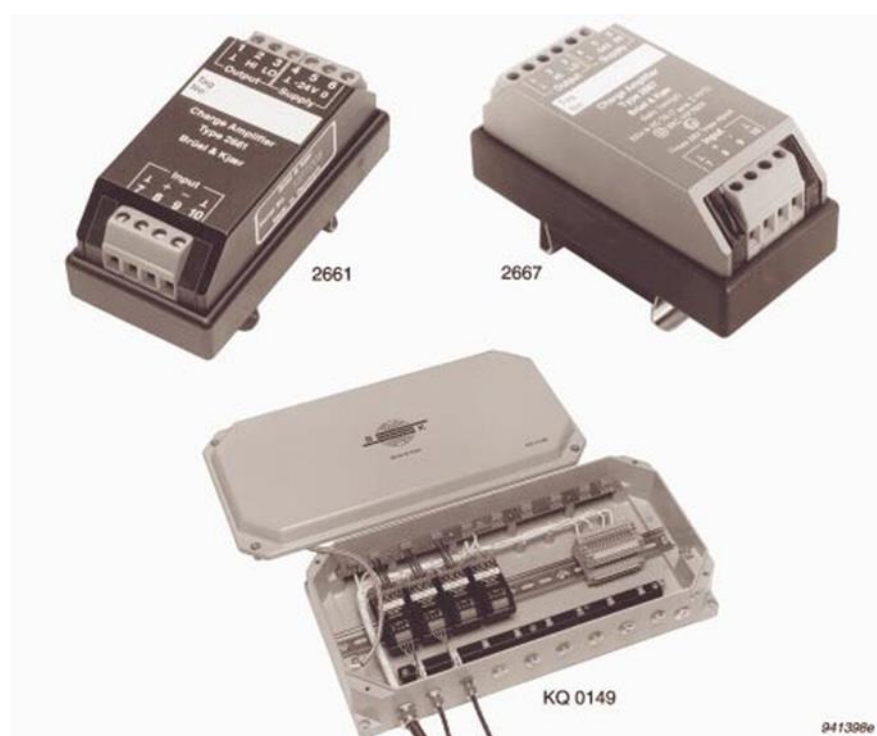
شتاب سنج‌های این شرکت (شکل ۱۱) از دو نوع اصلی با خروجی بار الکتریکی (مدلهای ۸۳۱۵ و ۵۸۷۴) یا ولتاژ (مدلهای AS20 و AS30) می‌باشند که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. همچنین تمامی شتاب سنج‌ها به درایور یا همان تغذیه سنسور (شکل ۱۲) متصل می‌شوند.

جدول ۱: مشخصات کلی برخی از سنسورهای شتاب‌سنج شرکت B&K

نوع سنسور	AS-020	AS-030	5874	8315
بازه دامنه	(ولتاژ منبع -20 V $\pm 40\text{ g}$)	(ولتاژ منبع -20 V $\pm 40\text{ g}$)		
ماکزیمم دامنه اندازه‌گیری	40 g	40 g	20000 m/s ²	2000 m/s ²
حساسیت	10.2 mV/m/s ²	10.2 mV/m/s ²	1 pC/ms ⁻²	10 pC/ms ⁻²
فرکانس رزونانس	35 kHz	20 kHz	45 kHz	27 kHz
پاسخ فرکانسی	4 to 10 kHz ($\pm 0.5\text{ db}$) 1.5 to 15 kHz ($\pm 3\text{ db}$)	3 Hz to 10 kHz ($\pm 0.5\text{ db}$) 1 Hz to 15 kHz ($\pm 3\text{ db}$)	9 KHz تا 1 Hz	10 KHz تا 1 Hz
مقاومت به ضربه	5000 g	5000 g	20000 m/s ²	10000 m/s ²
وزن	70 gr	60 gr		
بازه دمایی	Operating: -50 °C to +125 °C Storage: -50 °C to +150 °C	Operating: -50 °C to +125 °C Storage: -50 °C to +150 °C	-60 °C to +400 °C	-53 °C to +260 °C



شکل ۱۱: سنسورهای شتاب سنج شرکت B&K



شکل ۱۲: درایور (تغذیه) سنسورهای شتاب سنج و جانکشن باکس حاوی ۴ عدد درایور

(ب) سرعت سنج

سرعت سنجها نیازی به درایور یا تغذیه ندارند. در شکل ۱۳ یک نمونه سرعت سنج شرکت B&K مشاهده می شود که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات کلی سنسور سرعت سنج شرکت B&K

VS-077	نوع سنسور
افقی و عمودی	جهت اندازه‌گیری
75 mV/mm/s	حساسیت
15 Hz±2%	فرکانس طبیعی
1 mm	حداکثر جابجائی ارتعاشی
3	امپدانس داخلی
200 m حداکثر	طول کابل سیگنال
1500 gr تقریباً	وزن (بدون کابل)
Stainless Steel	جنس محفظه
Operating: -40 to +80 °C	بازه دمایی



شکل ۱۳: سنسور سرعت سنج VS-077

ج) سنسورهای جابجائی غیر تماسی

سنسورهای جابجائی (شکل ۱۴) ساخته شده توسط B&K که برای اندازه‌گیری جابجائی و ارتعاشات نسبی شفت و همچنین به عنوان سنسورهای فاز مرجع به کار گرفته می‌شوند، به دو دسته زیر تقسیم می‌گردند:

- نوع مجزا (Discrete) که قسمتهای مختلف آن شامل سنسور، کابل واسط و نوسان ساز از هم جدا هستند.
 - نوع مجتمع (Integrated) که در آن، کابل واسط و نوسان ساز در بدنه سنسور قرار دارند.
- هر یک از این دو نوع دارای مزایای مشخص و کاربردهای مختلف هستند و در نحوه انتخاب آنها باید دقت نمود. به عنوان نمونه، در جدول ۳ برای هر یک از انواع فوق، مشخصات یک سنسور آورده شده است:

جدول ۳: مشخصات سنسورهای جابجایی

IN – 081/083/084/085	SD – 051/052/053/054	سنسور جابجایی
مجتمع	مجزا	نوع

0.4-2.4 mm	0.8-2.8 mm	ماکزیمم جابجائی قابل اندازه‌گیری
0-2600 Hz	0-4200 Hz	دامنه فرکانسی عملکرد
8 mV/ μ m	8 mV/ μ m	حساسیت
1.5 mm	2 mm	دامنه اندازه‌گیری جابجائی
نیاز ندارد	OD - 051	مدل نوسان ساز
(0) - (110) °C	(-30) - (180) °C	بازه دمائی عملکرد



شکل ۱۴: سنسورهای جابجایی سنج (سمت راست) و نوسان سازشان (سمت چپ)

۱-۱-۶-۲- شرکت Analog Devices (آمریکا)

شرکت Analog Devices (A.D.) تولیدکننده انواع سنسور در ابعاد کوچک و دارای عملکرد مناسب و مصرف پایین است. این شرکت در تولید شتاب سنج‌های کوچک خود از تکنولوژی MEMS استفاده کرده است. مدل‌های ADXL، پایه شتاب‌سنج‌های این شرکت هستند که از پردازشگرهای MEMS در کاربردهای مختلف صنعتی بهره‌گرفته‌اند. شتاب سنج‌های MEMS در بازه‌های اندازه‌گیری مختلف موجود هستند و برای اندازه‌گیری موقعیت، حرکت، شک و ارتعاشات در کاربردهای گوناگون استفاده می‌شوند. مدل‌های ADXL برای کاربردهای حجم بالا و اقتصادی مناسب است، در حالیکه مدل‌های ADIS (سنسورهای هوشمند)، طرح‌ها و قابلیت‌های بیشتری دارند. در جدول ۴ به مشخصات برخی از سنسورهای شتاب سنج شرکت A.D. اشاره می‌شود:

جدول ۴: مشخصات کلی سنسورهای شتاب‌سنج شرکت Analog Devices

ADIS 16201	ADIS 16003	ADXL193 (High-g accelerometer)	ADXL203 (Low-g accelerometer)	نوع سنسور
2	2	1	2	تعداد محور
±200g	±5 g	±250 g	±1.7 g	بازه اندازه‌گیری
2 LSB/g	820 LSB/g	8 mV/g	1000 mV/g	حساسیت
دیجیتال SPI	دیجیتال SPI	آنالوگ	آنالوگ	نوع خروجی

2.25 kHz	2.2 kHz	0.4 kHz	2.5 kHz	پهنای باند
110 mg/rt Hz	110 mg/rt Hz	4 mg/rt Hz	110 mg/rt Hz	چگالی نویز
3-3.6 V	3-5.25 V	4.75-5.25 V	3-6 V	ولتاژ منبع
12 mA	8 mA	2 mA	0.7 mA	جریان منبع
-40 to 125 °C	-40 to 125 °C	-40 to 125 °C	-40 to 125 °C	بازه دمایی

۱-۶-۳- شرکت بنتلی Bently Nevada (آمریکا)

این شرکت آمریکایی معتبرترین شرکت در زمینه تولید تجهیزات پایش وضعیت ارتعاشی در دنیا می باشد.

الف) سنسورهای شتاب‌سنج

مشخصات تعدادی از شتاب‌سنج‌های شرکت بنتلی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات سنسورهای شتاب‌سنج شرکت Bently

نوع سنسور	330425 و 330400	200355 و 200350	200157 & 200155, 200150	177230
بازه دامنه	33400: 490 m/s ² (50 g peak) 33425: 735 m/s ² (75 g peak)	490 m/s ² (50 g peak)	200150: ±245 m/s ² 200155: ±196 m/s ² 200157: ±245 m/s ²	196 m/s ² (20 g peak)
حساسیت	33400: 10.2 mV/m/s ² (100 mV/g) ±5% 33425: 2.5 mV/m/s ² (25 mV/g) ±5%	200350: (100 mV/g) ±20% 200355: (100 mV/g) ±5%	10.2 mV/m/s ² (100 mV/g)	10.2 mV/m/s ² (100 mV/g) ±5%
دامنه‌ی خطی بودن	33400: ±1% to 490 m/s ² (50 g peak) 33425: ±1% to 735 m/s ² (75 g peak)	±1% to 490 m/s ² (50 g peak)	1 to 10 g peak ±2%	±1%
دمای کاری و دمای نگهداری	-55 °C to +121 °C	-54 °C to +121 °C	-40 °C to +105 °C	-40 °C to +85 °C
رطوبت نسبی محل کار و نگهداری	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	95%, noncondensing 100%, non-submerged
میزان مقاومت در برابر ضربه	49.050 m/s ² (5000g) peak maximum	49.050 m/s ² (5000g) peak maximum	49.050 m/s ² (5000 g) peak maximum	9.810 m/s ² (1 g peak)
پاسخ فرکانسی	10 Hz to 15 KHz ±3db 30 Hz to 10 KHz ±10 db	200350: 0.5 Hz to 10 KHz ±3db 200355: 0.2 Hz to 10 KHz ±3db	200150: 10 Hz to 1 KHz ±10% 200155: 1.5 Hz to 10 KHz ±10% 200157: 10 Hz to 10 KHz ±10%	Current loop velocity vibration: 10 Hz to 1 kHz ±10% Voltage, Acceleration: 2.5 to 10 kHz ±10%

Greater than 12 kHz	بزرگ‌تر از 20 kHz	200350: 25 kHz 200355: 20.8 kHz	بزرگ‌تر از 30 kHz	فرکانس رزونانس در حالت نصب شده
2.5 V±0.1 V	+2.5±0.23 Vdc	8 to 12 Vdc	-8.5±0.5 Vdc	ولتاژ خروجی bias
-	-	-	2 mA nominal	جریان bias
-	-24±0.5 Vdc	-	-24±0.5 Vdc	ولتاژ ورودی
-	25 m	350 m	350 m با هیچ‌گونه تأثیر مخربی بر روی سیگنال	ماکزیمم طول کابل
131 gr	58 gr	200350: 51 gr 200355: 94 gr	99 gr	وزن بدون کابل
316L stainless steel	-	stainless steel	316L stainless steel	جنس بدنه
-	-	-	در هر جهت دلخواه	زاویه نصب

ب) سنسورهای سرعت‌سنج

مشخصات تعدادی از سرعت‌سنج‌های شرکت بنتلی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات کلی سنسورهای سرعت‌سنج شرکت Bently

9200 and 74712	330505	نوع سنسور
20 mV/mm/s±5%	20 mV/mm/s±10%	حساسیت
-	±3% to 102 mm/s (4 in/s peak)	دامنه‌ی خطی بودن
2.54 mm peak to peak maximum displacement	-	دامنه عملکرد دینامیکی
9200: -29 °C to +121 °C 74712: -29 °C to +204 °C	-40 °C to +100 °C	دمای کاری و دمای نگهداری
95%, noncondensing 100%, non-submerged	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	رطوبت نسبی محل کار و نگهداری
Withstands 50 g peak maximum acceleration along nonsensitive axis	981 m/s ² (100 g) peak maximum	میزان مقاومت در برابر ضربه
Minimum operating frequency to 1 kHz	0.5 Hz to 1 KHz (30 cpm to 60,000 cpm) ±3db	پاسخ فرکانسی
-24±0.5 Vdc	-	ولتاژ ورودی
305 m	305 m	ماکزیمم طول کابل
9200: 300 gr 74712: 480 gr	<375 gr	وزن
Anodized aluminum A204	300 series stainless steel	جنس بدنه

ج) سنسورهای جابجایی‌سنج

این سنسورها شامل ۳ جزء زیر می‌باشند: پراب (probe)، کابل الحاقی (extension)، ترانسمیتر (پراکسی‌متر) مشخصات این سنسورها در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷: مشخصات سنسورهای جابجایی سنج شرکت Bently

3300 XL 11 mm	3300 XL 8 mm	نوع سنسور
0.5 to 4.5 mm	0.25 to 2.3 mm	دامنه‌ی خطی بودن
-51 °C to +100 °C	-51 °C to +100 °C	دمای کاری و دمای نگهداری
100%	93%	رطوبت نسبی محل کار و نگهداری
50 Ω	50 Ω	مقاومت خروجی
8 kHz تا 0	10 kHz تا 0	پاسخ فرکانسی
-17.5 Vdc to -26 Vdc	-23 Vdc to -26 Vdc	ولتاژ ورودی
305 m	305 m	ماکزیمم طول کابل
255 gr	246 gr	وزن سنسور
-	0.7 kg	وزن کل سیستم سنسور
Polyphenylene Sulfide (PPS)	Polyphenylene Sulfide (PPS)	جنس پراب
AISI 303 or 304 Stainless Steel	AISI 303 or 304 Stainless Steel	جنس بدنه پراب

۱-۶-۴- شرکت Meggitt (Vibrometer) (سوئیس)

این شرکت سوئیسی که بیشتر به Vibrometer شهرت دارد هر سه نوع سنسور ارتعاشی را تولید می نماید.

الف) سنسورهای شتاب‌سنج

مشخصات کلی سنسورهای شتاب‌سنج این شرکت جدول ۸ آمده است.

جدول ۸: مشخصات کلی سنسور شتاب‌سنج‌های شرکت Meggitt

General Purpose Low Frequency 786-500	Low Profile Industrial 785A	General Purpose 777/777B	High Frequency 732-1D	Ultra Low Frequency Seismic 731-207	نوع سنسور
10 g peak	80 g peak	80 g peak	500 g peak	0.5 g peak	بازه دامنه شتاب
500 mV/g ±5%	100 mV/g ±10%	100 mV/g ±5%	10 mV/g ±5%	10 V/g ±5%	حساسیت
-50 °C to +120 °C	-50 °C to +120 °C	-50 °C to +85 °C	-50 °C to +120 °C	0 °C to +80 °C	دمای کاری و دمای نگهداری
5000 g	5000 g, min	5000 g, min	5000 g	250 g	میزان مقاومت در برابر ضربه
0.7 Hz to 5 kHz ±5% 0.5 Hz to 9 kHz ±10% 0.2 Hz to 14 kHz ±3db	2 Hz to 8 kHz ±10% 1 Hz to 12 kHz ±3db	0.5 Hz to 12 kHz ±3db	1 Hz to 15 kHz ±5db 0.4 Hz to 22 kHz ±3db	0.6 Hz to 650 Hz ±5db 0.5 Hz to 850 Hz ±10db 0.2 Hz to 1300 Hz ±5db	پاسخ فرکانسی
30 kHz	30 kHz, min	30 kHz	2.4 kHz	2.4 kHz	فرکانس رزونانس در حالت نصب‌شده
12 Vdc	12 Vdc	12 Vdc	10 Vdc	10 Vdc	ولتاژ خروجی bias

90 gr	85 gr	75 gr	28 gr	50 gr	وزن بدون کابل
316L stainless steel	316L stainless steel	stainless steel	316L stainless steel	316L stainless steel	جنس بدنه
1/4-28 UNF tapped hole	1/4-28 UNF captive hex head	1/4-28 UNF tapped hole	10-32 tapped hole	10-32 UNF	زاویه نصب

ب) سنسور سرعت سنج

مشخصات کلی سنسورهای سرعت سنج Meggitt در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹: مشخصات کلی سنسور سرعت سنج شرکت Meggitt

CV210	سنسور سرعت سنج پیزوالتریک 793V	نوع سنسور
1Hz to 70 Hz: 50 mm/s peak up	793V: 50 in/sec peak	بازه دامنه سرعت
70Hz to 400 Hz: 50 mm/s peak up	793V-5: 10 in/sec peak	
50 mV/mm/s	793V: 100 mV/in/sec $\pm 10\%$ 793V-5: 500 mV/in/sec $\pm 10\%$	حساسیت
-10 to +100 C	-50 °C to +120 °C	دمای کاری و دمای نگه داری
500g peak, half-sine pulse 1ms	2500 g peak	میزان مقاومت در برابر ضربه
1Hz to 400 Hz	793V: 3 Hz to 3.5 kHz $\pm 10\%$ 2.5 Hz to 7 kHz $\pm 3\text{db}$ 793V-5: 8 Hz to 3.5 kHz $\pm 10\%$ 5 Hz to 7 kHz $\pm 3\text{db}$	پاسخ فرکانسی
28 Hz	15 kHz	فرکانس رزونانس در حالت نصب شده
	10 Vdc	ولتاژ خروجی bias
290 gr	145 gr	وزن بدون کابل
Stainless steel	316L stainless steel	جنس بدنه
M8×10mm tapped hole	1/4-28 tapped hole	نحوه نصب

ج) سنسور جابجایی سنج

مشخصات کلی سنسورهای شتاب سنج در جدول ۱۰ آمده است.

جدول ۱۰: مشخصات کلی سنسور جابجایی سنج شرکت Meggitt

TQ401	نوع سنسور
2mm 0 to 2mm	بازه‌ی اندازه‌گیری
5 mm	قطر نوک سنسور
8mV/ μm with conditioner IQS 451 0XX 2.5m $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ with conditioner IQS 451 1XX	حساسیت
0 Hz to 20 KHz $\pm 3\text{db}$	بازه‌ی فرکانسی
-35°C to +180 °C	دمای کاری
100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	رطوبت نسبی محل کار و نگهداری

۱-۶-۵- شرکت Emerson (آمریکا)

الف) سنسورهای شتاب سنج
مشخصات کلی این سنسورها در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱: مشخصات کلی سنسورهای شتاب‌سنج شرکت Emerson

نوع سنسور	A0322L5	A0120LF	ST5484E
بازه‌ی فرکانسی	0.5 Hz to 10 KHz $\pm 3\text{db}$	0.2 Hz to 6 KHz $\pm 3\text{db}$	2 Hz – 1500 Hz (standard) 2 Hz – 2000 Hz (optional)
حساسیت	10.2mV/m/s ² (100 mV/g) $\pm 10\%$	51mV/m/s ² (500 mV/g) $\pm 10\%$	-
دمای کاری	-55 °C to +121 °C	-54 °C to +121 °C	-40 °C -100 °C
رطوبت نسبی محل کار و نگهداری	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	95% or 100% (نوع اتصال دهنده)
اتصال	1/4-28 UNF-2B stud	1/4-28 UNF-2B stud	-
وزن	-	-	0.36 kg
سیگنال خروجی	-	-	جریان 4-20 mA متناسب با سیگنال سرعت برای نسخه‌ی ۲ سیمی سیگنال خام شتاب در بازه‌ی 0-100mV/g برای نسخه‌ی ۴ سیمی
زاویه نصب	-	-	در هر جهت دلخواه
ولتاژ تغذیه	-	-	11-30 Vdc (24Vdc nominal)
جنس بدنه	-	-	303 or 316 stainless steel

ب) سنسورهای سرعت سنج
مشخصات کلی این سنسورها در جدول ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱۲: مشخصات کلی سنسورهای سرعت‌سنج شرکت Emerson

نوع سنسور	A0324VO	A0520VO	PR9268
حساسیت	101.6mV/in/s (4 mV/mm/s) $\pm 5\%$	101.6mV/in/s (4 mV/mm/s) $\pm 5\%$	724mV/in/s (28.5 mV/mm/s) $\pm 5\%$
بازه‌ی فرکانسی	1.5 Hz to 4 KHz $\pm 3\text{db}$	1.5 Hz to 6 KHz $\pm 3\text{db}$	4 Hz to 1 KHz $\pm 3\text{db}$
دمای کاری	-54 °C to +121 °C	-54 °C to +121 °C	-54 °C to +121 °C
رطوبت نسبی محل کار و نگهداری	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)
اتصال	1/4-28 UNF-2B stud	1/4-28 UNF-2B stud	دارای پایه‌ای با سه سوراخ

ج) سنسورهای جابجایی سنج

مشخصات کلی این سنسور در جدول ۱۳ جدول ۱۳ آمده است.

جدول ۱۳: مشخصات کلی سنسورهای جابجایی سنج شرکت Emerson

PR6422	نوع سنسور
$\pm 0.5\text{mm}$ position 0 to 250 μm pp vibration	بازه‌ی اندازه‌گیری
5 mm	قطر نوک سنسور
406.6mV/mil(16 /mm) $\pm 1.5\%$	حساسیت
0 Hz to 20 KHz $\pm 3\text{db}$	بازه‌ی فرکانسی
-35 $^{\circ}\text{C}$ to +180 $^{\circ}\text{C}$	دمای کاری
100% (بدنه نسبت به رطوبت آب بندی شده است)	رطوبت نسبی محل کار و نگهداری
M6x0.5 or 1/4-28 UNF-2A	رزوه بدنه‌ی سنسور

۱-۶-۶-۱- شرکت ASM (آلمان)

مشخصات کلی سنسور سرعت سنج در جدول ۱۴ جدول ۱۴ آمده است.

جدول ۱۴: مشخصات کلی سنسور سرعت سنج شرکت ASM

GS2 سنسور سرعت سنج	نوع سنسور
Up to $\pm 0.05\%$ full scale	دامنه‌ی خطی کردن مکان
Up to $\pm 0.25\%$ full scale	دامنه‌ی خطی کردن سرعت
4 mV/mm/s $\pm 5\%$	حساسیت
0 to 10 V	ولتاژ خروجی
to 20 mA ۴	جریان خروجی

۱-۶-۷-۱- شرکت CEMB (ایتالیا)

مشخصات کلی سنسور سرعت سنج این شرکت ایتالیایی در جدول ۱۵ جدول ۱۵ آمده است.

جدول ۱۵: مشخصات کلی سنسور سرعت سنج سزمیک شرکت CEMB

T1-40 سرعت سنج سزمیک	نوع سنسور
Up to $\pm 0.05\%$ full scale	دامنه‌ی خطی کردن مکان
Up to $\pm 0.25\%$ full scale	دامنه‌ی خطی کردن سرعت
21.2 mV/mm/s	حساسیت
12 Hz	فرکانس
100%	رطوبت محیط
0.3 kg	وزن
1 Kohm at 25 $^{\circ}\text{C}$	امپدانس خروجی

Alluminium P.Al.Si 5.5 Or Stainless Steel AISI 303	جنس محفظه
--	-----------

۱-۱-۶-۸- شرکت EATON (نروژ)

مشخصات کلی سنسور جابجایی سنج در جدول ۱۶ جدول ۱۶ آمده است.

جدول ۱۶: مشخصات کلی سنسور جابجایی سنج شرکت EATON

General Purpose Proximity E57G	نوع سنسور
-25 to +70 °C	دمای عملکرد
100 mA	جریان خروجی (پیوسته)
10 to 30 Vdc	ولتاژ خروجی
Front face: Ryton Tube: Stainless Steel	جنس محفظه

۱-۱-۶-۹- شرکت MC-Monitoring SA (سوئیس)

سنسور سرعت سنج

این سنسورها جهت اندازه‌گیری ارتعاشات مطلق یا تاقان‌ها در ماشین‌های آبی با فرکانس کمتر از 0.5 Hz مورد استفاده قرار می‌گیرند و جایگزین مناسبی برای سنسور شتاب‌سنج و سرعت سنج پیزوالکتریک هستند. مشخصات کلی و همچنین ابعاد و اندازه و شکل کلی سیستم این سنسور در جدول ۱۷ آمده است.

جدول ۱۷: مشخصات کلی سنسور سرعت سنج شرکت MC

LVS سنسور سرعت سنج خطی شده	نوع سنسور
100 mV/mm/s±3%	حساسیت
0.5 Hz to 1.5 kHz (<-3db) 0.7 Hz to 900 Hz (<-10%)	محدوده‌ی فرکانسی
8 Hz	فرکانس طبیعی
Operating: -20 to +80°C Non-destructive: -40 to +100 °C	محدوده‌ی دمای نگهداری و عملکرد
100%	رطوبت محیط
Stainless Steel 1.4301	جنس بدنه
400 gr	وزن سنسور
+6 V ±1 V for +24DC -6 V ±1 V for -24DC	ولتاژ خروجی bias
5/10 m	طول کابل

۱-۱-۶-۱۰- شرکت Metrix (آمریکا)

شرکت آمریکایی متریکس در زمینه تولید سنسورهای ارتعاشی به خصوص جابجایی سنج‌ها شهرت فراوانی دارد. الف) سنسور جابجایی سنج

قطر پراب این سری سنسورها 5mm و 8 mm می‌تواند باشد. پراب این سنسورها قابل تعویض با پراب‌ها 5 mm/8 mm پراب‌های شرکت بنتلی می‌باشد. همچنین کابل اتصال و کاندیشنر این سنسورها با پراب‌های شرکت بنتلی نیز سازگار می‌باشند. مشخصات کلی این سنسور در جدول ۱۸ جدول ۱۸ آمده است.

جدول ۱۸: مشخصات کلی سنسور جابجایی سنج شرکت Metrix

نوع سنسور	سنسور MX2033
مقدار خروجی کاندیشنر	7.87 mV/ μ m
محدوده‌ی خطی سازی	2 mm
پاسخ فرکانسی	0-8 kHz
محدوده‌ی دمای نگهداری و عملکرد پراب	-51 to +177°C
رطوبت محیط	95%
جنس بدنه پراب	FWD-mount probe: AISI 304 Stainless Steel
وزن پراب	298 gr
طول کابل	1500 m (between signal conditioner and monitor)

ب) سنسور سرعت سنج

مشخصات کلی این سنسور در جدول ۱۹ آمده است.

جدول ۱۹: مشخصات کلی سنسور سرعت سنج شرکت Metrix

نوع سنسور	ST5484E
جریان خروجی	4-20 mA
امپدانس سیگنال خروجی	10 k Ω
پاسخ فرکانسی	2 Hz-1500 Hz (standard) 2 Hz-2000 Hz (optional)
محدوده‌ی دمای عملکرد	-40 to +100 °C
رطوبت محیط	95%
جنس	303 stainless steel (standard) 316 303 stainless steel (optional)
وزن	g ۰/۳۶

۱-۱-۶-۱۱ - شرکت SKF (سوئد)

الف) سنسورهای شتاب سنج

مشخصات کلی چند سنسور شتاب سنج این شرکت در جدول ۲۰ آورده شده است.

جدول ۲۰: مشخصات کلی سنسورهای شتاب‌سنج شرکت SKF

نوع سنسور	CMSS 793, straight exit	CMSS 797, side exit	CMSS 793L/CMSS 739L-FM Low Frequency, Straight exit	CMSS 797L/CMSS 797L-FM Low Frequency, Side exit
بازه دامنه	80 g peak	50 g	10 g peak	10 g peak
حساسیت	100 mV/g	100 mV/g	500 mV/g	500 mV/g
دامنه‌ی خطی بودن	1%-non-linearity	1%-non-linearity	1%-non-linearity	1%-non-linearity
دمای کاری	-50 °C to +120 °C	-50 °C to +120 °C	-50 °C to +120 °C	-50 °C to +120 °C
میزان مقاومت در برابر ضربه	5000 g	5000 g	5000 g	2500 g
پاسخ فرکانسی	1.5 to 5000 Hz±5% 1 to 7000 Hz±10% 0.5 to 15000 Hz±3 db	3 to 5000 Hz±5% 2 to 7000 Hz±10% 1 to 12000 Hz±3 db	0.6 to 700 Hz±5% 0.4 to 1000 Hz±10% 0.2 to 2300 Hz±3 db	0.3 to 1200 Hz±5% 0.2 to 1600 Hz±10% 0.1 to 2500 Hz±3 db
فرکانس رزونانس در حالت نصب شده	25 kHz	26 kHz	15 kHz	18 kHz
ولتاژ خروجی bias	12 Vdc	12 Vdc	10 Vdc	10 Vdc
وزن بدون کابل	112 gr	135 gr	142 gr	148 gr
جنس بدنه	316L stainless steel	316L stainless steel	316L stainless steel	316L stainless steel

ب) سنسورهای سرعت‌سنج

مشخصات کلی چند سنسور سرعت سنج این شرکت در جدول ۲۱ جدول ۲۱ آورده شده است.

جدول ۲۱: مشخصات کلی سنسورهای سرعت‌سنج شرکت SKF

نوع سنسور	CMSS 793V, straight exit	CMSS 797V, side exit
بازه دامنه	50 in/s peak	50 in/s peak
حساسیت	100 mV/in/s	100 mV/in/s
دامنه‌ی خطی بودن	1%-non-linearity	1%-non-linearity
دمای کاری	-50°C to +120°C	-50°C to +120°C
میزان مقاومت در برابر ضربه	2500 g	2500 g
پاسخ فرکانسی	3 to 500 Hz±10% 2.5 to 7000 Hz±3 db	2 to 3500 Hz±10% 1.6 to 7000 Hz±3 db
فرکانس رزونانس در حالت نصب شده	15 kHz	18 kHz
ولتاژ خروجی bias	10 Vdc	10 Vdc

148 gr	145 gr	وزن بدون کابل
316L stainless steel	316L stainless steel	جنس بدنه

۱-۷- مقایسه سنسورهای مختلف

در این قسمت پارامترهای مهم سنسورهای شرکت‌های اصلی تولیدکننده این سنسورها در جدول ۲۲ الی ۲۴ مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۲۲: مقایسه‌ی سنسورهای شتاب‌سنج

نام شرکت	نام سنسور شتاب‌سنج	بازه دامنه	حساسیت	دامنه‌ی خطی بودن	میزان مقاومت در برابر ضربه	دمای کاری و دمای نگهداری	پاسخ فرکانسی	ولتاژ خروجی bias	فرکانس رزونانس	ماکزیمم طول کابل
Bently	330400, 330425	33400: 490 m/s ² (50 g peak) 33425: 735 m/s ² (75 g peak)	33400: 10.2 mV/m/s ² (100 mV/g) ±5% 33425: 2.5 mV/m/s ² (25 mV/g) ±5%	33400: ±1% to 490 m/s ² (50 g peak) 33425: ±1% to 735 m/s ² (75 g peak)	49.050 m/s ² (5000g) peak maximum	-55 °C to +121 °C	10 Hz to 15 KHz±3db 30 Hz to 10 KHz±10 db	-8.5±0.5 Vdc	بزرگ‌تر از 30 kHz	350 m با هیچ‌گونه تأثیر مخربی بر روی سیگنال
	200350, 200355	490 m/s ² (50 g peak)	200350: (100 mV/g) ±20% 200355: (100 mV/g) ±5%	±1% to 490 m/s ² (50 g peak)	49.050 m/s ² (5000g) peak maximum	-54 °C to +121 °C	200350: 0.5 Hz to 10 KHz±3db 200355: 0.2 Hz to 10 KHz±3db	8 to 12 Vdc	200350: 25 kHz 200355: 20.8 kHz	350 m
	200157 & 200155, 200150	200150: ±245 m/s ² 200155: ±196 m/s ² 200157: ±245 m/s ²	10.2 mV/m/s ² (100 mV/g)	1 to 10 g peak±2%	49.050 m/s ² (5000 g) peak maximum	-40 °C to +105 °C	200150: 10 Hz to 1 KHz ±10% 200155: 1.5 Hz to 10 KHz±10% 200157: 10 Hz to 10 KHz±10%	+2.5±0.23 Vdc	بزرگ‌تر از 20 kHz	25 m
	177230	196 m/s ² (20 g peak)	10.2 mV/m/s ² (100 mV/g) ±5%	±1%	9.810 m/s ² (1 g peak)	-40 °C to +85 °C	Current loop velocity vibration: 10 Hz to 1 kHz±10%	2.5 V±0.1 V	بزرگ‌تر از 12 kHz	-

			Voltage, Acceleration: 2.5 to 10 kHz $\pm 10\%$							
-	2.4 kHz	10 Vdc	0.6 Hz to 650 Hz $\pm 5\text{db}$ 0.5 Hz to 850 Hz $\pm 10\text{db}$ 0.2 Hz to 1300 Hz $\pm 5\text{db}$	0 °C to +80 °C	250 g	-	10000 mV/g $\pm 5\%$	0.5 g peak	Ultra Low Frequency Seismic 731-207	Vibro meter
-	2.4 kHz	10 Vdc	1 Hz to 15 kHz $\pm 5\text{db}$ 0.4 Hz to 22 kHz $\pm 3\text{db}$	-50 °C to +120 °C	5000 g	-	10 mV/g $\pm 5\%$	500 g peak	High Frequency 732-1D	
-	30 kHz	12 Vdc	0.5 Hz to 12 kHz $\pm 3\text{db}$	-50 °C to +85 °C	5000 g, min	-	100 mV/g $\pm 5\%$	80 g peak	General Purpose 777/777B	
-	30 kHz, min	12 Vdc	2 Hz to 8 kHz $\pm 10\%$ 1 Hz to 12 kHz $\pm 3\text{db}$	-50 °C to +120 °C	5000 g, min	-	100 mV/g $\pm 10\%$	80 g peak	Low Profile Industrial 785A	
-	30 kHz	12 Vdc	0.7 Hz to 5 kHz $\pm 5\%$ 0.5 Hz to 9 kHz $\pm 10\%$ 0.2 Hz to 14 kHz $\pm 3\text{db}$	-50 °C to +120 °C	5000 g, min	-	500 mV/g $\pm 5\%$	10 g peak	General Purpose Low Frequency 786-500	
-	-	-	0.5 Hz to 10 KHz $\pm 3\text{db}$	-55 °C to +121 °C	-	-	10.2mV/m/s ² (100 mV/g) $\pm 10\%$	-	A0322L5	Emers on
-	-	-	0.2 Hz to 6 KHz $\pm 3\text{db}$	-54°C to +121 °C	-	-	51mV/m/s ² (500 mV/g) $\pm 10\%$	-	A0120LF	
-	-	-	2Hz – 1500Hz (standard) 2Hz – 2000Hz (optional)	-40 C -100 °C	-	-	-	-	ST5484E	
-	35 kHz	-	4 to 10 kHz (± 0.5 db) 1.5 to 15 kHz (± 3 db)	Operating:	5000 g	40 g, max	10.2 mV/m/s ²	(ولتاژ منبع -20 ± 40 g (V	AS-020	B&K

				-50 °C to +125 °C Storage: -50 °C to +150 °C						
-	20 kHz	-	3 Hz to 10 kHz(±0.5 db) 1 Hz to 15 kHz(±3 db)	Operating: -50 °C to +125 °C Storage: -50 °C to +150 °C	5000 g	40 g, max	10.2 mV/m/s ²	(ولتاژ منبع -20 ±40 g (V	AS-030	
-	25 kHz	12 Vdc	1.5 to 5000 Hz±5% 1 to 7000 Hz±10% 0.5 to 15000 Hz±3 db	-50 °C to +120 °C	5000 g	1%-non- linearity	100 mV/g	80 g peak	CMSS 793	SKF
-	26 kHz	12 Vdc	3 to 5000 Hz±5% 2 to 7000 Hz±10% 1 to 12000 Hz±3 db	-50 °C to +120 °C	5000 g	1%-non- linearity	100 mV/g	50 g	CMSS 797	
-	15 kHz	10 Vdc	0.6 to 700 Hz±5% 0.4 to 1000 Hz±10% 0.2 to 2300 Hz±3 db	-50 °C to +120 °C	5000 g	1%-non- linearity	500 mV/g	10 g peak	CMSS 793L/CMS S 739L-FM	
-	18 kHz	10 Vdc	0.3 to 1200 Hz±5% 0.2 to 1600 Hz±10% 0.1 to 2500 Hz±3 db	-50 °C to +120 °C	2500 g	1%-non- linearity	500 mV/g	10 g peak	CMSS 797L/CMS S 797L-FM	

جدول ۲۳: مقایسه‌ی سنسورهای سرعت‌سنج

نام شرکت	نام سنسور سرعت‌سنج	دامنه‌ی خطی بودن	حساسیت	دمای کاری و دمای نگهداری	پاسخ فرکانسی	ولتاژ خروجی bias	فرکانس رزونانس
Bently	فرکانس پایین 330505	$\pm 3\%$ to 102 mm/s (4 in/s peak)	20 mV/mm/s $\pm 10\%$	-40 °C to +100 °C	0.5 Hz to 1 KHz $\pm 3\text{db}$	-	-
	9200 and 74712 Seismoprobe	-	20 mV/mm/s $\pm 5\%$	9200: -29 °C to +121 °C 74712: -29 °C to +204 °C	Minimum operating frequency to 1 kHz	-	-
Vibrometer	پیزوالتریک 793V	793V: 50 in/s peak 793V-5: 10 in/s peak	793V: 3.93 mV/mm/s $\pm 10\%$ 793V-5: 19.68 mV/mm/s $\pm 10\%$	-50 °C to +120 °C	793V: 3 Hz to 3.5 kHz $\pm 10\%$ 2.5 Hz to 7 kHz $\pm 3\text{db}$ 793V-5: 8 Hz to 3.5 kHz $\pm 10\%$ 5 Hz to 7 kHz $\pm 3\text{db}$	10 Vdc	15 kHz
	CV210	Hz to 70 Hz: 50 mm/s peak up 70Hz to 400 Hz: 50 mm/s peak up	50 mV/mm/s	-10 to +100 C	1Hz to 400 Hz	-	28 Hz
Emerson	A0324VO	-	4 mV/mm/s $\pm 5\%$	-54 °C to +121 °C	1.5 Hz to 4 KHz $\pm 3\text{db}$	-	-
	A0520VO	-	4 mV/mm/s $\pm 5\%$	-54 °C to +121 °C	0.2 Hz to 6 KHz $\pm 3\text{db}$	-	-
	سنج لرزه‌ای (Siesmic) PR9268	-	28.5 mV/mm/s $\pm 5\%$	-54 °C to +121 °C	4 Hz to 1 KHz $\pm 3\text{db}$	-	-

8 Hz-natural frequency	+6 V ±1 V for +24DC -6 V ±1 V for -24DC	0.5 Hz to 1.5 kHz (<-3dB) 0.7 Hz to 900 Hz (<-10%)	Operating: -20 to +80 °C Non-destructive: -40 to +100 °C	100 mV/mm/s±3%	-	LVS-101 M3 (Horizontal) and LVS-201 M3 (Vertical)	MC
15 kHz	10 Vdc	3 to 500 Hz±10% 2.5 to 7000 Hz±3 db	-50 °C to +120 °C	3.93 mV/mm/s (100 mV/in/s)	1%-non-linearity	CMSS 793V	SKF
18 kHz	10 Vdc	2 to 3500 Hz±10% 1.6 to 7000 Hz±3 db	-50 °C to +120 °C	3.93 mV/mm/s (100 mV/in/s)	1%-non-linearity	CMSS 797V	

جدول ۳۴: مقایسه‌ی سنسورهای جابجایی سنج

نام شرکت	نام سنسور Proximity Probe	محدوده‌ی قابل اندازه‌گیری	دامنه‌ی خطی بودن	حساسیت	دمای کاری و دمای نگهداری	پاسخ فرکانسی	ولتاژ ورودی	ولتاژ خروجی
Bently	3300 XL 8 mm	0.25 to 2.3 mm	2.05 mm	-	-51 °C to +100 °C	0 تا 10 kHz	-23 Vdc to -26 Vdc	-
	3300 XL 11 mm	0.5 to 4.5 mm	4 mm	-	-51 °C to +100 °C	0 تا 8 kHz	-17.5 Vdc to -26 Vdc	-
Emerson	PR6422	±0.5mm position 0 to 250 µm pp vibration	1 mm	16 mV/µm±1.5%	-35°C to +180 °C	0 Hz to 20 KHz ±3db	-	-
B&K	جابجایی - نوع مجزا	3.5 mm-max	-	-	-30 to 65 °C	0-10 kHz	-	1.5 - 20 V
	جابجایی - مجتمع	1.5 mm	-	8 mV/µm	Operating: 0 to +110 °C Storage: -50 to +150 °C	0-10000 Hz	-	Supply voltage+2 V
	IN-081	2mm	2mm	8 mV/µm	-10 C to 125 C	0-10kHz	-18 to -30 Vdc	-
Metrix	MX2033	-	2 mm	-	-51 to +177 °C	0-8 kHz	-	-
Vibrometer(meggite)	TQ401	0 to 2 mm	2 mm	8mV/µm with conditioner IQS 451 0XX 2.5mµA/µm with conditioner IQS 451 1XX	-35 C to +180 C	0 to 20 kHz		

فصل دوم:

بررسی سخت افزارهای پایش وضعیت
ارتعاشی و قابلیت‌های هر کدام

در این فصل قابلیت‌های سخت افزار های پایش وضعیت ارتعاشی متعلق به چند شرکت خارجی معتبر در سه گروه زیر بررسی و مقایسه می شوند [۶]:

- دستگاه های آنالیز ارتعاشات پرتابل
- کارتهای داده برداری ارتعاشی
- سخت افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی

۱-۲-۱- دستگاههای آنالیز ارتعاشات پرتابل (Portable)

برای پایش وضعیت ارتعاشی ماشینها بصورت آفلاین و دوره ای (روزانه، هفتگی، ماهانه و ...) معمولاً از دستگاههای پرتابل یا قابل حمل (شکل ۱۵) استفاده می شود. از نظر اقتصادی استفاده از این دستگاه ها نسبت به دو حالت دیگر (کارت داده برداری، سخت افزار پایش وضعیت) خیلی مقرون به صرفه تر می باشد، چرا که با یک دستگاه و یک (یا دو) سنسور ارتعاشی می توان ارتعاشات تمامی ماشینهای یک کارخانه را اندازه گیری و تحلیل نمود. در این بخش قابلیت دستگاه های پرتابل چند شرکت خارجی بررسی و با هم مقایسه می شوند.

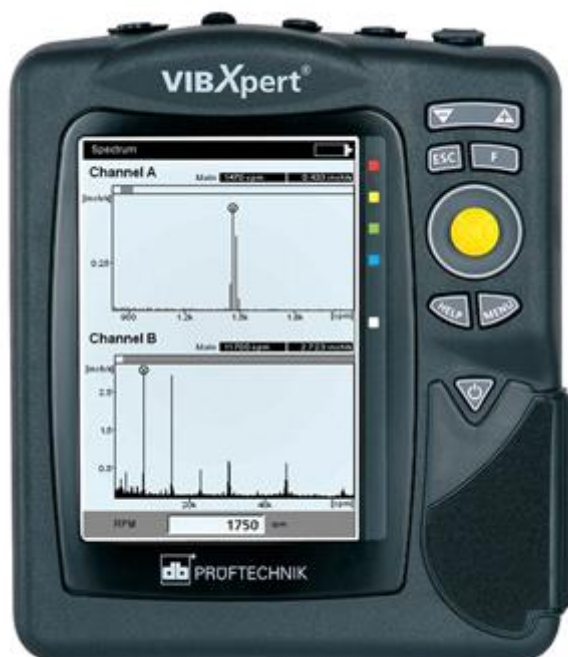


شکل ۱۵: دستگاه های آنالیز ارتعاشات پرتابل

۱-۲-۱- شرکت Ludeca Pruftechnik (آلمان)

❖ آنالایزر VIBXPERT

این دستگاه (شکل ۱۶) یک آنالایزر کم وزن و ذخیره کننده اطلاعات از نوع FFT و ۲ کاناله برای مانیتورینگ و تشخیص شرایط ماشین است. به عنوان یک ذخیره کننده، انواع فرمهای ارتعاشی، شرایط یاتاقان، دادههای پردازشی و اطلاعات بازرسی دیداری را ذخیره می کند. این دادههای جمع آوری شده بر روی یک حافظه فلش کارت ذخیره شده و به نرم افزار OMNITREND برای ارزیابی های بعدی، گزارش دهی و آرشیوسازی منتقل می شود. این دستگاه دارای قابلیت های تحلیلی جامعی برای تشخیص مشکلات ارتعاشی پیچیده است. برخی از توانایی های آن عبارتند از: اندازه گیریهای طیف های تحلیل مرتبه (Order analysis)، فاز، کپستروم، تحلیل مدار شفت.



شکل ۱۶: آنالایزر VIBXPERT

از دیگر قابلیت‌های این دستگاه نمایش طیف فرکانسی با فرکانس ماکزیمم تا 40 kHz با تفکیک‌پذیری خطی بالا و یک صفحه نمایش بزرگ می‌باشد که تشخیص و تحلیل مشکلات ماشین را آسان می‌کند. محدوده هشدار بر اساس استاندارد یا معیار کاربر تعیین می‌شود. به دلیل پوشش محافظ قوی این دستگاه ضد گرد و خاک و ضد آب بوده و فقط ۲ پوند وزن دارد. این دستگاه دو کاناله با انواع سنسورهای مختلف برای اندازه‌گیری‌های آنالوگ مطابقت دارد و ورودی شبکه و USB نیز دارد. این دستگاه دارای مدول بالانس نیز می‌باشد که عملیات بالانس را در یک یا دو صفحه انجام می‌دهد و از روشهای مختلفی برای این کار استفاده می‌کند. چنانچه اضافه کردن جرم به روتور مقدور نباشد، می‌توان آن را به گونه‌ای تنظیم نمود تا جرمی که باید از روتور برداشته شود را محاسبه کند. این دستگاه با استفاده از پالس ضربه‌ای و انولوپ، توانائی اندازه‌گیری ضخامت روغن و تشخیص سریع مشکلات چرخنده و یاتاقان را نیز داراست.

❖ آنالایزر VIBSCANNER

این دستگاه (شکل ۱۷) سبک یک ذخیره کننده داده است که قادر به اخذ پارامترهای مهم ماشین از قبیل شتاب، سرعت، جابجائی، دما و سرعت دورانی می‌باشد. همچنین دارای مدول‌های طیف فرکانسی ارتعاش، انولوپ، شکل موج زمانی، بالانس یک یا دو صفحه‌ای، هم‌راستائی شفت، پالس ضربه‌ای برای صدمات یاتاقانی و شرایط فیلم روغن، کاویتاسیون پمپ نیز می‌باشد. مدول اتولوپ برای تشخیص عیوب یاتاقان‌های غلتشی و چرخنده‌ها کاربرد زیادی دارد. مدول بالانس این دستگاه همانند دستگاه VIBXPERT قادر به بالانس روتور با روشهای مختلف می‌باشد. مدول پالس ضربه‌ای برای تشخیص شرایط لایه روغن و مشکلات یاتاقانها به کار می‌رود. همچنین با اندازه‌گیری فرکانسهای نویز کاویتاسیون، شرایط پمپ نیز قابل تشخیص است.



شکل ۱۷: آنالایزر VIBSCANNER

۱-۲-۲-۱- شرکت Brüel & Kjær Vibro (دانمارک)

این شرکت در طول سی سال گذشته مدل‌های مختلفی از محصول VibroTest را تولید و به بازار عرضه نموده است و مدل VT60 یکی از پرفروش‌ترین دستگاه‌های پرتابل در جهان به شمار می‌رود. این دستگاه با داشتن ماژول‌های آنالایزر ارتعاشی، ذخیره‌کننده داده‌ها و ماژول بالانس و با وزن کم، ظرفیت حافظه بالا و قابلیت انتقال مناسب به کامپیوتر (و استفاده از نرم‌افزار xms)، یک آنالایزر استاندارد دو کاناله بسیار مفید به صورت Off-line می‌باشد. مشخصات فنی مدل‌های VT60 و VT80 و همچنین آنالایزر VibroPort80 (شکل ۱۸) در جدول ۲۵ ارائه شده است.



شکل ۱۸: دستگاه‌های پرتابل شرکت B&K (به ترتیب از راست: VT60 و VT80 و VP80)

۱-۲-۳-۱- شرکت Update International Inc. (آمریکا)

جدیدترین محصول پرتابل این شرکت DT6 می باشد (شکل ۱۹) که اکثر آنالیزهای ارتعاشی از قبیل طیف فرکانسی، انولوپ، شکل موج زمانی، طیف های تحلیل مرتبه (Order analysis)، فاز، کپستروم، تحلیل مدار شفت و پارامترهای آماری را دارا می باشد.



شکل ۱۹: دستگاه پرتابل DT6

جدول ۲۵ برای مقایسه قابلیت‌های دستگاه‌های پرتابل مفید است.

جدول ۲۵: مقایسه قابلیت‌های دستگاه‌های آنالیز ارتعاشات پرتابل

شرکت	کشور	نام دستگاه	تعداد کانالهای سیگنال ورودی	تعداد کانالهای خروجی وودی	وزن (kg)	فرکانس نمونه‌گیری (KHz)	ظرفیت حافظه (MB)	شدت شبکه (Mb/s)	ولتاژ ورودی	تعداد پشتهای ورودی	کانالهای خروجی مولد	هاکریم باند فرکانسی (KHz)	منبع تغذیه	Interface	Cepstrum	FFT	Envelop	Balancing	Order Analysis	Shock Pulse	Waterfall	Time Waveform	Reporter
Ludeca Pruftechnik	آلمان	Vibscanner	1,2	1	0.69	1	4	--	± 30	--	--	10	Chaegable Battery	USB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Vibxpert	2	2	0.9	1	8000	10	± 30	--	--	40	Chaegable Battery	USB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Brüel & Kjaer Vibro	دانمارک	Vibrotest60	2	1	0.9	10	128	--	± 30	--	--	20	AC, Battery	RS-232	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Vibrotest80	4	1	0.72	10	128	--	25	--	--	40	AC/DC, Battery	USB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Vibroport80	4	1	1.54	10	128	--	25	--	--	40	AC/DC, Battery	USB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		DT6	2x3=6 triaxial	1	1.5	1.6	4000	--	± 25	--	--	1.6	AC/DC	USB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Update International Inc.	امریکا																						

۱-۲-۲- کارتهای داده برداری

خروجی آنالوگ سنسورهای ارتعاشی به کارتهای داده برداری متصل می شوند. این کارتها که عموماً درون کیس کامپیوتر قرار دارند (و یا از طریق پورت usb و یا شبکه به کامپیوتر متصل می شوند)، از طریق نمونه برداری از سیگنال آنالوگ آن را به سیگنال دیجیتال تبدیل می کنند، به همین خاطر بیشتر اوقات به آنها کارت A/D یا مبدل آنالوگ به دیجیتال می گویند. وظیفه اصلی این کارتها دریافت سیگنال آنالوگ از سنسورها و تبدیل آن به سیگنال خام دیجیتال می باشد. البته از طریق نرم افزار درایور این کارت ها می توان عملیات داده برداری و پردازش سیگنال را کنترل و مناسب با شرایط ماشینها و عیوب آنها تنظیم نمود. سپس سیگنال دیجیتال حاصل را از طریق نرم افزارهای آنالیز ارتعاشات می توان بررسی نمود و در نهایت به تشخیص عیب پرداخت [۶].

۱-۲-۲-۱- شرکت Data Translation (آمریکا)

الف) کارت داده برداری با پورت USB (DT9800)

سخت‌افزارهای داده‌گیری مجتمع از طریق پورت USB به کامپیوتر متصل شده و نرم‌افزار مربوطه نصب می‌شود. سپس سنسورها مستقیماً به سخت‌افزار متصل می‌گردد و با دقت بسیار بالا اطلاعاتی نظیر دما، فشار، شدت صوت و غیره ذخیره می‌شوند. در واقع استفاده از USB، گرفتن داده‌ها و انتقال آنها به کامپیوتر را بسیار ساده کرده و تسریع می‌بخشد.

نصب و راه‌اندازی آسان و سریع، قابلیت استفاده شبکه‌ای از وسیله، دور بودن مدول از منابع ایجاد نویز مانند منبع تغذیه و برد داخلی کامپیوتر به دلیل خارج بودن مدول از محیط کامپیوتر از دیگر مزایای این نوع سخت افزارها به شمار می‌رود.



شکل ۲۰: کارت داده برداری DT9800

تمام عملکردها و قابلیت‌های مدولهای USB توسط نرم‌افزار آن قابل مشاهده و تنظیم است که تنظیم دامنه ورودی و خروجی، انتخاب ورودی‌های تفاضلی یا یکطرفه (Single-ended) و کالیبراسیون A/D را نیز شامل می‌شود. علاوه بر سادگی در نصب، مدولهای USB گرفتن اطلاعات، قابل حمل می‌باشند.

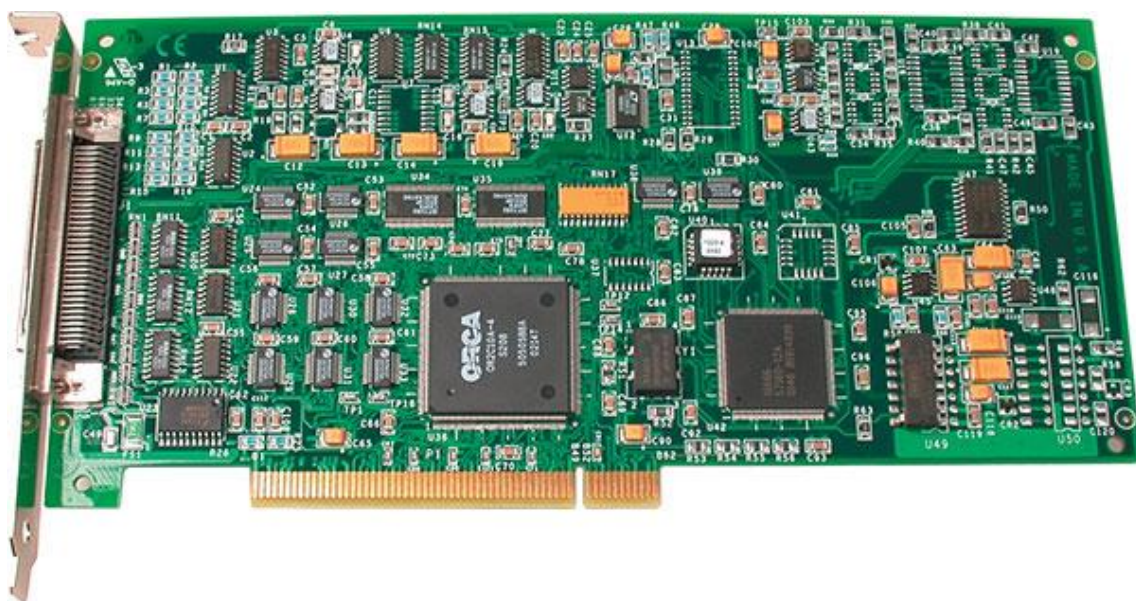
سری DT9800 (شکل ۲۰) یکی از انواع مدولهای USB گرفتن اطلاعات است و قابلیت‌های آن عبارتند از:

- ورودی‌های آنالوگ پردقت ۱۲ یا ۱۶ بیتی،

- سرعت انتقال در حدود 100 KSample/s
- ورودی - خروجی دیجیتال (Digital I/O) و دارای شمارنده و تایمر
- اتصال ساده با یک کابل
- اندازه‌گیری‌های کم نویز و حفاظت از کامپیوتر

ب) کارت داده برداری با درگاه PCI (DT3000)

شرکت D.T. دامنه وسیعی از سخت‌افزارهای جمع‌آوری اطلاعات که از درگاه PCI استفاده می‌کنند را تولید کرده است. درگاه PCI روی اکثر مادربردهای کامپیوترهای امروزی وجود دارد. پهنای باند بالا و سرعت زیاد درگاه PCI، قابلیت جمع‌آوری داده‌ها به‌طور همزمان را به این کارتها می‌دهد. کارتهای داده‌گیری PCI، قادر به انتقال مستقیم داده‌ها به حافظه کامپیوتر می‌باشند که این موضوع، نیاز به داشتن حافظه در کارت را مینیمم می‌کند. همچنین هیچگونه اطلاعاتی در پروسه انتقال از بین نمی‌رود. از آنجا که انتقال داده‌ها در درگاه PCI بدون هیچ دخالتی از طرف پردازنده مرکزی کامپیوتر صورت می‌پذیرد، می‌توان اطلاعات را به‌طور همزمان جمع‌آوری و پردازش نمود. برای مثال، در هنگامی که نمونه‌گیری در حال انجام است، کامپیوتر می‌تواند عملیات ریاضی بر روی داده‌ها انجام دهد و نتایج را برای آنالیز بیشتر ارائه نماید.



شکل ۲۱: کارت داده برداری DT3000

سری DT3000 (شکل ۲۱) از جمله بردهای PCI کارآمد در جمع‌آوری اطلاعات است که قابلیت عملیات همزمان A/D, D/A, I/O دیجیتالی با سرعت انتقال بالا را فراهم می‌کند. از دیگر مشخصات DT3000 به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- ورودهای آنالوگ 64 SE یا 32 DI که آن را برای کاربردهای چندکاناله آماده می‌کند.
- دارای ضرائب تقویت سیگنال برای مواردی که سطح دامنه ورودی‌ها پائین است مانند ترموکوپل و کرنش

سنج

- سرعت داده‌گیری 330 kS/s

ج) کارت داده برداری با درگاه PXI (DT9841)

DT9841 (شکل ۲۲) یکی از قویترین سیستم‌های جمع‌آوری اطلاعات همزمان (Real Time) موجود است که فاکتورهای سرعت و دقت زیاد را با هم دارد. اتصال آن به کامپیوتر از طریق پورت USB 2.0 و در سرعتی برابر با 480 Mbps انجام می‌شود.



شکل ۲۲: کارت داده برداری DT9841

این سیستم با استفاده از یک پردازشگر دیجیتالی سیگنال داخلی قدرتمند قادر به داده‌گیری بسیار دقیق از ورودی است و در تست‌های ارتعاشی و نویز دقت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابلیت‌های کامل این کارت داده برداری به شرح زیر می‌باشد:

- 8 ورودی آنالوگ 24 بیتی، 2 خروجی آنالوگ 24 بیتی، I/O دیجیتالی و 3 تایمر شمارشی
- مبدل‌های A/D و D/A با اندازه‌گیری‌های دقیق در سرعت 800KS/s
- کنترل همزمان (Real Time) با DSP قدرتمند 300 MHz برای عملکرد سیستم
- DSP قابل برنامه‌ریزی (از لحاظ نرم‌افزاری)
- حافظه 128 MB و حافظه موقت 2 MB برای کاربردهای مستقل از زمان
- طراحی مناسب برای اتصال 8 مدول مختلف به آن در کاربردهای چندکاناله
- اتصال از طریق USB 2.0 در سرعت 480 Mb/s

۱-۲-۲-۲- شرکت National Instrument (آمریکا)

این شرکت که یکی از معتبرترین شرکتهای دنیا در این زمینه می باشد نیز دارای هر سه نوع کارت داده برداری با پورت usb (شکل ۲۳) و درگاه PCI (شکل ۲۴) و یا درگاه PXI (شکل ۲۵) به شرح زیر می باشد:

NI USB-9201 NEW!

- Small, portable device (12.1 by 8.6 by 2.5 cm)
- 8 analog inputs at 12-bit resolution
- 500 kS/s aggregate sampling rate
- Built-in, removable connectors for easier and more cost-effective connectivity
- 250 V_{rms} channel-to-earth ground isolation
- Plug-and-play connectivity via USB
- Bus-powered

Operating Systems

- Windows 2000/XP

Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio

Measurement Services Software (included)

- NI-DAQmx driver software
- VI Logger Lite data-logging software



Product	Signal Type	Channels (SE)	Input Resolution (bits)	Maximum Sampling Rate (kS/s)	Input Range (V)	Connector	Driver Software ¹
USB-9201	Voltage	8	12	500	+10	Screw Terminal, D-Sub	NI-DAQmx

Table 1. Portable USB DAQ for Analog Signals Selection Guide

شکل ۲۳: کارت داده برداری NI USB-9201



شکل ۲۴: کارت داده برداری PCI-6013



شکل ۲۵: کارت داده برداری PX-6122

مشخصات فنی و قابلیت‌های کارتهای داده برداری در جدول ۲۶ آمده است.

جدول ۲۶: مقایسه قابلیت‌های کارتهای داده برداری ارتعاشی

شرکت	کشور	نام سخت‌افزار	پورت اتصال	انتقال سرعت (KS/s)	حافظه (MB)	کانالهای تعداد آنالوگ	بیت‌های تعداد ورودی	اتصال به شبکه	مدلهای A/D, D/A	Digital I/O	شمارنده	تایمر
Data Translation	امریکا	DT 9800	USB	100	--	--	12,16	✓	✓	✓	✓	✓
		DT 3000	PCI	330	--	--	24	✓	✓	✓	✓	✓
		DT 9841	PXI	800	128	8	24	✓	✓	✓	✓	✓
National Instrument	امریکا	PX-6122	PXI	500	512	4	16	✓	✓	✓	✓	✓
		PCI-6013	PCI	200	512	8	16	✓	✓	✓	✓	✓
		USB-9201	USB	800	256	16	16	✓	✓	✓	✓	✓

۱-۲-۳- سخت افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی

این سخت افزارها معمولاً برای پایش وضعیت ارتعاشی ماشینها به صورت پیوسته و دائمی به کار می روند و مجهز به رله های آلارم و تریپ برای هشدار یا توقف ماشینها در حالت بحرانی می باشند. کلیه این سخت افزارها مجهز به کارت های A/D هستند ولی از نظر نمایش مقادیر خروجی می توان آنها را به دو دسته تقسیم نمود:

- سخت افزارهایی که فاقد نمایشگر یا حتی چراغ های هشدار می باشند و خروجی آنها برای نمایش حتما باید به کامپیوتر متصل شود (مانند تجهیزاتی که در بندهای ۱-۳-۲ و ۲-۳-۲ آورده شده است).
- سخت افزارهایی که دارای نمایشگر و چراغ های هشدار می باشند و خروجی آنها بر روی نمایشگر نمایان است. البته برای کار با نرم افزارهای تحلیل ارتعاشات و عیب یابی خروجی آنها نیز به کامپیوتر منتقل می شود (مانند نمونه تجهیزاتی که در بندهای ۲-۳-۲ تا ۵-۳-۲ آورده شده است).

۱-۳-۲-۱- شرکت OROS (فرانسه)

سخت افزارهای این شرکت (شکل ۲۶) به نمایشگر و یا چراغ های هشدار مجهز نیستند و لذا برای مشاهده مقادیر حتما باید خروجی آنها به یک کامپیوتر متصل باشد.

❖ آنالایزر OR34

مشخصات:

- 2 یا 4 کاناله، 1.4 کیلوگرم
- پهنای باند همزمان 40 kHz
- ورودی $\pm 10V$ و 24 بیت
- سرعت شبکه 100 Mb/S
- منبع تغذیه AC/DC
- 2 ورودی تاکومتر
- 1 خروجی مولد

OR34 یک آنالایزر چند کاره متراکم است که تحلیل را در همزمان (Real Time) و با استفاده از بهترین تکنولوژی‌های آنالیز ارتعاشات و نویز و در دستگاهی قابل حمل انجام می‌دهد. این وسیله محصول شرکت OROS در اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاشی و نویز است و در کاربردهای مختلفی چون ماشینهای دوار و آنالیز سازه‌ای و آکوستیک صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

وزن بسیار کم OR34 (1.4 کیلوگرم)، آنرا به دستگاهی قابل حمل (Portable) تبدیل کرده است که به راحتی برای آنالیز و اندازه‌گیری ارتعاشی در محل قابل استفاده است. همچنین طراحی مستحکم OR34 که بر پایه مواد کیفیت بالا می‌باشد. (محفظه آلومینیومی و منبع تغذیه مستقل)، توان اندازه‌گیری دقیق در شرایط مختلف را به آن می‌دهد.

❖ آنالایزر OR35

مشخصات:

- 4، 6 یا 8 کاناله، 2.8 کیلوگرم
 - پهنای باند همزمان (Real Time) 40 kHz
 - ورودی 10 V ، 24 بیت
 - سرعت شبکه 100 Mb/S (Ethernet)
 - منبع تغذیه AC/DC با باتری داخلی
 - 2 ورودی خارجی
 - 2 خروجی مولد
- OR35 کم وزن‌ترین آنالیز 8 کاناله موجود می‌باشد. و قابلیت‌های آن برای یک سیستم جمع‌آوری داده بهینه و مؤثر، مناسب است. قابلیت‌های متمایز OR35، آنرا به پرکاربردترین وسیله پرتابل آنالیز و اندازه‌گیری سیگنالهای دینامیکی تبدیل کرده است.

❖ آنالیزر OR36

مشخصات:

- 4، 8، 12 یا 16 کاناله، 2.5 کیلوگرم
 - پهنای باند همزمان (Real Time) 40 kHz
 - ورودی ± 40 V و 24 بیت
 - دارای ظرفیت حافظه 40 Gb و سرعت شبکه 100 Mb/s
 - منبع تغذیه AC/DC با باتری داخلی
 - 2 تا 6 ورودی خارجی
 - 2 تا 6 خروجی مولد
- مدل OR36 برای اندازه‌گیری‌های تحلیلی ارتعاشی و صوتی پیشرفته طراحی شده است. OR36 ترکیبی از اجزائی است که بصورت جداگانه برای اندازه‌گیری استفاده می‌شوند. این مدل از بخشهایی چون یک ذخیره کننده اطلاعات با قابلیت پایش وضعیت، یک ذخیره کننده در ناحیه زمان و منابعی برای پردازش داده‌های ورودی تشکیل شده است و قابلیت اتصال به هر کامپیوتری را داراست.
- OR36 با استفاده از قابلیت‌های تحلیل چندگانه و ذخیره همزمان کانالها، فرآیند اندازه‌گیری را تضمین کرده و سرعت می‌بخشد. تحلیل چندگانه، امکان تحلیل همزمان ورودی‌ها در مودهای متفاوت مانند FFT و 1/n Octave را می‌دهد و ذخیره همزمان داده‌های زمانی برای تحلیل‌های آینده و گرفتن نسخه پشتیبان مفید است.

❖ آنالیزر OR24

OR24 یک آنالیزر متراکم می‌باشد که برای کاربردهائی که اندازه کوچک و وزن کم دستگاه مورد نیاز است، پیشنهاد می‌شود.

مشخصات:

- 2 یا 4 کاناله و 3 کیلوگرم

- پهنای باند همزمان (Real Time) تا 20 KHz
- ورودی‌های $\pm 40\text{ V}$
- منبع تغذیه DC و باتری
- یک خروجی تاکومتر
- 2 خروجی تولید کننده

قابلیت‌های زیاد آنرا به وسیله‌ای بسیار مناسب برای اندازه‌گیری‌های میدانی تبدیل کرده است. همچنین OR24 پایش وضعیت و پردازش سیگنال را نیز شامل می‌شود و قابلیت اتصال به هر نوع کامپیوتری را داراست. OR24 در حالت استاندارد با مدول تحلیل FFT و ذخیره کننده اطلاعات زمانی ارائه می‌شود. مدول‌های دیگری نیز برای OR24 قابل دسترس است که برخی از آنها عبارتند از 1/n Octave یا Order Analysis ، مدول بالانس ، گزارش‌گیری و تحلیل ساختاری.



شکل ۲۶: دستگاه‌های پایش وضعیت شرکت OROS

۱-۲-۳-۲- شرکت Iotech (آمریکا)

آنالایزرهای Wave Book و Zonic Book (شکل ۲۷ و شکل ۲۸) نیز به نمایشگر و یا چراغ‌های هشدار مجهز نیستند و لذا حتماً باید خروجی آنها به یک کامپیوتر متصل باشد. آنالیز و مانیتورینگ ارتعاشات بوسیله این سیستم‌ها به ساده‌ترین شکل ممکن انجام می‌پذیرد. این سیستم تحت شبکه، کم هزینه‌ترین آنالایزر کامل 8 تا 56 کاناله موجود است. این سیستم‌ها یک موتور جمع‌آوری داده و پایش وضعیت سیگنال هستند و نرم‌افزار آنها، اعمال آنالیز و مانیتورینگ سیستم را انجام می‌دهد. بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی برای این دستگاه‌ها در دسترس است که هر کدام قابلیت‌های تحلیلی ویژه‌ای دارند که با توجه به نوع استفاده انتخاب می‌شوند.

قسمت اصلی، یک شبکه پرسرعت است که با یک پردازشگر کامپیوتر، تقویت شده و انتقال تمام داده‌های خام به کامپیوتر در حالت همزمان (Real Time) و با سرعت 2 Mb/sec را ممکن می‌سازد. برخی از آنالایزرها اطلاعات فضای فرکانسی را ذخیره می‌کنند که نتیجه کار مانند اندازه‌گیری‌های زمانی دقیق نیست. این دستگاه‌ها با انتقال اندازه‌گیری‌های زمانی، آنالیز را دقیق و از انحراف داده‌ها از مقدار واقعی جلوگیری می‌کنند.

مزیت دیگر اینها، نداشتن محدودیت در مدت زمان گرفتن داده‌های پیوسته است. در دیگر سیستم‌ها، ظرفیت داخلی سخت‌افزار در مدت زمان ماکزیمم گرفتن داده‌های پیوسته محدودیت ایجاد می‌کند ولی در اینجا بدلیل انتقال داده‌ها

به کامپیوتر این چنین محدودیتی وجود ندارد. تنها محدودیت آن، مقدار حافظه کامپیوتر است که با افزایش حافظه کامپیوتر و یا شبکه کردن با دیگر کامپیوترها قابل حل است. همچنین قابلیت افزایش کانالها در این دستگاه به بیش از ۸ کانال بسیار ارزانتر از دیگر سیستم‌ها می‌باشد. ۸ کانال دستگاه را می‌توان تا ۵۶ کانال افزایش داد، در حالیکه هر ۸ کانال اضافه شده (با اتصال WBK18)، هزینه‌ای در حدود ۳۰ درصد هزینه ۸ کانال اولیه دارند. همچنین برای اندازه‌گیری تاکومتر چهار ورودی مستقل در نظر گرفته شده است و شکل موجها را می‌توان در حالت همزمان و مانند دیگر سیگنالهای آنالوگ ذخیره نمود. هر واحد WBK18، ۸ کانال به سیستم اضافه کرده و از لحاظ ارتفاع ۱.۵ اینچ و از لحاظ وزن ۱۳۰۰ گرم به دستگاه می‌افزاید.



شکل ۲۷: آنالایزر **Zonic Book** (سمت راست) و **Wave Book** (سمت چپ)



شکل ۲۸: دستگاه **Zonic Book** به همراه کامپیوتر و نرم افزار مربوطه

❖ دستگاه VIBRO CONTROL 800

این دستگاه تک کاناله (شکل ۲۹) شامل اجزاء الکترونیکی مانیتورینگ ارتعاشی می‌باشد که در یک پوشش آلومینیومی - چدنی جمع شده‌اند و برای مانیتورینگ پیوسته سرعت یا جابجایی ارتعاشات بکار گرفته می‌شود. این دستگاه را می‌توان مستقیماً بر روی بدنه ماشین و در نزدیکی محل یاتاقان نصب کرد.



شکل ۲۹: دستگاه VC800

دیگر امکانات آن عبارتند از:

- ترنسدیوسر داخلی با سطوح هشدار قابل تنظیم
- پوشش آلومینیومی مستحکم
- اجزاء الکترونیکی و سنسورهای الکتروپنوماتیکی روکش شده با اپوکسی
- کابل 4 متری مقاوم در برابر روغن
- نصب ساده و ارزان
- دمای کاری از ۳۰- تا ۶۵ درجه سلسیوس
- منبع تغذیه 230/115 VAC در فرکانس 50/60 Hz یا 24 VDC +
- مقادیر اندازه‌گیری شده:
 - مقدار RMS برای سرعت ارتعاشات از ۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه
 - مقدار ماکزیمم برای جابجایی ارتعاشات از ۰ تا ۵۰۰ میکرون
 - دامنه فرکانسی 480-60000 rpm

❖ دستگاه VIBRO CONTROL 920

این دستگاه (شکل ۳۰) مشابه آنالایزر VC800 تک کاناله می‌باشد و امکانات آن عبارتند از:

- نصب ساده و ارزان
- سنسورهای الکتروپنوماتیکی ورودی از نوع شتاب‌سنج یا سرعت‌سنج
- تنظیمات نرم‌افزاری برای دامنه اندازه‌گیری، دامنه فرکانسی، مقادیر هشدار
- دو رله هشدار دهنده قوی
- نمایش مقدار اندازه‌گیری شده

- پوشش پلاستیکی IP 20 و وزن ۱ کیلوگرمی
- منبع تغذیه قابل انتخاب: 115-230 VAC یا 18-32 VDC با ماکزیمم توان 12 W



شکل ۳۰: دستگاه VC920

❖ دستگاه VIBRO CONTROL 1000

این دستگاه (شکل ۳۱) یکی از اقتصادی‌ترین راه‌حل‌ها برای مانیتور کردن یک پارامتر ماشین است. این دستگاه دارای بدنه‌ای با پوشش IP 65 است و می‌تواند مستقیماً بر روی بدنه ماشین و یا در یک پانل کنترل قرار داده شود. سه پارامتر ورودی مختلف برای این دستگاه وجود دارد که براساس نوع ماشین مورد بازرسی و کاربرد آن انتخاب می‌شوند. این پارامترها عبارتند از:

- ارتعاشات مطلق
برای مانیتورینگ ارتعاشات محفظه یاتاقان‌ها مناسب می باشد. سنسورهای ارتعاشی شتاب سنج یا سرعت سنج، این ارتعاشات را اندازه‌گیری می‌کنند.
- ارتعاشات نسبی
برای مانیتورینگ ارتعاشات نسبی شفت روتور نسبت به بدنه یاتاقان استفاده می‌شود. این اندازه‌گیری منحصرأ بر روی یاتاقانهای لغزشی و بوسیله سنسورهای جریان گردابی غیرتماسی انجام می‌شود.
- جابجایی محوری شفت
برای اندازه‌گیری جابجایی محوری شفت نسبت به یاتاقان محوری (مرجع اندازه‌گیری موقعیت محوری) استفاده می‌شود. این اندازه‌گیری نیز بوسیله سنسورهای جریان گردابی غیرتماسی انجام می‌شود.



شکل ۳۱: دستگاه VC1000

❖ آنالایزر VIBRO CONTROL 1100

این دستگاه (شکل ۳۲) وظیفه محافظت از تجهیزات بحرانی را بوسیله توانائی دو کاناله خود که قادر به مانیتور کردن ارتعاشات و شرایط یاتاقان به طور همزمان است، به خوبی انجام می‌دهد. بوسیله آن می‌توان سیگنال‌های ارسالی از شتاب‌سنج و یا ترنسدیوسر سرعت مطلق را به انواع مختلفی از پارامترهای اندازه‌گیری مانند شتاب، سرعت و مکان تبدیل نمود. در هر کانال، همواره یک جریان یا ولتاژ DC متناسب با مقدار اندازه‌گیری شده برای اتصال به PLC موجود است. واحد کنترلی با شش محدوده هشدار قابل تنظیم از قبل برنامه‌ریزی شده است. این سیستم حتی قادر به برنامه‌ریزی برای خاموش کردن دستگاه مورد بازرسی می‌باشد.

این دستگاه دارای یک پوشش آلومینیومی محکم است که می‌تواند بطور دائم در نزدیکی هر منطقه صنعتی نصب گردد. همچنین بوسیله بسته نرم‌افزاری آن، می‌توان نمودار میله‌ای مقادیر اندازه‌گیری شده را علاوه بر حالت هشدار مشاهده نمود. این آنالایزر مجهز به میکروپروسسور دارای امکانات زیر می‌باشد:

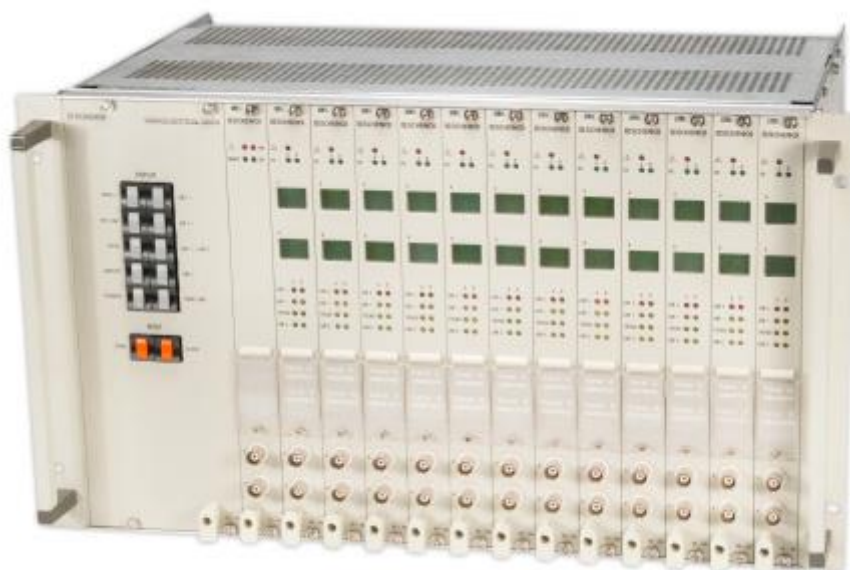
- سنسورهای شتاب
- مانیتورینگ 1 یا 2 کاناله
- اندازه‌گیری جابجائی، سرعت و شتاب و شرایط یاتاقان غلتشی (BCU)
- منبع تغذیه 115/230 VAC و خروجی 0-4 mA DC
- 2 رله حدی همراه با رله ایمنی
- صفحه LCD برای نمایش اندازه‌گیری‌ها، تنظیمات و گزارش اتفاقات
- اتصال سری به دیگر واحدهای VC-1100 و ارتباط با کامپیوتر بوسیله رابط RS-232
- کابل کشی راحت با اتصالات ترمینال دو شاخه‌ای
- محفظه آلومینیوم IP65



شکل ۳۲: دستگاه VC1100

❖ سیستم VIBRO CONTROL 4000

این دستگاه (شکل ۳۳) یک سیستم جهانی، قدرتمند، مدرن و اقتصادی برای یک برنامه مانیتورینگ ایمن است که از لحاظ کیفیت و قابلیت اطمینان جزء بهترین سیستم‌های موجود جهان است. روش پردازش سیگنال دیجیتالی به این دستگاه، انعطاف‌پذیری بیشتری برای انطباق با نیازها و ضروریات مانیتورینگ در محل می‌دهد.



شکل ۳۳: دستگاه VC 4000

❖ سیستم VIBRO CONTROL 6000

شرکت B&K سیستم مانیتورینگ VC-6000 (شکل ۳۴) را بر مبنای استانداردهای بالا با بیش از ۵۰ سال تجربه در این زمینه ارائه داده است. این سیستم قابل استفاده در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و صنایع نیروگاهی می‌باشد. همچنین قادر به مانیتورینگ دستگاه‌های مختلف از جمله توربین‌های بخار، توربین‌های گاز، توربین‌ها، کمپرسورهای رفت و برگشتی و گریز از مرکز و ... می‌باشد. این دستگاه تمام الزامات موجود در استانداردهای ISO-7919، ISO-10816 و API-670 را برآورده می‌کند.

مشخصات:

توانایی‌های مانیتورینگ این سیستم عبارت است از:

- خروج از مرکزی شفت
- اندازه‌گیری‌های برداری برای دستورات مختلف
- ارتعاشات X-Y نسبی شفت
- ارتعاشات محفظه
- انبساط نسبی شفت
- انبساط مطلق محفظه
- مقادیر متغیرهای فرآیند مانند دما، فشار و ...
- اندازه‌گیری‌های مربوط به شرایط المان‌های غلتشی یا تاقان‌ها



شکل ۳۴: دستگاه VC 6000

❖ سیستم VIBRO CONTROL 8000

این دستگاه (شکل ۳۵) جدیدترین محصول شرکت B&K برای پایش وضعیت ارتعاشی ماشین‌ها می باشد و تمامی قابلیت‌های مدل‌های قبلی را دارا می باشد. همچنین امکانات جدید به آن اضافه شده است.



شکل ۳۵: دستگاه VC 8000

۱-۲-۳-۴- شرکت بنتلی Bently Nevada (آمریکا)

سیستم بنتلی ۳۵۰۰ (شکل ۳۶) امکان مانیتورینگ آنلاین را فراهم می‌کند. این سیستم قابلیت‌های زیادی دارد و بخش‌های مختلف آن شامل:

- Instrument Rack: 3500/05
- 3500/15: یک یا دو عدد مدول تغذیه
- 3500/22M مدول Transient Data Interface Module و 3500/20 Rack Interface Module
- 3500/25: یک یا دو عدد مدول زاویه فاز
- 3500: نرم‌افزار وضعیت Rack
- 3500/XX: یک یا تعداد بیشتر مدول مانیتورینگ
- 3500/32 رله‌ی و 3500/34 رله‌ی TMR3500/34
- 3500/92: یک یا چند مدول ارتباطی
- نرم‌افزار نمایش عملکرد 3500/93، 3500/94 یا 3500/95

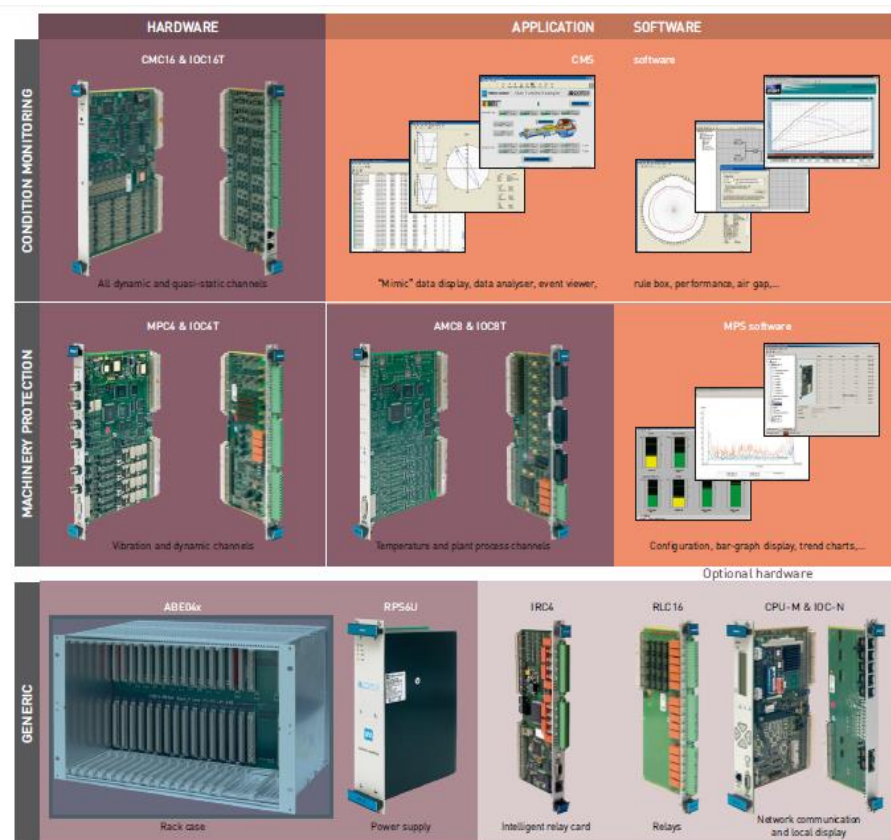


شکل ۳۶: سیستم بنتلی ۳۵۰۰

۵-۳-۲-۱- شرکت MEGGIT (VibroMeter) (سوئیس)

دستگاه VM600 (شکل ۳۷) جهت پردازش تمام پارامترها از جمله: ارتعاشات، سرعت، جابجایی، فشار دینامیکی، دما و ... در مانیتورینگ توربین‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۳۷ اجزای سیستم VM600 از جمله قسمت‌های مختلف سخت‌افزاری و نرم‌افزاری آمده است. با توجه به این شکل سخت‌افزار مانیتورینگ وضعیت CMC16 & IOC 16T بوده که تمام کلنال‌های شبه استاتیکی و دینامیکی در آن قرار دارد. دیگر قسمت‌های

سخت‌افزار دستگاه MPC4 & IOC4T دارای کانال‌های دینامیکی و ارتعاشاتی و AMC8 & IOC8T دارای کانال‌های پردازش دما می‌باشد که این دو قسمت جهت حفاظت دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم همچنین دارای قسمت تأمین قدرت RPS6U می‌باشد.



شکل ۳۷: سیستم VM600 به همراه نرم‌افزار مربوطه

جدول ۲۷ جهت مقایسه قابلیت‌های سخت‌افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی بسیار مفید است.

جدول ۲۷: مقایسه قابلیت‌های سخت افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی

نوع حرکت	کشور	نام دستگاه	تعداد کانالهای سیگنال ورودی	تعداد کانالهای نورسنج ورودی	شدت شبکه (Mb/s)	تعداد پشتهای ورودی	کانالهای خروجی مولد	فاکریتم باند فرکانسی (KHZ)	Interface	Cepstrum	FFT	Envelop	Balancing	Order Analysis	Shock Pulse	Waterfall	Time Waveform	Reporter
Oros (use with a PC)	فرانسه	OR34	2,4	2	100	24	1	40	USB	--	>	--	>	>	--	--	--	>
		OR35	4,6,8	2	100	24	2	40	USB	--	>	--	--	>	--	--	--	>
		OR36	4,8,12,16	2	100	24	2	40	USB	--	>	--	--	>	--	--	--	>
		OR24	2,4	1	--	24	2	20	USB	--	>	--	>	>	--	--	--	>
Iotech (use with a PC)	امریکا	Zonic book	8-56	2	2	24	1	20	Ethernet	>	>	--	>	--	--	>	--	>
		Wave book	16	2	100	16	1	20	Ethernet	>	>	--	>	--	--	>	>	>
Brüel & Kjær Vibro	دانمارک	VC4000	24	2	-	24	2	40	Ethernet	>	>	>	>	>	>	>	>	>
		VC6000	48	2	-	24	2	40	Ethernet	>	>	>	>	>	>	>	>	>
		VC8000	48	2	-	24	2	40	Ethernet	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Bently Nevada	امریکا	Bently 3500	36	2	-	24	2	40	Ethernet	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Meggitt	سوئیس	VM600	48	2	-	24	2	40	Ethernet	>	>	>	>	>	>	>	>	>

فصل سوم:

بررسی نرم افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی و
قابلیت‌های هر کدام

۱-۳-۱- نرم افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی

در این فصل قابلیت‌های نرم افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی متعلق به چند شرکت خارجی معتبر بررسی و مقایسه می شوند.

۱-۳-۱-۱- شرکت Iotech (آمریکا)

نرم افزار eZ-Analyst

قابلیت‌ها: آنالیز ارتعاشات چند کاناله همزمان (Real Time) شامل آنالیز داده‌های گرفته شده قبلی و داده‌های جدید، انتقال مستقیم به نرم‌افزارهای متداول آنالیز مودال مانند ME scope و Star Modal

نرم افزار eZ-TOMAS

قابلیت‌ها: ذخیره On-line ارتعاشات و آنالیز ماشین‌های دوار، نمایش نمودارهای طیفی آبشاری (waterfall)، مدار شفت (orbit)، قطبی (polar) و دیاگرام بود (Bode) که نشان دهنده وضعیت سلامت ماشین است.

نرم افزار eZ-Balance

قابلیت‌ها: انجام عملیات بالانس ماشین‌های دوار تا ۷ صفحه، نمایش بردارهای بالانس در نمودار قطبی برای مشاهده دیداری مراحل پیشرفت بالانس، ترسیم نمودارهای زمانی و طیفی برای نمایش اندازه‌گیری‌های جزئی ارتعاشات.

نرم افزار eZ-Rotate

قابلیت‌ها: آنالیز دقیق داده‌های اندازه‌گیری شده در ماشین‌های دوار، انجام تحلیل‌های مربوط به آنالیز مرتبه (order analysis) از طریق نمونه‌گیری مجدد از داده‌های زمانی گرفته شده، نمایش نمودار آبشاری ردیابی مرتبه (order tracked waterfall)، نمودار بود دامنه و فاز.

۱-۳-۱-۲- شرکت Data Translation (آمریکا)

نرم‌افزارهای شرکت D.T. با استفاده از قابلیت‌های مدول‌های سخت‌افزاری در بهتر کردن جمع‌آوری اطلاعات نقش مهمی را ایفا می‌کنند.

در این قسمت به دو نرم‌افزار ارائه شده اشاره می‌شود:

- نرم افزار QuickDAQ

این نرم‌افزار امکان انجام تنظیمات نحوه انتقال داده‌ها، جمع‌آوری داده‌ها از کارت A/D، نمایش صفحه‌ای داده‌ها و ذخیره آنها در حافظه سیستم را فراهم می‌کند. مشخصات دیگر نرم‌افزار به شرح زیر است:

گزینه‌های انتخابی توسط کاربر در منوی داده‌گیری شامل:

- ورودی آنالوگ منفرد؛ یک مقدار منفرد از کانال آنالوگ ورودی دریافت می‌کند.
- اسکوپ: انجام عملیات بر روی ورودی آنالوگ پیوسته و نمایش اطلاعات با استفاده از اسیلوسکوپ
- نمودار میله‌ای: نمایش داده‌ها از طریق نمودار میله‌ای

- طیف فرکانسی: انجام عملیات FFT بر روی یک کانال ورودی آنالوگ
- خروجی آنالوگ: فرستادن یک مقدار منفرد از کانال خروجی آنالوگ
- خروجی دیجیتال: فرستادن سیگنال دیجیتال از کانال خروجی
- مولد پالس؛ فرستادن یک پالس یا سیگنال پیوسته‌ای از پالسها
- مولد موج: تولید و فرستادن موجهای آنالوگ پیوسته مثلثی، مربعی و سینوسی

– نرم افزار SpectraPLUS-DT

این نرم افزار پیشرفته آنالیز ارتعاشات دارای قابلیت‌های زیادی در تحلیل و نمایش اطلاعات ارتعاشی می باشد که برخی از آنها به شرح زیر می باشد:

آنالیز ارتعاشات چند کاناله همزمان (Real Time)، ذخیره On-line ارتعاشات و آنالیز ماشین‌های دوار، نمایش نمودارهای طیفی آبشاری (waterfall)، مدار شفت (orbit)، قطبی (polar) و دیاگرام بود (Bode)، انجام تحلیل‌های مربوط به آنالیز مرتبه (order analysis)

۳-۱-۳- شرکت Brüel & Kjær Vibro (دانمارک)

این شرکت نرم افزارهای متعددی در زمینه تحلیل داده های ارتعاشی دارد که مشخصات برخی از آنها در زیر آمده است:

نرم افزار VIBROCAM 5000

این سیستم مانیتورینگ به طور مشخص برای مانیتورینگ توربوماشین‌ها، بویژه توربوماشین‌های نیروگاهی طراحی شده است و قابلیت‌های مهم آن به شرح زیر است:

- تشخیص عیوب ماشین‌ها در مراحل اولیه آن (قبل از اینکه عملکرد ماشین دچار نقص شود و یا سیستم حفاظت ماشین اعلام هشدار کند)
- آرشیوبندی تمامی داده های جمع آوری شده و پردازش آنها در بازه‌های زمانی منظم

نرم افزارهای XMS , Compass 6000

این نرم افزارها داده های ارتعاشی جمع آوری شده توسط یک دستگاه پرتابل نظیر VibroTest60 و یا یک سیستم سخت افزاری آنلاین نظیر VibroControl 6000 را دریافت و تحلیل و عیب یابی می کند.

این نرم افزارها اکثر تحلیل های ارتعاشی مورد نیاز برای تشخیص عیب را دارا می باشد که در جدول ۲۸ به آنها اشاره شده است.

نرم افزار SetPoint CMS

این نرم افزار بصورت آنلاین داده های ارتعاشی اخذ شده توسط سیستم سخت افزاری آنلاین VibroControl 8000 را دریافت و تحلیل و عیب یابی می کند. این نرم افزار برای پایش وضعیت ماشینهای دوار و رفت و برگشتی در کارخانه های بزرگ خصوصا نیروگاه ها و کارخانه های پتروشیمی تهیه شده است.

۴-۱-۳-۱- شرکت زیمنس Siemens (آلمان)

نرم افزار Vibro-Expert CM500

این نرم افزار علاوه بر انجام انواع تحلیلهای ارتعاشی بصورت آنالین، دارای ماژول عیب یابی نیز می باشد و احتمال بروز عیوب نامیزانی، خرابی یاتاقان، عدم هم محوری، ترکها و قطعات لق نمایش می دهد.

جدول ۲۸ قابلیت‌های متنوع نرم‌افزارهای آنالیز ارتعاشات را با هم مقایسه می‌کند.

جدول ۲۸: مقایسه قابلیت‌های نرم‌افزارهای آنالیز ارتعاشات

شرکت	کشور	نام نرم‌افزار	FFT	Time waveform	Water fall	Balancing	Cepstrum	Envelop	CPB Spectra	Archiving	Order Tracking	Trending	Fault Diagnosis
Iotech	امریکا	Ez-analyst	✓	--	--	--	✓	✓	--	--	--	--	--
		Ez-Tomas	✓	--	✓	--	✓	✓	--	--	--	--	--
		Ez-Balance	--	--	--	✓	--	--	--	--	--	--	--
		Ez-rotate	✓	✓	--	--	✓	✓	--	--	✓	--	--
Siemens	آلمان	Vibroexpert cm-500	✓	✓	--	--	✓	✓	--	✓	--	✓	✓
Brüel & Kjær Vibro	دانمارک	SetPoint CMS	✓	✓	--	--	✓	✓	--	✓	--	✓	✓
		Compass 6000	✓	✓	--	--	✓	✓	--	✓	--	✓	✓
		XMS	✓	✓	--	--	✓	✓	--	✓	--	✓	✓
		Vibrocams-5000	✓	✓	--	--	✓	✓	--	✓	--	✓	✓
Data Translation	امریکا	SpectraPLUS-DT	✓	✓	✓	--	✓	✓	✓	✓	✓	✓	--
		QuickDAQ	✓	✓	✓	--	✓	✓	--	✓	--	--	--

۱-۴-مراجع بخش اول

- [1] Victor Wowk, "Machinery Vibration: Measurement and Analysis", McGraw-Hill, 1991
- [2] Robert C. Eisenmann, "Machinery Malfunction Diagnosis and Correction", Prentice-Hall, 1998
- [3] Lindley R. Higgins, "Maintenance Engineering Handbook", McGraw-Hill, 1998
- [4] "Handbook of condition monitoring", Davies A., first edition, Chapman and Hall publications, 1998.
- [۵] بهرام ناصری پور ، "شتاب سنج"، نشریه فناوری آزمون و اندازه‌گیری، شماره دوم (زمستان ۱۳۹۳) و شماره سوم ۰ (بهار ۱۳۹۴)، www.testmag.ir
- [۶] سایتهای اینترنتی سازندگان تجهیزات پایش وضعیت ارتعاشی (برای مطالب بند ۱-۶ فصل اول و فصلهای دوم و سوم)

بخش دوم

فصل اول:

بررسی انواع روشهای رایج آنالیز ارتعاشات و کاربردهای آنها

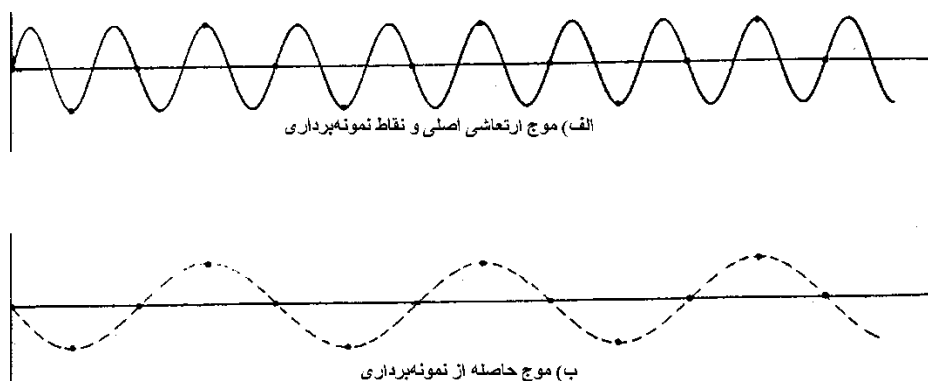
۲-۱-۱- مقدمه

ارتعاشات در ماشینها، معمولا در اثر وجود عیب (یا عیوب) تولید می‌شود. برای تشخیص علت آن باید مشخصه‌ها و علائم ارتعاشی اندازه‌گیری و بررسی و تحلیل شوند. بنابراین آشنایی با انواع روشهای پردازش و تحلیل سیگنالهای ارتعاشی و همچنین قابلیت‌ها و محدودیتهای آنها الزامی است. پردازش سیگنال شامل قسمتهای مختلفی از قبیل: تقویت سیگنال، فیلتر کردن، نمونه‌برداری، انعکاس، ویندوینگ، میانگین‌گیری، تحلیل فرکانسی و ... می‌باشد و هدف کلی این مرحله، آماده‌سازی سیگنال‌های خام ارتعاشی برای نمایش و استفاده در قسمت عیب‌یابی می‌باشد.

۲-۱-۲- نمونه‌برداری (Sampling)

نمونه‌برداری عبارت از انتخاب صحیح یک بلوک زمانی از داده‌های ارتعاشی برای پردازش می‌باشد. در این قسمت شکل موج تقویت شده و فیلتر شده، به جدولی از اعداد تبدیل می‌شود و این جدول اعداد در حافظه کامپیوتر می‌ماند و ادامه تحلیلها بر اساس این اعداد انجام می‌گیرد. هرچه سرعت نمونه‌برداری بیشتر باشد، بهتر است زیرا ممکن است سیگنالهایی با فرکانس خیلی زیاد در سیگنال ورودی وجود داشته باشد و فرکانس نمونه‌برداری باید بیشتر از فرکانسهای موجود در سیگنال ورودی باشد تا بطور کامل آنرا نمونه‌برداری کند. البته زیاد بودن بیش از اندازه سرعت (فرکانس) نمونه‌برداری نیز مشکل‌ساز می‌باشد، زیرا باعث انجام یک سری عملیات کامپیوتری اضافی و وقتگیر و هزینه‌کردن یک کامپیوتر قویتر می‌شود که در نهایت موجب اتلاف وقت و هزینه می‌شود. برای تعیین حداقل فرکانس نمونه‌برداری از معیاری به نام «معیار نایکوئیست» استفاده می‌شود. طبق این معیار، برای مدل کردن صحیح یک موج پریودی، باید فرکانس نمونه‌گیری (f_s) بزرگتر از دو برابر فرکانس موج ورودی (f) باشد (یعنی $f_s > 2f$).

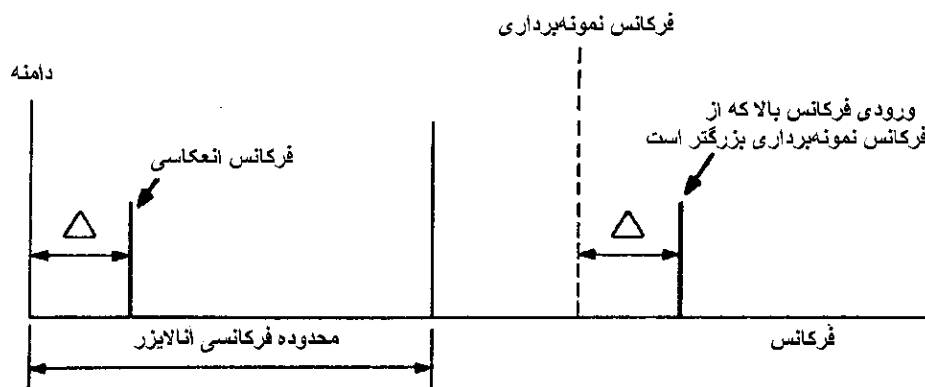
در شکل ۳۸ مثالی از نمونه‌برداری نادرست با فرکانسی کمتر از معیار نایکوئیست نشان داده شده است [۲ و ۱].



شکل ۳۸: نمونه‌برداری از موج با سرعتی کمتر از معیار نایکوئیست

۲-۱-۳- انعکاس (Aliasing)

در نمودارهای FFT، سیگنال‌های با فرکانس بالا ممکن است باعث ایجاد نقاط ماکزیمم مجازی، در فرکانس‌های پایین‌تر شوند، که در واقعیت چنین موجهایی با این فرکانسها وجود ندارد و فقط انعکاس موجهایی با فرکانس بالاتر هستند. این پدیده در صورتیکه فرکانس نمونه‌گیری خیلی کم باشد بوجود می‌آید. به این شکل که اگر فرکانسی به مقدار Δ از فرکانس f_s بیشتر باشد (یعنی برابر $f_s + \Delta$ باشد)، در نمودار FFT در فرکانس Δ انعکاس می‌گذارد و یک نقطه ماکزیمم مجازی بوجود می‌آید (شکل ۳۹).



شکل ۳۹: تأثیر انعکاس در طیف فرکانسی

برای جلوگیری از ایجاد این پدیده یک راه این است که f_s افزایش داده شود. (بطوریکه معیار نایکویست را ارضاء کند). راه دیگر این است که موج ورودی، از یک فیلتر پایین‌گذر (Low-pass filter) عبور داده شود تا فرکانس‌هایی که توسط کارت A/D نمونه‌گیری می‌شوند محدود شوند. این فیلترها (Antialias filter) نام دارند. چون این پدیده فقط در نمودارهای حوزه فرکانسی بوجود می‌آید، هنگام کار در حوزه زمان، این فیلتر را غیر فعال می‌کنند [۲۱].

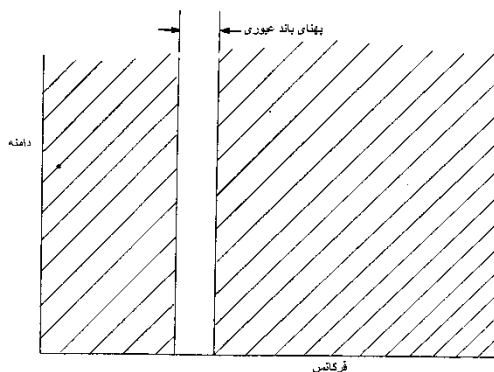
۲-۱-۴- تقویت سیگنال

سیگنال ورودی قبل از هر چیز توسط آمپلی‌فایرها (Amplifier) تقویت می‌شود. در این مرحله سعی می‌شود که قسمت اصلی سیگنال نسبت به نویز بیشتر تقویت شود. امروزه دستگاه‌های ذخیره‌کننده اطلاعات و دستگاه‌های تحلیلگر فرکانس به آمپلی‌فایر مجهز هستند و بطور اتوماتیک عمل تقویت سیگنال را انجام می‌دهند [۲۱].

۲-۱-۵- فیلتر کردن (Filtering)

فیلتر وسیله‌ای است که برخی از فرکانس‌های خاص را از خود عبور می‌دهد و بقیه را حذف می‌کند. برای انجام هرگونه تحلیل ارتعاشات باید مؤلفه‌های فرکانسی ارتعاشات تفکیک شوند. ساده‌ترین روشی که برای جداسازی

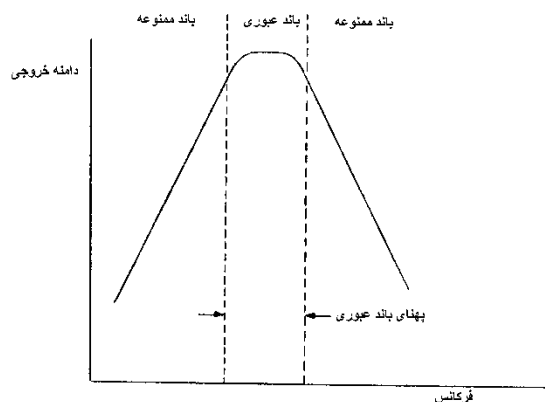
مؤلفه‌های فرکانسی یک سیگنال ارتعاشی در حالت آنالوگ بکار می‌رود، استفاده از فیلتر با باند عبور متغیر است. (دقیقاً مثل تیونر رادیو، که بجز یک فرکانس دلخواه بقیه را حذف می‌کند.) در عمل فیلترها ایده‌آل نیستند (شکل ۴۰) و علاوه بر باند فرکانسی مورد نظر، مقدار کمی هم در اطراف مرزها و خارج از محدوده تعریف شده هم، سیگنال را عبور می‌دهند (شکل ۴۱).



شکل ۴۰: فیلتر ایده‌آل

فیلترها بسته به نوع کاربرد، انواع مختلفی دارند. مثلاً بعضی از آنها دارای باند فرکانسی متغیر می‌باشند و می‌توان محدوده فرکانسی آنها را تغییر داد.

نوع دیگری از فیلترها که برای زمان راه‌اندازی و توقف ماشین بکار می‌رود، فیلتر دنباله‌رو (Tracking filter) می‌باشد. این فیلتر نوعی فیلتر با یک باند عبوری باریک است که می‌توان آنرا روی فرکانس کاری ماشین قفل کرد، بطوریکه در صورت تغییر سرعت کاری محور، این باند نیز جابجا می‌شود و باز هم روی فرکانس کاری قرار می‌گیرد [۲۱].



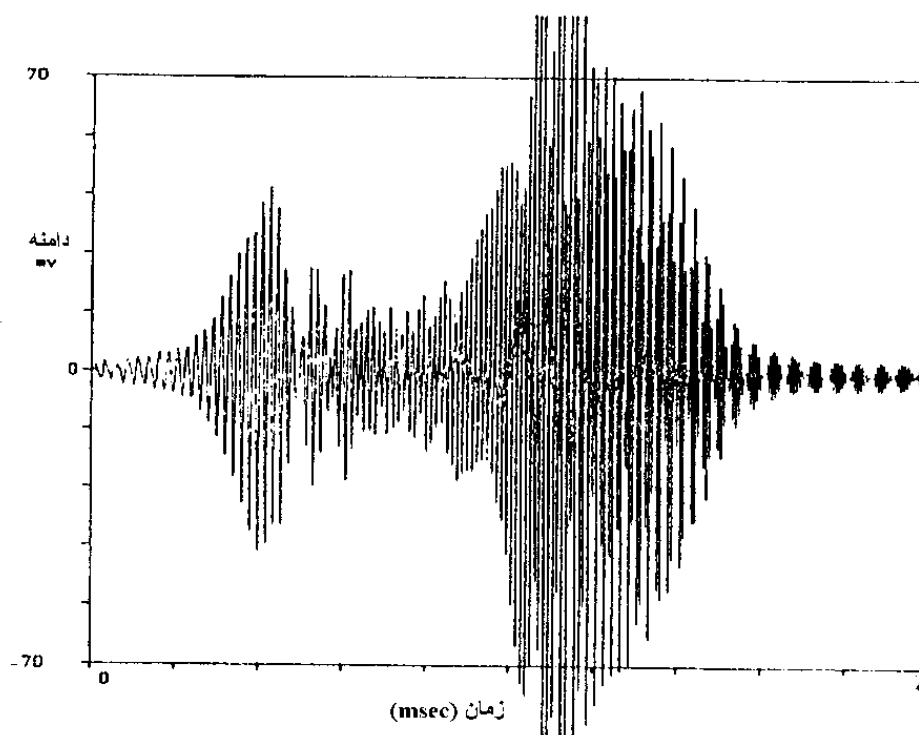
شکل ۴۱: فیلتر واقعی

۲-۱-۶- شکل موج زمانی (Time Waveform Analysis)

در این نمودار محور عمودی نشان‌دهنده دامنه سیگنال ارتعاشی و محور افقی نمایانگر زمان می‌باشد. در عمل سیگنال دارای فرکانسهای مختلفی است و شکل موج مشاهده شده خیلی پیچیده می‌شود. معمولاً برای ساده کردن شکل

موج ارتعاشی باید از فیلترهای پایین‌گذر و بالا‌گذر استفاده شود. بطور کلی این روش برای بررسی حالات گذرا، ضربه، ضربان و ناپایداری‌ها مناسب است. اما معمولاً جدا کردن نویز و فرکانس‌های زائد از سیگنال بسیار دشوار می‌باشد.

برای تحلیل ارتعاشات در حالت گذرا بهتر است که از شکل موج زمانی استفاده شود، زیرا این حالت در حوزه فرکانس بخوبی مشاهده نمی‌شود چون این امواج ارتعاشی بطور متناوب تکرار نمی‌شود. بنابراین برای بررسی پاسخ ضربه و انفجار و حالت‌های استارت و توقف ماشین‌ها باید از شکل موج زمانی استفاده شود. برای مثال شکل موج زمانی مربوط به حالت استارت یک ماشین در شکل ۴۲ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان ۲ نقطه تشدید را بوضوح مشخص کرد. همچنین یک فرکانس ضربان (beat) پس از رسیدن به حالت پایدار و دور کامل شفت در ماشین مشاهده می‌شود [۲۱].



شکل ۴۲: نمودار شکل موج زمانی مربوط به زمان راه‌اندازی برای یک ماشین خاص

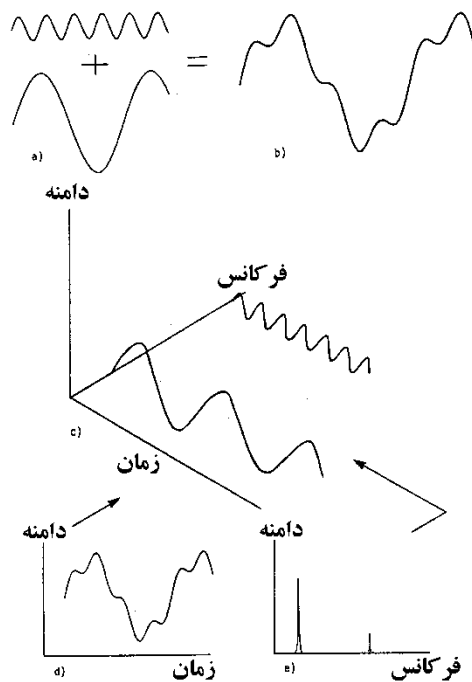
- اصلاح نمودار شکل موج زمانی

هدف اصلی از اصلاح نمودار موج زمانی حذف برخی از اجزای نامطلوب سیگنال که مرتبط با رفتار مکانیکی ماشین نیستند، می‌باشد. نویزها، انحرافات الکتریکی و مکانیکی (runout)، خمیدگی و... می‌توانند باعث عدم وضوح در اطلاعات دینامیکی ماشین شوند. همچنین عیوب موجود بر روی سطح شفت (مانند خراشیدگی‌ها) باعث ایجاد سیگنال‌هایی شده که در هر گردش تکرار گشته و از طرفی معرف رفتار دینامیکی شفت نمی‌باشند. به منظور آشکارسازی بهتر اطلاعات دینامیکی، لازم است تا این نویزها و سیگنال‌های نامطلوب حذف گردند. یکی از اصلاحات مهمی که بر روی نمودار موج زمانی انجام می‌پذیرد، اصلاح گردش آهسته (slow roll) می‌باشد.

سنسورهای جابجایی سنج در سرعت گردش آهسته دارای خروجی قابل توجهی می‌باشند. در حالیکه در سرعت گردش آهسته خروجی سنسورهای سرعت سنج و شتاب سنج به شدت کم می‌باشد. به همین علت، اصلاح گردش آهسته معمولاً برای سنسورهای جابجایی سنج مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمودار شکل موج زمانی فیلتر شده (فیلتر $1X$ ، $2X$ و...) یا فیلتر نشده را می‌توان با استفاده از بردارهای گردش آهسته‌ی فیلتر شده $1X$ ، $2X$ و ... یا فیلتر نشده اصلاح نمود. برای این کار کافی است تا نمودار گردش آهسته را از نمودار اصلی شکل موج زمانی ارتعاشات کم کرد. شروع نمونه برداری از سیگنالها باید منطبق بر علامت زمانی (keyphasor) شفت باشد [۳].

۲-۱-۷- حوزه فرکانس و حوزه زمان

نموداری که روی صفحه اسیلوسکوپ دیده می‌شود، نشانگر مقدار دامنه ارتعاشات بر حسب زمان می‌باشد. راه دیگری که برای مشاهده ارتعاشات وجود دارد آن است که، تغییرات دامنه نسبت به فرکانس بررسی شود. نمایش حوزه فرکانس یکی از قویترین روشها برای مانیتورینگ ماشینها می‌باشد. تمام روشهای تعمیرات پیش‌بینانه و تشخیص عیب ماشینها، ارتعاشات را در حوزه فرکانس نمایش می‌دهند. فوریه نشان داد که هر سیگنال متناوب پیچیده، ترکیبی از چندین موج سینوسی ساده می‌باشد. هر یک از این موجهای سینوسی دارای دامنه و فرکانس متفاوتی می‌باشد. هنگامیکه این امواج سینوسی با هم جمع شوند، سیگنال برآیند حاصل می‌شود. در شکل ۴۳ مفهوم تجزیه یک موج پیچیده به مؤلفه‌های سینوسی‌اش به خوبی نشان داده شده است. در شکل (a) دو موج سینوسی ساده مشاهده می‌شود که فرکانس و دامنه‌هایشان با هم متفاوت است. در شکل (b) ترکیب این دو موج نشان داده شده است. این نمودار شکل موج در حوزه زمان است که توسط اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شود (شکل d). اگر این موج بر اساس مؤلفه‌های فرکانسی‌اش نمایش داده شود، شکل (e) حاصل می‌شود. در این شکل دامنه موج در فرکانسهای مختلف نمایش داده می‌شود و هر یک از خطوط عمودی نشانگر دامنه حداکثر یک موج سینوسی است. شکلهای (d) و (e) مشاهده نمودار سه‌بعدی شکل (C) از دو راستای مختلف (عمود بر هم) می‌باشد. حوزه‌های زمان و فرکانس مانند، نگاه کردن به یک اتاق از دو پنجره مختلف است. یعنی داده‌های ارتعاشی ثابت هستند ولی نقطه دید تغییر کرده است [۲ و ۱].



شکل ۴۳: مفهوم حوزه فرکانس و حوزه زمان

- (a) دو موج سینوسی، (b) برآیند دو موج سینوسی، (c) نمایش سه‌بعدی نمودار موج در حوزه زمان (که در اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شود) (d) نمودار موج در حوزه فرکانس (که در دستگاه آنالایزر دیده می‌شود) (e)

تحلیل داده‌های ارتعاشی در حوزه فرکانس، دارای مزایای زیادی از قبیل موارد زیر می‌باشد:

- ۱- عیوب ارتعاشی معمولاً از موقعیت نقاط ماکزیمم نمودار FFT مشخص می‌شوند.
- ۲- محاسبات روند پیشرفت عیب (Trending) در حوزه فرکانسی بهتر انجام می‌شود.
- ۳- سیگنال‌های کوچک نیز در حوزه فرکانسی قابل رؤیت می‌باشند.

۲-۱-۸- طیف فرکانسی (نمودار FFT)

سیگنالی که از طریق ترانسیدیوسرها دریافت می‌شود، معمولاً مقدار دامنه ارتعاشات بر حسب زمان را نشان می‌دهد. برای اینکه این موج به حوزه فرکانس برده شود و مؤلفه‌های فرکانسی موجود در آن شناسایی شود، باید از آن تبدیل فوریه گرفته شود. چون امکان دریافت و ذخیره داده‌های ارتعاشی بصورت آنالوگ وجود ندارد، بنابراین داده‌ها توسط کارت A/D بصورت دیجیتال درآمده و ذخیره می‌شوند، به این علت از تبدیل فوریه استفاده می‌شود [۲۱].

فاصله زمانی بین نمونه‌ها (Δt) و فاصله فرکانسی بین دو نقطه متوالی در نمودار FFT از روابط زیر محاسبه می‌شود:

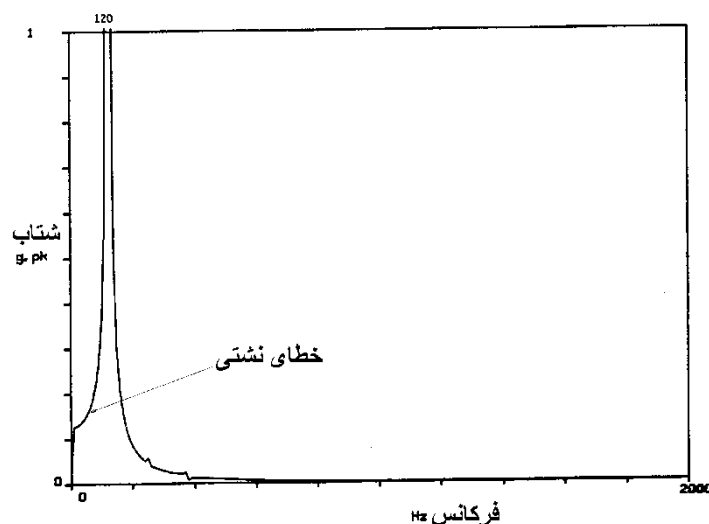
$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad \Delta t = \frac{1}{f_s}$$

فاصله فرکانسی Δf را تفکیک پذیری فرکانسی (frequency resolution) نیز می‌نامند. برای افزایش تفکیک پذیری فرکانسی (کوچکتر شدن Δf) باید یا تعداد نمونه‌ها افزایش یابد (در f_s ثابت) یا فرکانس نمونه‌برداری کاهش داده شود (با N ثابت).

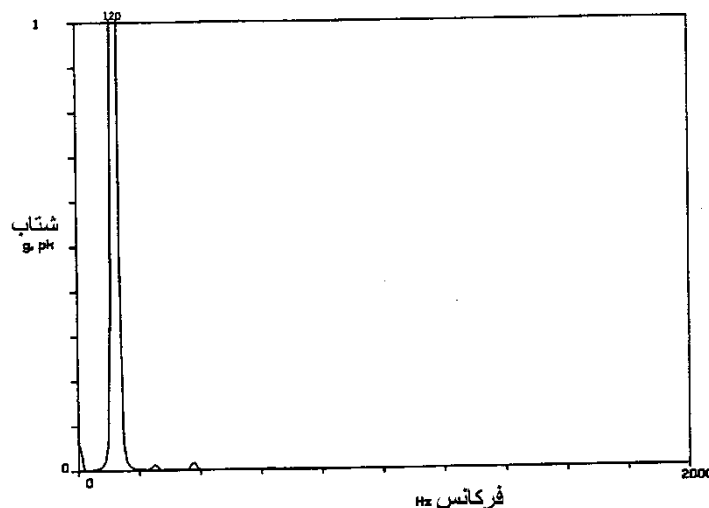
۲-۱-۹- ویندوینگ (Windowing)

هنگام محاسبه FFT فرض می‌شود که سیگنال نمونه‌گیری شده، یک پریود کامل از موج ورودی است و قبل و بعد از آن هم تکرار می‌شود.

اگر نقاط ابتدایی و انتهایی سیگنال بر هم منطبق نباشند، در نمودار FFT خطایی رخ می‌دهد که خطای نشتی (Leakage) نام دارد. این خطا باعث نشت دامنه برخی از ماکزیمم‌ها به اطراف شده و موجب غیر واقعی شدن سیگنال‌های کناریشان در نمودار FFT می‌شود (شکل ۴۴). برای اجتناب از این خطا، داده‌های ورودی توسط یک تابع ریاضی وزن داده می‌شوند (شکل ۴۵).



شکل ۴۴: نمایش موج در حوزه فرکانس بدون استفاده از تابع ویندوینگ



شکل ۴۵: نمایش موج در حوزه فرکانس با استفاده از تابع ویندوینگ (Hanning)

با این کار کاهش کمی در مقادیر دامنه ارتعاشات بوجود می‌آید ولی خطای ناشی از بکارگیری توابع ویندوینگ، کمتر از خطای ناشی هستند.

چند تابع متداول برای ویندوینگ عبارتند از: تابع Von Hann، تابع Hamming و تابع Rectangular (در این حالت از هیچ تابعی استفاده نمی‌شود) که انتخاب تابع مناسب برای ویندوینگ به نوع کاربرد بستگی دارد.

از بین توابع مختلف برای ویندوینگ، تابع هن (Von Hann) کاربرد بیشتری دارد. زیرا که نقاط ابتدا و انتهای سیگنال ورودی، در این حالت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، و در نتیجه پیوستگی سیگنال در ابتدا و انتها برقرار می‌شود و خطای ناشی خیلی کاهش می‌یابد.

استفاده از تابع متناوب هن برای ویندوینگ، باعث ایجاد یک مقدار ماکزیمم در فرکانس مربوط به این تابع می‌شود، که به دلایل زیر چندان محسوس نمی‌باشد.

زمان تناوب موج کسینوسی تابع هن برابر است با کل زمان نمونه برداری ($T = \text{Total sampling time}$)، یعنی بزرگترین زمان تناوب ممکن. زیرا زمان تناوب موجهای دیگر موجود در سیگنال ورودی (در صورت وجود)، کوچکتر از کل زمان نمونه برداری می‌باشند. بنابراین فرکانس موج کسینوسی تابع هن برابر است با:

$$f_H = \frac{1}{T}, \quad T = N \times \Delta t$$

که در آن Δt برابر فاصله زمانی بین دو نمونه اندازه‌گیری شده، توسط ترانسیدوسر، و N تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد. اگر فرض کنیم f_s برابر فرکانس نمونه‌گیری و Δf برابر فاصله فرکانسی بین دو نقطه متوالی در نمودار FFT باشد، داریم که:

$$f_H = \frac{1}{N \times \Delta t} = \frac{1/\Delta t}{N} = \frac{f_s}{N} = \Delta f$$

چون T بزرگترین زمان تناوب ممکن است، بنابراین f_H کوچکترین فرکانس ممکن می‌باشد. یعنی فرکانس تابع هن در اولین نقطه نمودار FFT تأثیر می‌گذارد.

برای اینکه این فرکانس در تشخیص عیب تأثیر نگذارد، باید محدوده فرکانس محور افقی طوری انتخاب شود که خیلی کوچکتر از محدوده فرکانسی عیوب ارتعاشی باشد تا با هم تداخل نداشته باشند.

استفاده از تابع هن دامنه ارتعاشات را اندکی کاهش می‌دهد، اما چون در مقدار نسبی دامنه ارتعاشات (نه مقدار مطلق آن) که برای عیب‌یابی حائز اهمیت است، تأثیر محسوسی نمی‌گذارد، بنابراین این کاهش مشکل خاصی ایجاد نمی‌کند. اما در صورت لزوم، برای افزایش مقادیر دامنه، آنها را در ضریب ثابتی ضرب می‌کنند. برای مثال در برخی مراجع ضریب $\sqrt{8/3}$ برای افزایش دامنه در نظر گرفته شده است [۲۱].

۲-۱-۱۰- میانگین‌گیری (Averaging)

سیگنال ارتعاشی که از ماشین‌های دوار دریافت می‌گردد کاملاً مشخص و شفاف نمی‌باشند، یعنی سیگنال ارتعاشی با نویز و ارتعاشات مزاحم محیط ترکیب می‌شود.

هر چه تلرانس قطعات لغزنده و دوار کمتر باشد، مقدار نویز در سیگنال ارتعاشی کمتر مشاهده می‌شود. در بسیاری از سیستمها مقدار نویز آنقدر بزرگ است که دامنه ارتعاشات متناوب ناشی از عیوب را می‌پوشاند و نمی‌توان رشد عیوب را شناسایی نمود. برای غلبه بر این مشکل باید از سیگنال در حوزه زمان (با کاربرد نشانه زمانی Trigger) میانگین‌گیری نمود. سیگنال بدست آمده تقریباً نشان‌دهنده فرکانسهای متناوب می‌باشد که در هر دوران شفت وجود دارد. برای عیب‌یابی می‌توان طیف فرکانسی سیگنال میانگین را بدست آورد.

این روش برای بررسی عیوب گیربکسها و ماشینهایی که دارای قطعات دوار متعددی می‌باشند مناسب می‌باشد. مشکل این روش این است که در ماشینهایی که دارای یاتاقانهای بلبرینگی (غلطکی) می‌باشند، قابل کاربرد نیست. چراکه فرکانس عیوب این یاتاقانها هم سرعت با سرعت دوران محور ماشین نیست و بنابراین در خلال میانگین‌گیری این فرکانسها از سیگنال حذف می‌شوند.

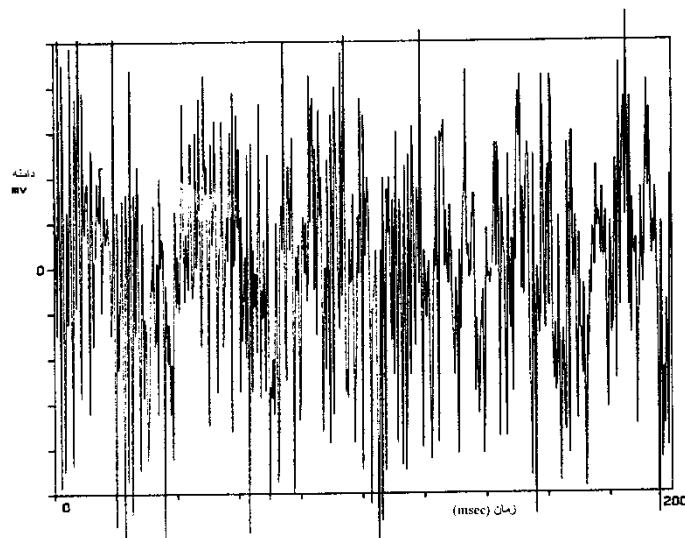
میانگین‌گیری، قابلیت ترکیب بلوکهای زمانی مختلف برای افزایش دقت نمودار FFT می‌باشد. میانگین‌گیری باعث می‌شود که نویزهای با فرکانس پایین حذف شوند و دامنه‌ها، حالت پایدار را نشان دهند. میانگین‌گیری ممکن است به این صورت انجام شود که ابتدا از بلوکهای مختلف داده‌ها، FFT گرفته شود و سپس مقادیر متناظر در نمودارهای FFT مختلف با هم جمع و میانگین گرفته شود. اما روش معمول و اقتصادی‌تر، میانگین‌گیری در حوزه زمان می‌باشد که در زیر توضیح داده شده است [۱ و ۲].

- میانگین‌گیری در حوزه زمان

علاوه بر میانگین‌گیری نمودارهای FFT، بعضی از دستگاههای آنالایزر قابلیت میانگین‌گیری در حوزه زمان را نیز دارند. چون طول بلوک زمانی با زمان پریود دوران محور برابر است، این روش را «میانگین‌گیری زمانی هم سرعت» (Synchronous Time averaging) می‌نامند.

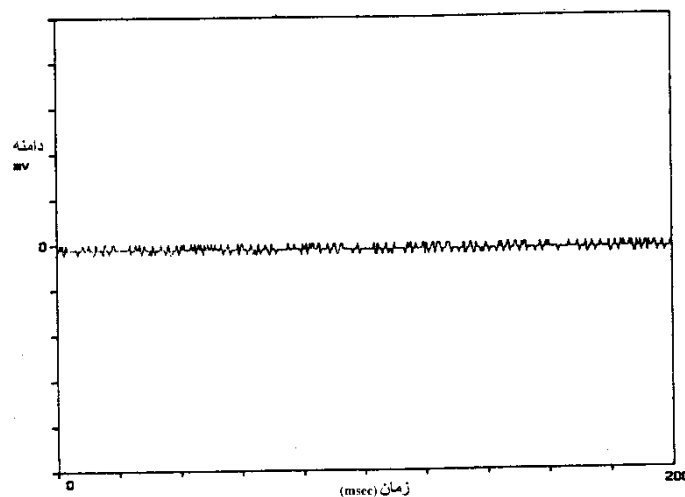
برای میانگین‌گیری در حوزه زمان، حتماً باید از علامتهای زمانی استفاده شود (timing mark)، وگرنه ممکن است پاسخ میانگین بصورت یک خط راست و یا برابر صفر شود. این کار بخاطر این است که شروع بلوک داده‌های بعدی برابر است با نقطه پایان بلوک قبلی و این هیچ ربطی به دوران ماشین ندارد. در صورت استفاده از ماشه خارجی (External Trigger)، آنالایزر برای شروع بلوک زمانی بعدی منتظر علامت (trigger) می‌ماند. ماشه خارجی ممکن است، نوار فتوالکتریک، جای خار (Keypasor)، و یا هر چیز دیگری که به قسمت متحرک بچسبد باشد. در این روش آنالایزر، بلوکهای داده‌های زمانی را که از یک نقطه مشترک (روی قسمت متحرک) شروع شده‌اند، تحلیل می‌کند.

هر پاسخی که در بلوکهای مختلف تکرار می‌شود، میانگین‌گیری می‌شود و پاسخهایی که تکرار نمی‌شوند، حین میانگین‌گیری حذف می‌شوند. نویزهای راندوم (از قبیل پدیده توربولانس)، در خلال میانگین‌گیری زمانی حذف می‌شوند.



شکل ۴۶: نمودار موج در حوزه زمان بدون میانگین‌گیری (سرعت دورانی محور ۸۲۲ دور در دقیقه)

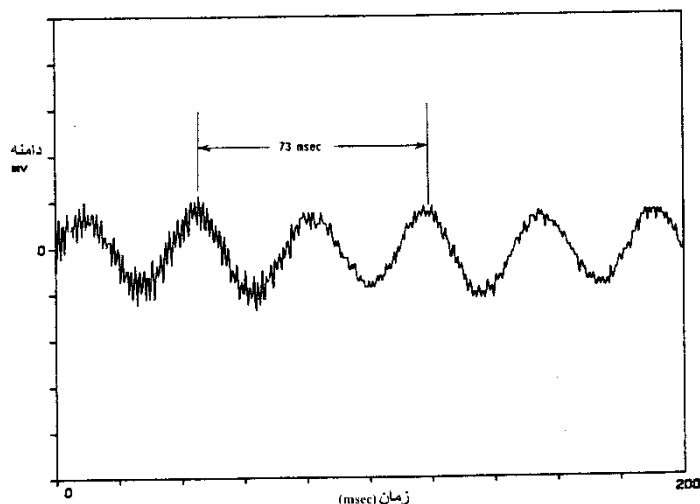
برای روشن شدن مفهوم میانگین‌گیری بهتر است که به یک مثال عملی توجه شود. شکل ۴۶ شکل موج زمانی یک محور دوار را برای مدت ۲۰۰ میلی ثانیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که از این شکل نتیجه‌ای حاصل نمی‌شود، وقتی که از این سیگنال برای یک پریود طولانی بدون علامت میانگین‌گیری می‌شود، تقریباً یک خط راست نتیجه می‌شود که در شکل ۴۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۴۷: نمودار موج در حوزه زمان پس از ۱۰۲۴ بار میانگین‌گیری بدون کاربرد نشانه زمانی

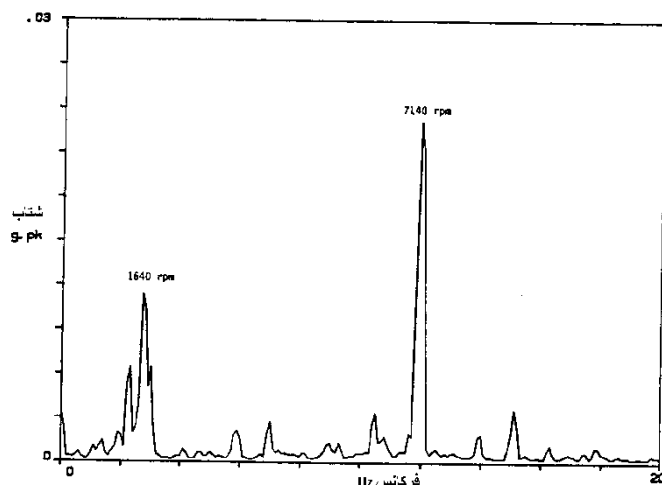
اما وقتی که میانگین‌گیری به کمک علامت زمانی انجام می‌شود، نتیجه خیلی متفاوت است. علامت زمانی تکه‌ای نوار فتوالکتریک بوده که در هر دور شفت یک پالس، به آنالایزر می‌فرستاده است. پس از حدود ۱۰۲۴ بار میانگین‌گیری، شکل موج زمانی محور بصورت شکل ۴۸ بدست می‌آید، که به یک موج سینوسی خیلی شباهت دارد. سرعت محور برابر ۸۲۲ (دور در دقیقه) می‌باشد که پریود زمانی مربوط به آن ۷۳ میلی ثانیه می‌باشد. (یعنی در هر ۷۳ میلی ثانیه، محور یک دور می‌چرخد).

همانطور که مشاهده می‌شود، ارتعاشات محور دارای فرکانس $2 \times \text{RPM}$ می‌باشد، زیرا که در یک پریود زمانی گردش محور، موج ارتعاشی دوبار تکرار شده است.



شکل ۴۸: نمودار موج در حوزه زمان پس از 1024 بار میانگین‌گیری با کاربرد نشانه زمانی

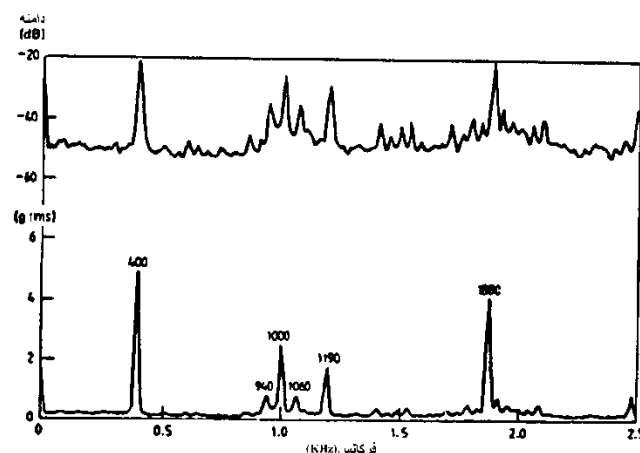
برای مقایسه نمودار FFT مربوط به شکل ۴۶، در شکل ۴۹ ترسیم شده است. از نمودار FFT نیز مشخص می‌شود که در فرکانس $2 \times \text{rpm}$ یک ارتعاش با دامنه بالا وجود دارد و در فرکانس $1 \times \text{RPM}$ ارتعاشات قابل توجهی وجود ندارد. (توجه کنید که فرکانس $2 \times \text{rpm}$ برابر است با 1644 RPM و فرکانس $1 \times \text{RPM}$ برابر 822 RPM می‌باشد).



شکل ۴۹: نمودار موج در حوزه فرکانس

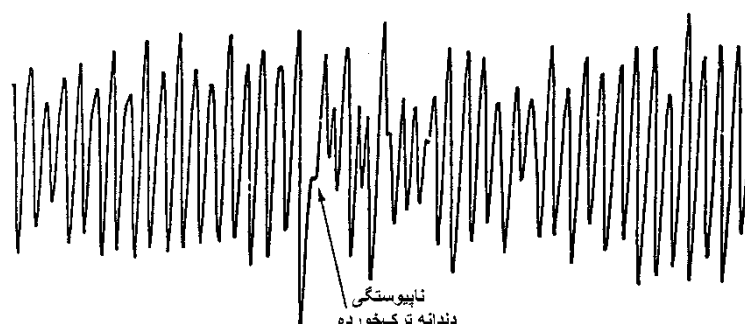
همچنین در نمودار FFT ارتعاشاتی با دامنه خیلی زیاد در فرکانس 7140 rpm مشاهده می‌شود، که مطمئناً هیچ ربطی به دوران محور ندارد، زیرا در میانگین‌گیری حوزه زمان مشاهده نمی‌شود. بیشترین کاربرد میانگین‌گیری در حوزه زمان برای تشخیص عیوب چرخ‌دنده‌ها می‌باشد. اگر روی شفتی که به یک چرخ‌دنده ترک خورده متصل است، علامت زده شود، پس از تعداد زیادی میانگین‌گیری، سیگنال ارتعاشات یک موج سینوسی کامل را نشان نمی‌دهد و یک ناپیوستگی در محل ترک روی شکل زمانی موج مشاهده می‌شود. این ناپیوستگی بخاطر تغییر ضریب

الاستیسیته چرخ‌دنده در موقعیت ترک می‌باشد. با این روش براحتی می‌توان موقعیت ترک روی چرخ‌دنده را تشخیص داد. در حالیکه از نمودار FFT مربوطه چیزی حاصل نمی‌شود.



شکل ۵۰: نمودار ارتعاشات (در حوزه فرکانس) گیربکس در یک ماشین چند ساعت قبل از شکست

برای مثال یک نمونه تشخیص ترک در چرخ‌دنده یک ماشین که منجر به شکست آن شده است، بررسی شده است. شکل ۵۰ نمودار FFT ارتعاشات محور گیربکس و شکل ۵۱ نمودار میانگین حوزه زمانی مربوطه را قبل از شکست نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که وجود ترک در شکل ۵۱ براحتی قابل مشاهده است [۲۰۱].

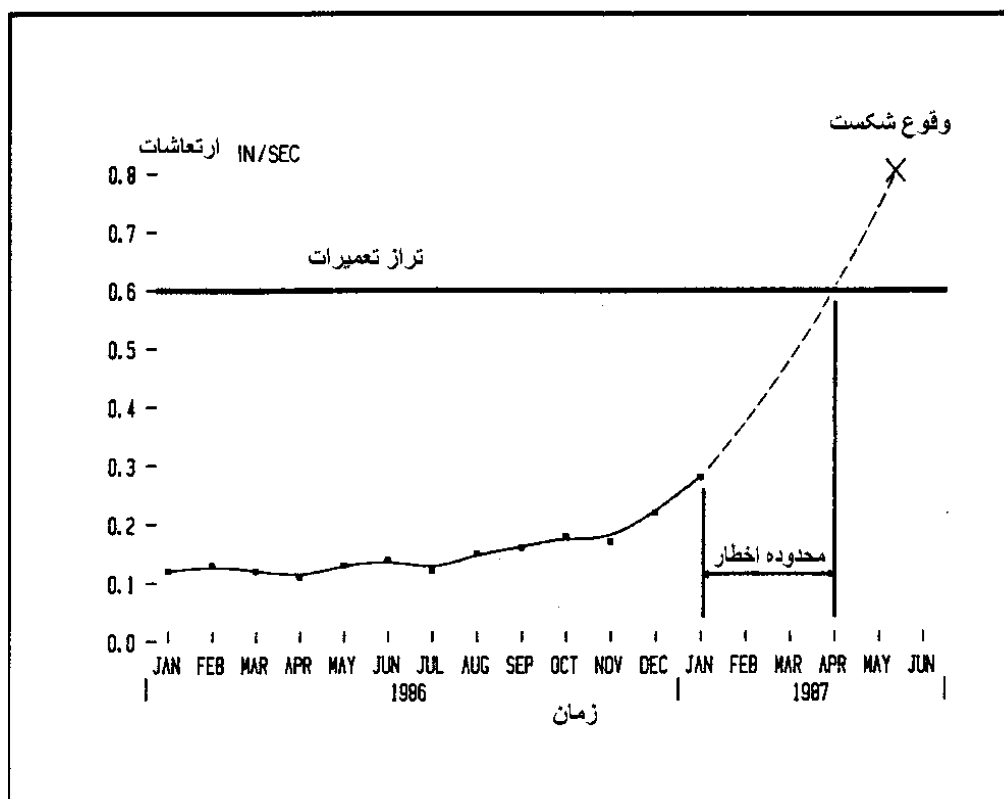


شکل ۵۱: نمودار ارتعاشات (در حوزه زمان) گیربکس ماشین قبل از شکست

۲-۱-۱- نمودار روند پیشرفت عیب (Trending)

بررسی روند پیشرفت عیب در علم مدیریت تعمیر و نگهداری ماشینها کاربرد زیادی دارد. در حقیقت مانیتورینگ ارتعاشات عبارت از کنترل آماری مشخصه‌های ارتعاشی بمنظور بهبود پروسه تعمیر و نگهداری ماشینها می‌باشد. نمودار روند پیشرفت عیب (Trending) عبارتست از ترسیم برخی از مشخصه‌های ارتعاشی ماشین (مانند دامنه ارتعاشات) نسبت به زمان (شکل ۵۲).

وقتی که ماشین در حالت عادی و سلامت کامل قرار دارد، نمودار ترند دارای شیب مثبت بسیار کمی می‌باشد. اما در حالتی که عیبی رخ می‌دهد، شیب نمودار بطور غیرخطی (مانند نمودار نمایی) زیاد می‌شود و با سرعت بیشتری بطرف شکست میل می‌کند.



شکل ۵۲: نمونه‌ای از نمودار روند پیشرفت عیب

با مشخص بودن ترازى که در آن شکست اتفاق می‌افتد، می‌توان زمان وقوع شکست را پیش‌بینی کرد. تراز شکست را می‌توان از طریق تجربی (با آزمایش شکست روی ماشین مشابه) و یا از استانداردهای ارتعاشی بدست آورد، یا اینکه آنرا برابر مقدار 0.6 inch/sec (معادل 15.2 mm/s) قرار دهیم. اکثر متخصصان قبول دارند که اگر سرعت ارتعاشات ماشین دوار از مرز 0.6 inch/sec بگذرد، شکست بزودی اتفاق می‌افتد.

تراز ارتعاشی ماشین در هر مدت زمان مشخص مقداری افزایش می‌یابد که معمولی است. حد قابل قبول و مجاز برای افزایش تراز ارتعاشی حدوداً دو برابر تراز ارتعاشی اولیه و یا افزایش 6 dB از مقدار اولیه می‌باشد. بنابراین اگر افزایش تراز ارتعاشی، از 6 dB گذشت (بیشتر از دو برابر مقدار اولیه شد)، وارد مرحله هشدار (Warning) می‌شود و در این مرحله باید توسط نمودار FFT و وسایل دیگر شرایط ماشین را بیشتر کنترل کرد و مشکل را پیدا کرد و آنرا تصحیح کرد.

در این مرحله مقدار میانگین دامنه‌ها، برای بلوک‌های زمانی مختلف در حالت پایدار محاسبه و نسبت به زمان نمایش داده می‌شوند. کاربرد این نمودار، بررسی تغییرات دامنه ارتعاشات نسبت به زمان و پیش‌بینی پیشرفت عیب در آینده می‌باشد [۱ و ۲].

۲-۱-۱۲-مقیاس‌گذاری خطی و لگاریتمی

دستگاه‌های FFT آنالایزر معمولاً دارای این قابلیت هستند که نمودارها را علاوه بر مقیاس خطی در مقیاس لگاریتمی نیز برای هر دو محور دامنه و فرکانس ترسیم می‌کنند. دستگاه FFT آنالایزر قابلیت اندازه‌گیری فرکانس‌های خیلی کوچک و خیلی بزرگ را دارد. اما اگر مقیاس خطی برای نمایش استفاده شود، نمی‌توان براحتی دامنه‌های خیلی کوچک و خیلی بزرگ را همزمان نشان داد. بنابراین از مقیاس لگاریتمی برای نمایش نمودار استفاده می‌شود که این قابلیت را داراست. نمودارهای لگاریتمی را معمولاً با واحد دسی بل (dB) مقیاس‌گذاری می‌کنند [۲۱].

$$\text{واحد دسی بل برای تحلیل ارتعاشات بصورت زیر تعریف می‌شود: } dB = 20 \log_{10} \frac{V}{V_{ref}}$$

بنابراین dB برابر نسبت ولتاژها در مقیاس لگاریتمی می‌باشد. ولتاژ مرجع در اکثر آنالایزرها برابر $V_{ref} = 1V_{rms}$ می‌باشد.

بنابراین اگر ولتاژ سیگنال ارتعاشی برابر $0.01V_{rms}$ باشد، دامنه ارتعاشات در واحد دسی بل برابر می‌شود با:

$$dB = 20 \log_{10} \frac{0.01}{1} = 20(-2) = -40$$

همچنین در بعضی از نمودارها از واحد g استفاده می‌شود، که منظور همان شتاب جاذبه زمین می‌باشد.

اگر حساسیت شتاب‌سنج برابر 100 mv/g باشد، مقدار مرجع g مربوط به 1V برابر 10g می‌باشد (یعنی: $0 \text{ dB}_{ref} = 1g$). یعنی وقتی که شتاب‌سنج، شتابی برابر 1g نشان می‌دهد، جریانی برابر 100mv از آن عبور می‌کند. بنابراین وقتی ولتاژی برابر ولتاژ مرجع (برابر 1V) از آن عبور می‌کند، شتابی برابر 10g نشان داده می‌شود.

$$V = 100 \text{ mv} \Rightarrow dB = 20 \log \frac{0.1}{1} = -20 \text{ dB} = 1g$$

$$V = 1000 \text{ mv} = 1V \Rightarrow dB = 20 \log 1 = 0 \text{ dB} = 10g$$

۲-۱-۱۳- پارامترهای آماری مورد استفاده در تحلیل داده‌های ارتعاشی

برای تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی پارامترهای مختلفی استفاده می‌شود که متداول‌ترین آنها در زیر توضیح داده شده‌اند.

۱-۱۳-۲- پارامتر RMS

پارامتر RMS (ریشه میانگین مربعات) سیگنال ارتعاشی که در حوزه زمان اندازه‌گیری می‌شود قدرت و توان ارتعاشات را نشان می‌دهد. بطور کلی اصلی‌ترین پارامتر در حوزه زمان برای اندازه‌گیری شدت عیوب همین پارامتر می‌باشد که البته برای تفکیک و شناسایی عیوب به اندازه کافی مؤثر نیست.

این پارامتر دامنه سیگنال ارتعاشی را در کل محدوده فرکانسی (Overall) مورد بررسی قرار می‌دهد. این پارامتر برای آگاهی از وضعیت ارتعاشی ماشین بصورت کلی مناسب است.

مزیت این روش آسان بودن اندازه‌گیری و ساده بودن تجهیزات آن می‌باشد. اما ضعف آن در این است که اطلاعات زیادی در مورد عیب به کاربر نمی‌دهد و از دقت و حساسیت کمی برخوردار است [۲۱].

۲-۱۳-۱-۲- پارامتر کرسست

برای هر کمیت متناوب، پارامتر کرسست (Crest factor) عبارتست از نسبت مقدار ماکزیمم به مقدار میانگین (rms). افزایش این پارامتر نشان دهنده تغییر الگوی سیگنال به سمت ارتعاشات ضربه ای (از قبیل شکسته شدن دنده های گیربکس یا خرابی بلبرینگها) می باشد. این روش بیشتر برای عیب‌یابی یاتاقانها در مواردی که ارتعاشات ضربه‌ای نسبتاً زیادی در آنها وجود داشته باشد، بکار می‌رود. مقدار نرمال و ایده‌آل این پارامتر بین ۲/۵ تا ۳/۵ می‌باشد و مقادیر بالاتر از آن تا حدود ۱۱ نشانگر وجود عیب در یاتاقانها می‌باشد. این روش بدلیل کارایی کم و محدودیتهای زیادی که دارد کاربرد خیلی کمی دارد [۳-۷].

۳-۱۳-۱-۲- پارامتر کورتوسیس

برای اصلاح مشکلات موجود در پارامتر کرسست، تغییراتی در آن داده شد و بعنوان کورتوسیس (Kurtosis) شناخته شد. این پارامتر نیز مانند کرسست بیشتر برای عیب‌یابی یاتاقانها و گیربکسها در مواردی که ضربه‌های گسسته در آنها دیده می‌شود بکار می‌رود.

در این روش با استفاده از توابع آماری، توزیع فراوانی یک کمیت متناوب حول مقادیر میانگین یا ماکزیمم آن متمرکز می‌شود.

مقدار میانگین (Mean)، واریانس (Variance) و اسکیونس (Skewness) به ترتیب ممانهای اول تا سوم توزیع احتمال هستند. کورتوسیس (Kurtosis) به عنوان ممان چهارم توزیع احتمال تعریف می‌شود و میزان مسطح بودن یا تیزی توزیع حالت نرمال را اندازه گیری می‌کند. عبارت دیگر ضریب کورتوسیس برابر است با نسبت ممان چهارم توزیع به مربع ممان دوم.

ضریب کورتوسیس نشان می‌دهد که تیزی نمودار در قسمت ماکزیمم به چه صورت است. اگر ۳ باشد به معنی این است که تیزی نمودار حالت طبیعی دارد و هر چه مقدارش بزرگتر شود نقطه ماکزیمم تیزتر شده و شبیه راس یک زاویه می‌شود و هر چه مقدارش کمتر شود تیزی نقطه ماکزیمم کمتر می‌شود. وقتی ارتعاشات در اثر عیوب افزایش می‌یابد مقدار کورتوسیس نیز افزایش می‌یابد و می‌توان در عیب‌یابی از آن استفاده نمود. مقادیر بیشتر از ۴ برای کورتوسیس نشانگر وجود عیب در یاتاقان و وقوع شکست در آینده نزدیک می‌باشد. مزیت این روش بر روش کرسست این است که سرعت و یا مقدار بارگذاری بر روی مقدار کورتوسیس تأثیر نمی‌گذارد و محدوده وسیعتری از طیف فرکانس را در بر می‌گیرد. معایب و محدودیتهای این روش مانند روش کرسست می‌باشد [۳-۷].

فصل دوم:

بررسی انواع روشهای پیشرفته و جدید آنالیز ارتعاشات و
کاربرد آنها

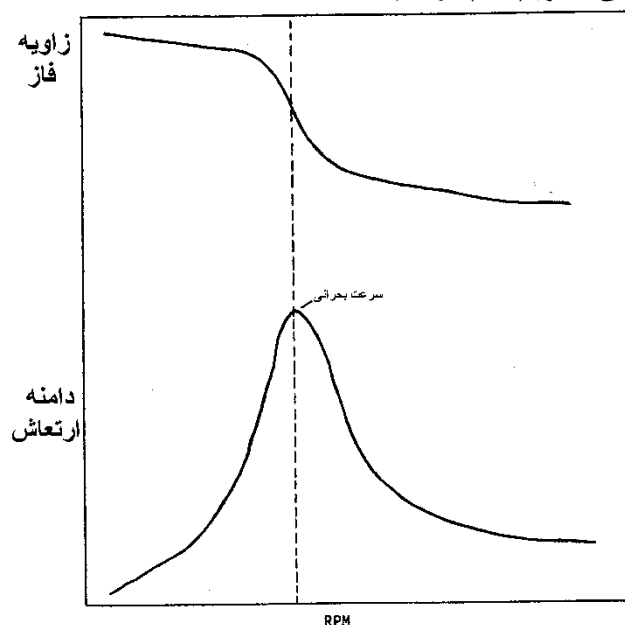
۱-۲-۲- مقدمه

در این فصل تکنیک‌های پیچیده تر و پیشرفته تر پردازش سیگنال‌های ارتعاشی از قبیل نمودار بود، نمودار قطبی، نمودار سه بعدی، مدار شفت، کپستروم، انولوپ، تحلیل مرتبه، خط مرکزی شفت، دیاگرام کمبل، تبدیل موجک و ... بررسی می شوند. با استفاده از این روشها در قسمت عیب یابی دقیقتر می توان به نتیجه رسید.

۲-۲-۲- نمودار بود (Bode Plot)

در صورتیکه دامنه و فاز ارتعاشات را نسبت به دور محور (بر حسب RPM) ترسیم کنیم، نمودار بود حاصل می شود. نمودار بود همان نمودار تحلیل مرتبه برای مرتبه اول می باشد.

شکل ۵۳ یک نمودار بود فرضی را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که نمودار زاویه فاز در بالا و نمودار دامنه در پایین، هر دو بر حسب سرعت دورانی محور (rpm) ترسیم شده‌اند.



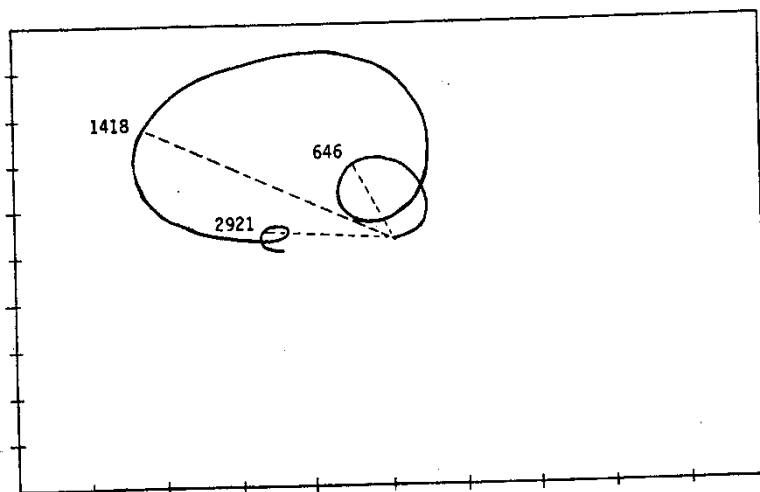
شکل ۵۳: نمودار بود در حالت ایده‌آل

برای رسم این نمودار، یک فیلتر دنباله‌رو (tracking filter) لازم است. فیلتر روی فرکانس دورانی شفت قفل می‌شود و همراه با تغییرات دور شفت آنهم تغییر می‌کند (یعنی فقط سیگنال ارتعاشی مربوط به $1 \times \text{RPM}$ دریافت و بررسی می‌شود). بنابراین دامنه و فاز ارتعاشات مربوط به سرعت $1 \times \text{RPM}$ در سرعت‌های مختلف شفت ترسیم می‌شود. این نمودار برای یافتن فرکانس تشدید شفت خیلی مفید است. در فرکانس تشدید، دامنه ارتعاشات ماکزیمم می‌شود و زاویه فاز 180° تغییر جهت می‌دهد [۲۱].

۲-۲-۳- نمودار قطبی (Polar Plot)

نمودار قطبی ترسیم دامنه بر حسب فاز در سیستم مختصات قطبی می‌باشد. نمودار قطبی (Polar) مربوط به راه‌اندازی یک ماشین (run-up data) در شکل ۵۴ مشاهده می‌شود. در این نمودار هر حلقه نمایانگر رخداد یک پدیده تشدید می‌باشد، زیرا زاویه فاز در اثر تشدید ۱۸۰ درجه تغییر می‌کند. داده‌های مورد نیاز برای ترسیم نمودار قطبی نیز باید توسط فیلتر دنباله‌رو جمع‌آوری شود.

نمودار قطبی معمولاً برای بالانسینگ محورهای انعطاف پذیر بزرگ (مانند محور توربینها) بکار می‌رود. قطر حلقه بزرگ در نمودار قطبی نشانگر اندازه نامیزانی موجود در محور دوار می‌باشد.

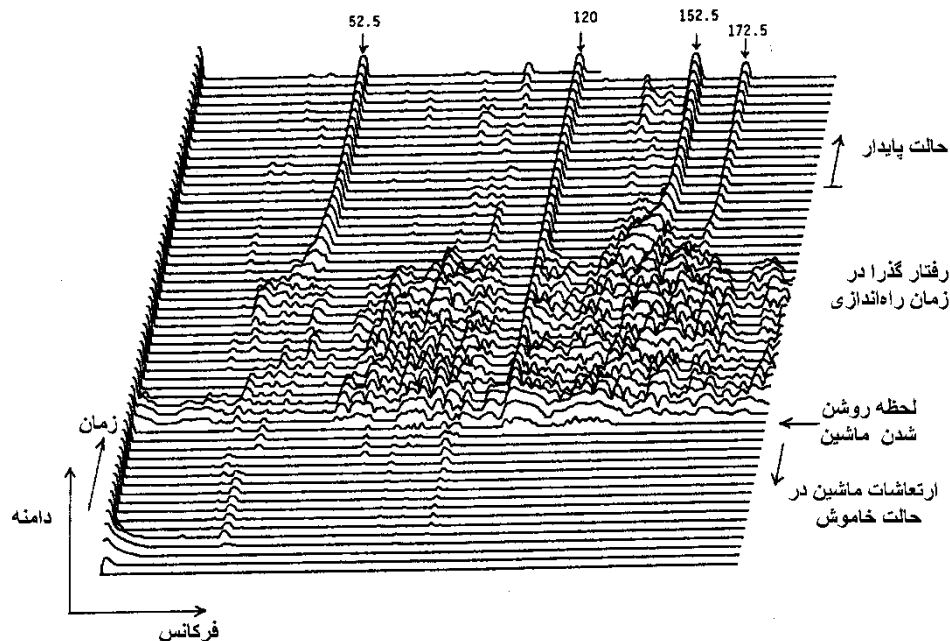


شکل ۵۴: نمونه‌ای از نمودار قطبی

هر دو نمودارهای بد و قطبی برای زمان راه‌اندازی و یا متوقف کردن ماشین قابل استفاده می‌باشند. و هر دوی آنها به یک فیلتر دنباله‌رو برای قفل شدن روی سرعت دورانی محور و تغییر همزمان با آن، احتیاج دارند. همچنین هر دوی آنها فقط در فرکانسی برابر فرکانس دورانی شفت ($1 \times \text{RPM}$) کار می‌کنند (یعنی همواره فرکانس آنها برابر فرکانس دورانی شفت است، حتی وقتی که فرکانس دورانی شفت تغییر می‌کند)، و فرکانسهای دیگر را بررسی نمی‌کنند (یعنی $2 \times \text{RPM}$ و ... [۲۱]).

۲-۲-۴- نمودار سه‌بعدی آبشاری (3D, Cascade, Waterfall Plot)

نمودار دیگری که برای بررسی رفتار ماشین هنگام راه‌اندازی و یا متوقف شدن، بسیار کاربرد دارد و به فیلتر دنباله‌رو احتیاج ندارد، نمودار سه‌بعدی آبشاری است. دیاگرام آبشاری مجموعه‌ای از طیفهای فرکانسی (نمودار دامنه بر حسب فرکانس) می‌باشد که به ترتیب گذشت زمان کنار هم چیده شده‌اند (شکل ۵۵). هر کدام از نمودارها، نشان‌دهنده پاسخ فرکانسی سیستم در یک زمان خاص می‌باشد.

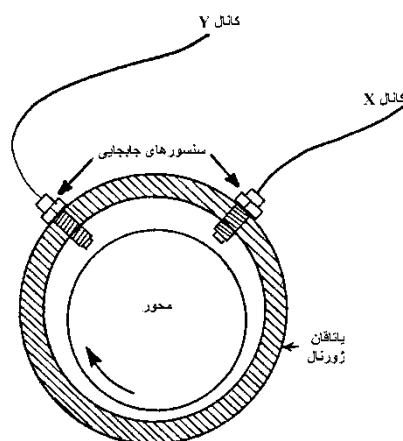


شکل ۵۵: نمودار آشناری مربوط به ارتعاشات راه‌اندازی یک ماشین

این نوع نمودار بر خلاف نمودارهای بد و قطبی، رفتار ماشین را در کل فرکانسهای دورانی بطور همزمان بررسی می‌کند. برای ترسیم این نمودار فقط به یک دستگاه FFT آنالیزر احتیاج می‌باشد. در صورتیکه بعد سوم به جای زمان دور ماشین (بر حسب rpm) باشد، نمودار سه بعدی ایجاد شده را نمودار Cascade می‌نامند [۲۹].

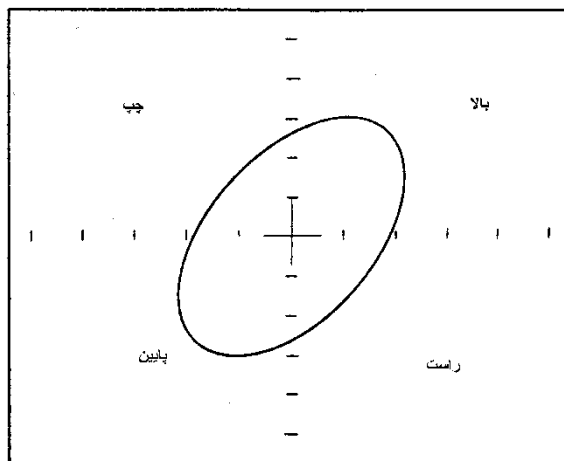
۲-۲-۵- نمودار مدار شفت (Shaft Orbit)

از بین انواع یاتاقانها، یاتاقانهای ژورنال، ارتعاشات کمتری را به پوسته یاتاقان منتقل می‌کنند، زیرا نیروهای ارتعاشی با عبور از لایه روغن ضعیف می‌شوند. اگر ارتعاشات قابل توجهی روی پوسته یاتاقانهای ژورنال وجود داشته باشد، در آن صورت حتماً یک مشکل جدی در ماشین وجود دارد و احتمالاً شفت به قسمت داخلی یاتاقان ضربه می‌زند.



شکل ۵۶: چگونگی نصب دو سنسور جابجایی بطور عمود بر هم بمنظور ترسیم مدار شفت

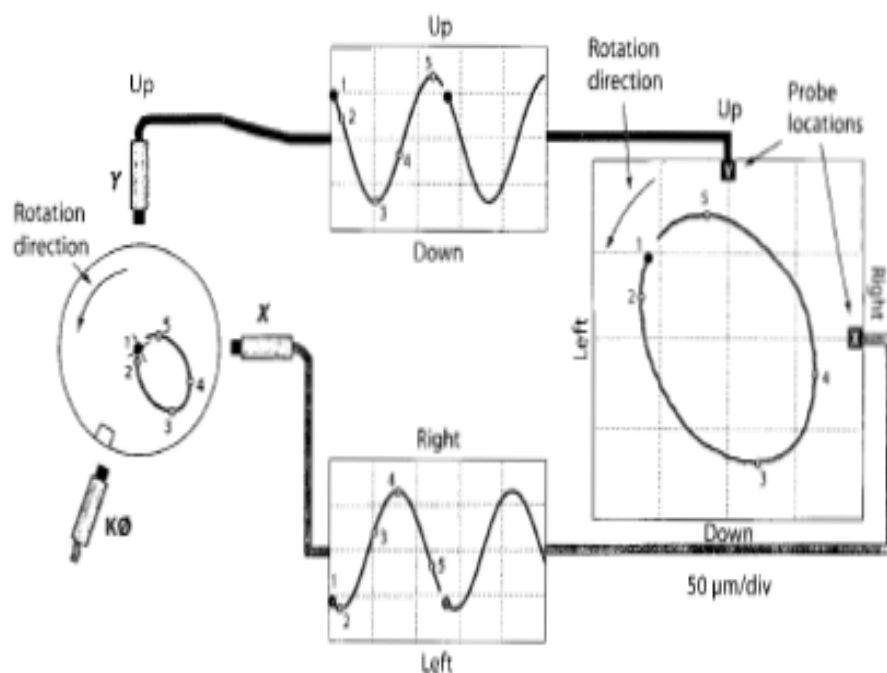
بنابراین معمولاً ارتعاشات پوسته خیلی کم می‌باشد و قسمت اعظم ارتعاشات در داخل شفت باقی می‌ماند. در نتیجه بهتر است که حرکت ارتعاشی شفت، مستقیماً بررسی شود. برای این کار می‌توان دو سنسور جابجایی را بطور عمود بر هم داخل یاتاقان نصب کرد (شکل ۵۶) و خروجی آنها را در یک پرپود کامل ذخیره نمود. با استفاده از این داده‌ها می‌توان نمودار مدار شفت را ترسیم کرد [۲۱].



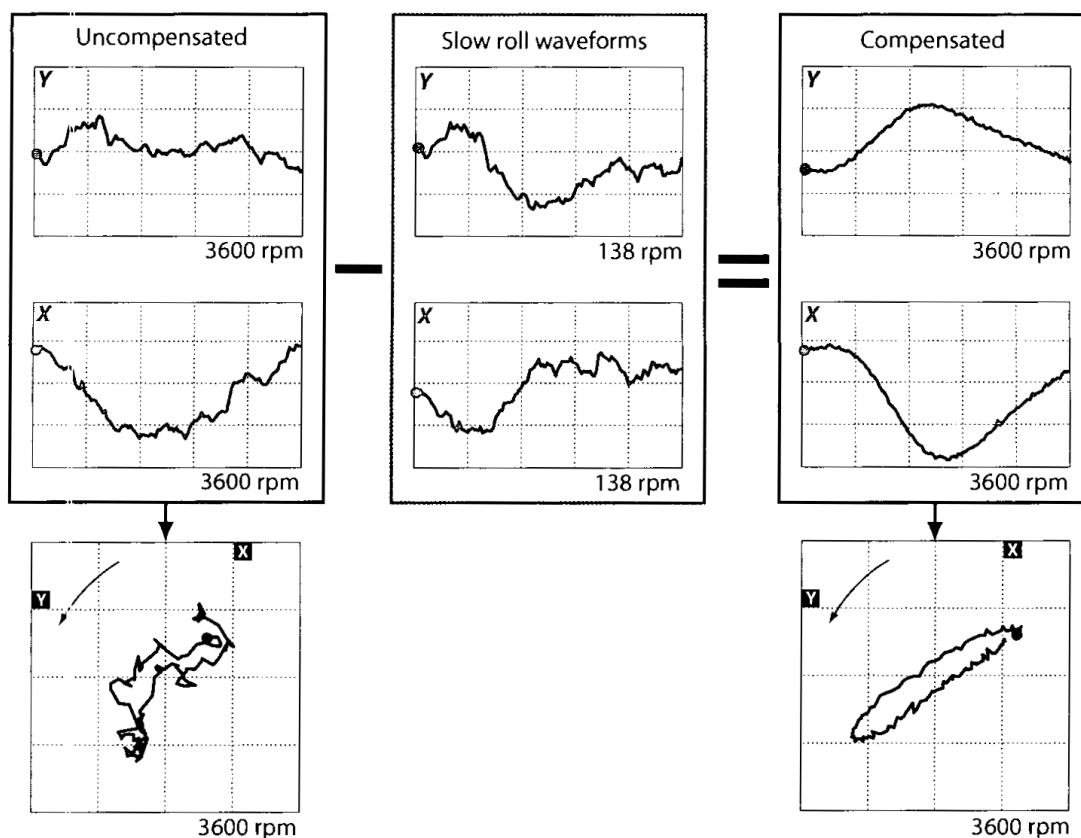
شکل ۵۷: نمونه‌ای از مدار شفت روی اسیلوسکوپ

برای رسم نمودار لازم است که مرکز صفحه نمایش را بعنوان مرکز مقطع شفت در نظر گرفت (با مختصات $(0,0)$). بعد هرگونه تغییر موقعیت شفت نسبت به موقعیت مرجع را در هر لحظه $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ روی نمودار ترسیم کرد. شکل ۵۷ نمونه‌ای از مدار شفت را نشان می‌دهد. این نمودار معمولاً برای سرعت $1 \times \text{RPM}$ شکل واضحی دارد و برای سرعت‌های بالاتر مدار شفت معمولاً نامنظم می‌باشد. معمولاً در نمودار مدار شفت، موقعیت مرکز شفت در لحظه عبور علامت زمانی (keyphasor) از مقابل سنسور زاویه فاز را با یک نقطه سیاه پر رنگ نشان می‌دهند و نمودار از این نقطه شروع می‌شود و پس از انجام یک دور کامل به همان نقطه ختم می‌گردد. البته قسمت انتهایی نمودار قبل از رسیدن به نقطه سیاه را خالی می‌گذارند تا جهت حرکت مدار شفت مشخص گردد. در شکل ۵۸ مراحل ترسیم نمودار مدار شفت نشان داده شده است. نمودار مدار شفت را همانند نمودارهای شکل موج زمانی می‌توان به صورت فیلتر شده و یا فیلتر نشده رسم نمود. در شکل ۵۹ شکل موجهای زمانی و مدار شفت اصلاح نشده در مقایسه با نمودارهای اصلاح شده نشان داده شده است.

باید توجه داشت که این نمودار نشان دهنده حرکت دینامیکی (ناشی از ارتعاش) شفت می‌باشد و موقعیت استاتیکی مرکز شفت در نمودار خط مرکز شفت (shaft center line) نمایش داده می‌شود [۳-۷].



شکل ۵۸: مراحل ترسیم نمودار مدار شفت



شکل ۵۹: شکل موجهای زمانی و مدار شفت اصلاح نشده (سمت چپ) در مقایسه با نمودارهای اصلاح شده (سمت راست)

۶-۲-۲- روش تحلیل باندهای هشتگانه (Octave Band Analysis)

در این روش طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشی با استفاده از فیلترهای خاص (Octave Filters) به هشت باند فرکانسی مجزا تقسیم می‌گردد که در حالت لگاریتمی عرض این باندها یکسان بنظر می‌رسد. میانگین خروجی هر فیلتر بطور پیوسته محاسبه و در طیف فرکانسی در باند مربوطه مشخص می‌گردد. عیب این روش آن است که اطلاعات دریافتی از سنسور توسط فیلترها محدود می‌شود و همچنین تنظیم محدوده این فیلترها برای هر کاربرد خاص مشکل می‌باشد [۷-۳].

۷-۲-۲- روش تحلیل باندها با عرض ثابت (Constant Bandwidth Analysis)

در این روش از یک سری فیلتر با پهنای ثابت استفاده می‌شود. پهنای باند این فیلترها از 3.16Hz تا 1000Hz و محدوده فرکانسی آنها از 2Hz تا 200KHz می‌تواند باشد. این روش برای بررسی دقیق در محدوده‌های وسیع فرکانسی خصوصاً در فرکانسهای بالا بیشتر بکار می‌رود. عیب این روش آن است که زمان تحلیل نسبتاً طولانی است و برای تفسیر نتایج لازم است که اطلاعات کافی در مورد هارمونیکهای ماشین و باندهای جانبی (side bands) داشته باشیم [۷-۳].

۸-۲-۲- روش تحلیل طیف CPB (Constant Percentage Bandwidth Analysis)

در این روش که جهت عیب‌یابی انواع ماشینهای دوار با آنالیز ارتعاشات و ضربه بکار می‌رود، تحلیل فرکانسی با دقت بسیار بالا با استفاده از یک فیلتر با درصد پهنای باند ثابت (از قبیل ۳، ۱، ۶، ۱۲، ۲۳ درصد) و عرض کم که کل محدوده فرکانسی مطلوب (از ۲ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) را جاروب می‌کند، انجام می‌گیرد. با این روش می‌توان فرکانسها و هارمونیکهایی که از نظر فرکانسی خیلی بهم نزدیکند را جدا و مشخص نمود. هر چه درصد پهنای باند فیلتر کمتر باشد، قدرت تفکیک تحلیل فرکانسی بیشتر می‌شود. در حالت On-Line امکان جاروب کردن کل محدوده فرکانسی توسط فیلتر وجود دارد.

مزیت این روش آن است که این تحلیل در حالت مستقیم (real time) قابل انجام است و بنابراین از تحلیل FFT سریعتر می‌باشد و مشکلات مربوط به تحلیل FFT از قبیل از بین رفتن اطلاعات بوسیله توابع ویندوینگ را دارا نمی‌باشد. طیفهای CPB برای عیب‌یابی سریع خیلی مفید می‌باشند و تجهیزات مربوط به آن بصورت پرتابل موجود می‌باشد. تنها عیب این روش آن است که برای تفسیر نتایج بدست آمده به مهارت و تجربه بالایی نیاز می‌باشد [۷-۳].

۹-۲-۲- روش تحلیل مستقیم (Real Time Analysis)

در این روش سیگنال به طور کامل ذخیره می‌گردد و توسط تحلیلگر real time بازخوانی می‌گردد. سپس سیگنال به حوزه فرکانس منتقل می‌شود. یک طیف فرکانسی با روش عرض باند ثابت ایجاد می‌گردد که محدوده فرکانسی مطلوب (از ۱۰-۰ هرتز تا ۲۰-۰ کیلوهرتز) را با ۴۰۰ بازه فرکانسی متساوی جاروب می‌کند. با این روش می‌توان با انتخاب مناسب محدوده فیلتر و محدوده فرکانسی به یک طیف با دقت بالا دست یافت. این روش برای بررسی حالات گذرا و شوک در سیستم مناسب است. اما تجهیزات آن بسیار گران می‌باشد. همچنین کاربرد این روش به مهارت بالایی نیاز دارد [۷-۳].

۲-۱۰-۲- کپستروم (Cepstrum)

کپستروم (Cepstrum) عبارتست از نموداری که از گرفتن تبدیل فوریه معکوس از لگاریتم طیف فرکانسی (Cepstrum = Spectrum of a spectrum) سیگنال متناوب حاصل می‌شود. این روش (عموماً برای عیب‌یابی در یاتاقانها و گیربکسها و چرخ دنده‌ها) در کنار روش تحلیل طیف فرکانسی بکار می‌رود و گاهی اوقات سیگنالهای معیوبی که در طیف فرکانسی قابل تفکیک و شناسایی نیستند، در نمودار کپستروم براحتی از هم تفکیک می‌شوند (شکل ۶۱). در اثر وجود مشکل سایش در ماشین، رفتار غیر خطی ماشین افزایش می‌یابد و این امر باعث پیدایش هارمونیکهایی از فرکانسهای نیروی اولیه و فرکانس های مجموع و تفاضل آنها در طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشی ماشین می‌شود. کپستروم بطور قابل ملاحظه‌ای این هارمونیکها (که هم سرعت با دور شفت نیستند) و باندهای جانبی که عموماً در اثر ارتعاشات ناشی از سایش در اجزاء یاتاقانهای غلتشی یا چرخ دنده‌ها بوجود می‌آیند را از یکدیگر تفکیک می‌نماید بطوریکه می‌توان نمودار ترند هر یک از آنها را جداگانه نسبت به زمان ترسیم نمود. در این روش طیف فرکانسی دوباره به حوزه زمان تبدیل می‌شود و در نتیجه هر گروه هارمونیک که در طیف فرکانسی بصورت گسترده مشاهده می‌شود، در کپستروم بصورت یک مقدار ماکزیمم دیده می‌شود و بنابراین مجموعه هارمونیکها از هم تفکیک می‌شوند [۷-۱]. در این روش تمام لغات فنی بکار رفته در طیف فرکانسی معکوس می‌شود، از قبیل :

Spectrum → Cepstrum
Frequency → Quefreny
Harmonic → Rahmonic

با این روش می‌توان هارمونیکهای ناشی از وجود سایش در یاتاقانهای بلبرینگی، شفتها، گیربکسها، پره‌ها، پمپها و فنها را مشاهده و بررسی نمود.

اگر سیگنال مورد نظر با $f(t)$ نمایش داده شود، کپستروم توانی آن عبارت است از (F:Fourier Transform) :

$$power\ cepstrum\ of\ signal = |F^{-1}\{\log(|F\{f(t)\}|^2)\}|^2$$

کپستروم حقیقی را نیز می‌توان با استفاده از کپستروم توانی به صورت زیر تعیین نمود:

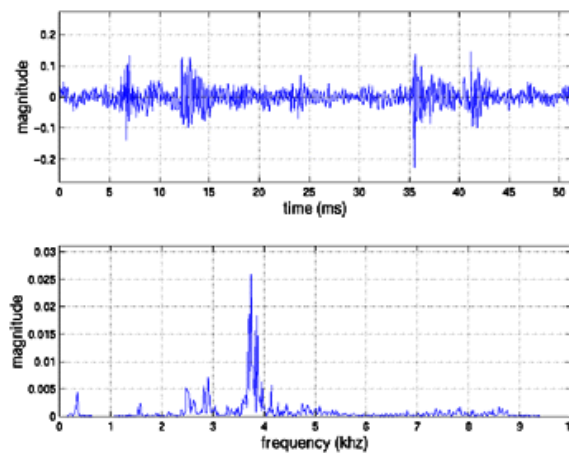
$$real\ cepstrum = \frac{1}{4} \sqrt{power\ cepstrum}$$

۲-۱۱- انولوپ (پوش)

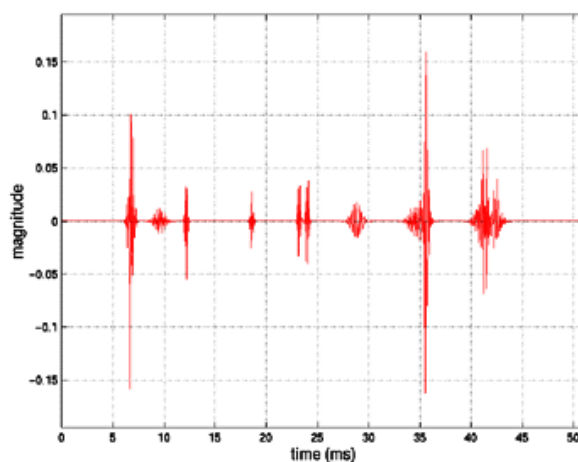
نمودار انولوپ (Enveloping) عبارتست از منحنی که با روش خاصی از نقاط ماکزیمم نمودار شکل موج زمانی عبور می‌کند.

در این روش ابتدا سیگنال دریافتی از ترانس‌دیوسر را جهت تفکیک فرکانسهای بالا از فرکانسهای پایین فیلتر می‌کنند. هر سیگنال معیوب که در نمودار انرژی بر حسب زمان باند باریکی را شامل می‌شود، در طیف فرکانسی باند وسیعی را به خود اختصاص می‌دهد. این پراکندگی و گسترش سیگنال معیوب که ناشی از تولید دامنه‌های هارمونیک می‌باشد در داخل نویز و اغتشاشات پنهان می‌شود. این مشکل با مربع کردن سیگنال زمانی فیلتر شده برطرف می‌گردد. در نتیجه این عمل دو نوع مؤلفه حاصل می‌شود که عبارتند از مؤلفه‌های مجموع که خارج از محدوده تحلیل قرار می‌گیرند و از بحث خارج می‌شوند و مؤلفه‌های تفاضل که بصورت برداری با هم جمع می‌گردند. سیگنال معیوب بصورت یک ترکیب سینوسی از مضارب صحیح فرکانس عیب بوجود می‌آید. حال اگر از این سیگنال تبدیل فوریه سریع (FFT) گرفته شود، هارمونیکهای تکراری بوضوح نمایان می‌شوند (شکل ۶۲ شکل ۶۰).

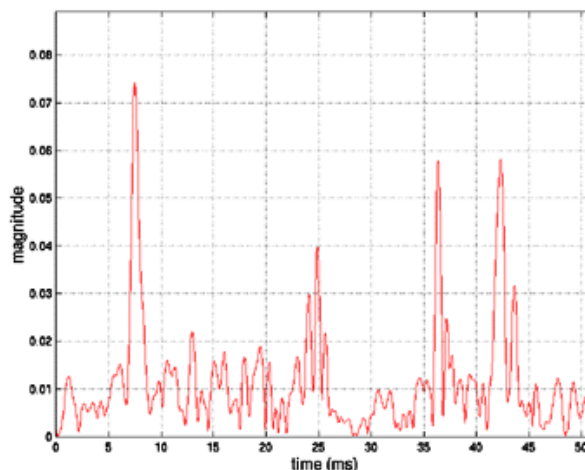
این روش در مواردی که نویز و اغتشاشات در محیط زیاد باشد، کاربرد دارد. با این روش سیگنالهای کوچک، که در طیف فرکانسی عموماً پنهان می‌باشند، شناسایی می‌شوند. ضعف اصلی این روش آن است که باید محدوده فرکانسی فیلترها و فرکانس اصلی عیب قبل از انجام عملیات مشخص شود و در صورت انتخاب نامناسب این مقادیر، عیب‌یابی بصورت نادرست انجام می‌شود. عیوبی که دارای فرکانسهای اصلی متعددی باشند، بوسیله این روش قابل شناسایی نیستند [۷-۱].



شکل ۶۰: نمونه‌ای از نمودار شکل موج زمانی (بالا) و نمودار طیف فرکانسی مربوطه (پایین)



شکل ۶۱: نمودار کپستروم مربوط به شکل ۶۰



شکل ۶۲: نمودار انولوپ مربوط به شکل ۶۰

۲-۱۲- تحلیل مرتبه (Order tracking analysis)

تحلیل مرتبه روشی برای تحلیل سیگنالهای نویز و ارتعاشات در ماشینهای دوار می باشد. در این روش سیگنال زمانی اندازه گیری شده را به حوزه مرتبه (order) انتقال می دهند. مرتبه اول (first order) مربوط به دور کاری ماشین می باشد و مرتبه های دیگر مضارب آن هستند. مثلاً مرتبه ۰.۵ مربوط به فرکانس برابر با نصف دور کاری و یا مرتبه ۳ فرکانس ۳ برابر دور کاری می باشد. در بعضی موارد خروجی تحلیل مرتبه همان مقدار دامنه سیگنال در نمودار FFT در فرکانس مطلوب در دوره های مختلف یا در زمانهای مختلف می باشد. برای انجام تحلیل مرتبه علاوه بر سنسور ارتعاشی به یک سنسور دورسنج (یا زاویه فاز) نیاز می باشد. ماشینها دارای اجزای مختلفی هستند که هر کدام آنها یک الگوی ارتعاشی و یا نویز منحصر به فرد تولید می کنند. کاربرد اصلی این روش عموماً بررسی پاسخ دینامیکی ماشین هنگام راه اندازی یا توقف است که دور ماشین در کل بازه عملکردی مثلاً از ۱۰ تا ۱۰ هزار دور در دقیقه تغییر می کند.

چنین تست‌هایی عموماً روی موتور اتومبیل‌ها یا هواپیماها انجام می‌شود و تمام کمیت‌های فیزیکی مانند شدت صوت، جابجایی، سرعت، شتاب، گشتاور و ... اندازه‌گیری می‌شوند. پارامتر مورد تحلیل می‌تواند دامنه دامنه یا شدت یک مرتبه، انرژی یک باند فرکانسی مشخص و یا هر پارامتر دلخواه دیگری باشد. مهمترین نتیجه این اندازه‌گیری‌ها تعیین مقدار پاسخ پارامتر نسبت به دور می‌باشد.

کاربرد دیگر این روش اندازه‌گیری و مانیتورینگ یک پارامتر خاص (مانند شدت صوت، جابجایی، سرعت، شتاب، فشار، جریان، ...) در حالت دور کاری و پایدار ماشین است. در این حالت مقادیر دامنه و فاز مرتبه‌های خاصی از پارامتر اندازه‌گیری می‌شود.

به کمک این روش می‌توان شرایط کاری ماشین‌ها از قبیل فرکانس‌های رزونانس، فرکانس‌های عملکردی پایدار و همچنین علل بروز ارتعاشات را تعیین نمود. همچنین می‌توان ارتعاشات اجزای مختلف ماشین را شناسایی و تفکیک نمود [۸-۱].

ماژول‌های تحلیل مرتبه معمولاً سه نوع نمودار ترسیم می‌کنند:

- نمودار طیف فرکانسی نسبت به زمان: مقادیر مرتبه‌ها را در طول زمان پایش می‌کند.
 - نمودار طیف فرکانسی نسبت به دور: مقادیر مرتبه‌ها را در دورهای مختلف نمایش می‌دهد.
 - تحلیل دامنه هارمونیک‌ها در طیف فرکانسی: مقادیر هارمونیک‌های فرکانس‌های مشخصی را نمایش می‌دهد.
- خیلی از نیروهای دینامیکی تحریک ماشین‌ها در مضارب دور کاری اتفاق می‌افتند و لذا تحلیل مرتبه آنها را شناسایی می‌کند.

کاربردهای تحلیل مرتبه:

- تحلیل پاسخ دینامیکی ماشین هنگام راه‌اندازی یا توقف (دور متغیر از صفر تا ۱۰ هزار دور در دقیقه)
- پایش پارامترهای مختلف ماشین در دور ثابت کاری در طول زمان (مانند شدت صوت، جابجایی، سرعت، شتاب، فشار، جریان، ...) که برای عیب‌یابی بکار می‌رود.

۲-۱۳- نمودار خط مرکز شفت (Shaft center line)

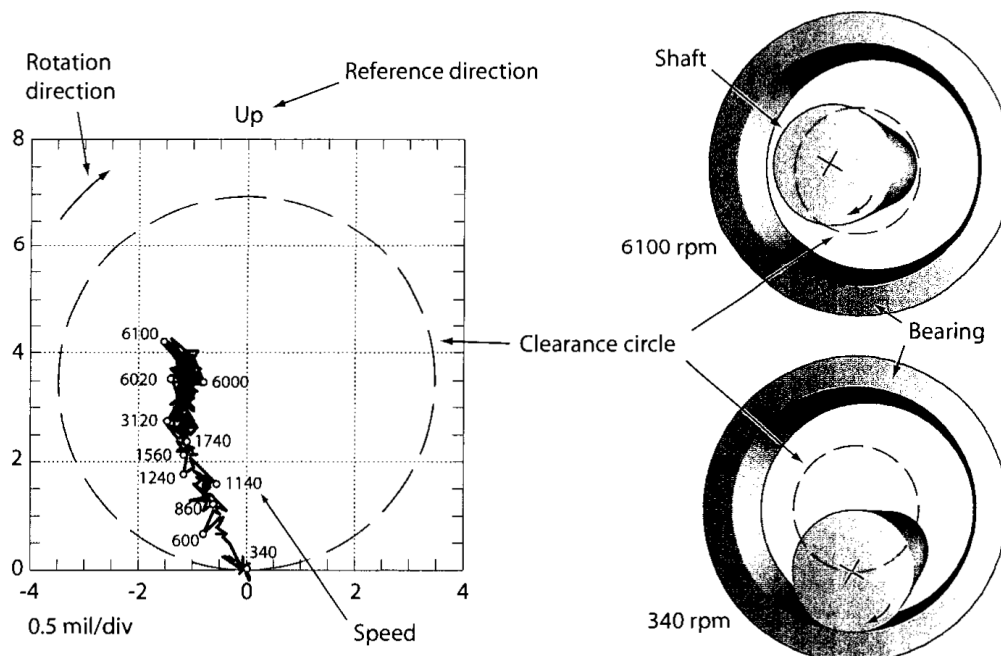
نمودارهای مدار شفت و شکل موج زمانی مربوط به داده‌های موقعیت دینامیکی شفت می‌باشند. این نمودارها توانایی نشان دادن تغییر در موقعیت استاتیکی مرکز شفت، که از مشخصه‌های مهم پاسخ ارتعاشی سیستم می‌باشد، را ندارند. تغییر در نیروی شعاعی و یا تغییر در مشخصه‌های سفتی روتور می‌تواند باعث تغییر در موقعیت استاتیکی مرکز شفت گردند. این تغییرات می‌تواند در لحظه‌ی روشن و خاموش شدن ماشین و یا در حالت پایدار رخ دهد. به طور مثال در ماشین‌های دارای یاتاقان‌های ژورنال با تغییر سرعت مشخصه‌های سفتی یاتاقان تغییر کرده و در نتیجه موقعیت استاتیکی شفت نیز تغییر می‌کند. سیگنال‌های مورد نیاز برای رسم این نمودارها مقدار dc همان سنسورهای جابجایی سنجی است که برای مدار شفت نصب شده‌اند (مقادیر dc برای نمودار خط مرکز شفت و مقادیر ac برای مدار شفت استفاده می‌شوند). این نمودار بیشتر اوقات تغییرات موقعیت مرکز شفت را نسبت به تغییرات سرعت دورانی ماشین نشان می‌دهند. اما می‌توان نمودارها بر حسب زمان نیز رسم نمود. نمودارهای موقعیت استاتیکی مرکز شفت اطلاعات مهمی را به منظور عیب‌یابی ماشین‌های دوار فراهم می‌نمایند. برخی از عیوب نظیر

سایش، عدم هم محوری و ناپایداری روغن می‌توانند باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در موقعیت استاتیکی مرکز شفت گردند.

با معلوم بودن ابعاد یاتاقان می‌توان دایره‌ی لقی (clearance) را به نمودار موقعیت استاتیکی شفت اضافه نمود. قطر دایره‌ی لقی (قطر لقی) برابر با قطر یاتاقان منهای قطر شفت می‌باشد. موقعیت شفت درون دایره‌ی لقی گاهی اوقات با پارامتری به نام نسبت خروج از مرکزی (eccentricity) بیان می‌شود. نسبت خروج از مرکزی برابر است با فاصله‌ی بین مرکز شفت تا مرکز یاتاقان به قطر لقی.

$$e = r/c$$

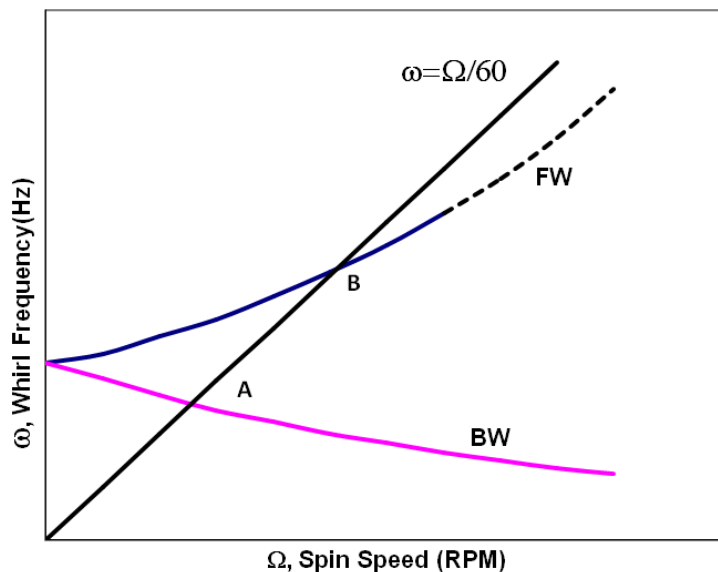
هنگامی که شفت با یاتاقان در تماس است نسبت خروج از مرکزی برابر یک می‌باشد و زمانی که مرکز شفت منطبق بر مرکز دایره لقی باشد نسبت خروج از مرکزی برابر صفر می‌باشد. در حالت کلی نسبت خروج از مرکزی عددی بین یک و صفر می‌باشد. در شکل ۶۳ موقعیت شفت درون یاتاقان در دو سرعت مختلف نشان داده شده است. در شکل لقی یاتاقان با اغراق رسم گردیده است [۷-۱].



شکل ۶۳: موقعیت شفت درون یاتاقان و نمودار خط مرکز شفت

۱۴-۲-۲- دیاگرام کمبل (Campbell diagram)

این نمودار پاسخ فرکانسی روتور را بصورت تابعی از سرعت دورانی اش نمایش می‌دهد. به کمک این نمودار می‌توان فرکانس‌های تشدید روتور را (به ازای هر دیسک یک نمودار مجزا) در سرعت‌های دورانی مختلف بدست آورد (شکل ۶۴).

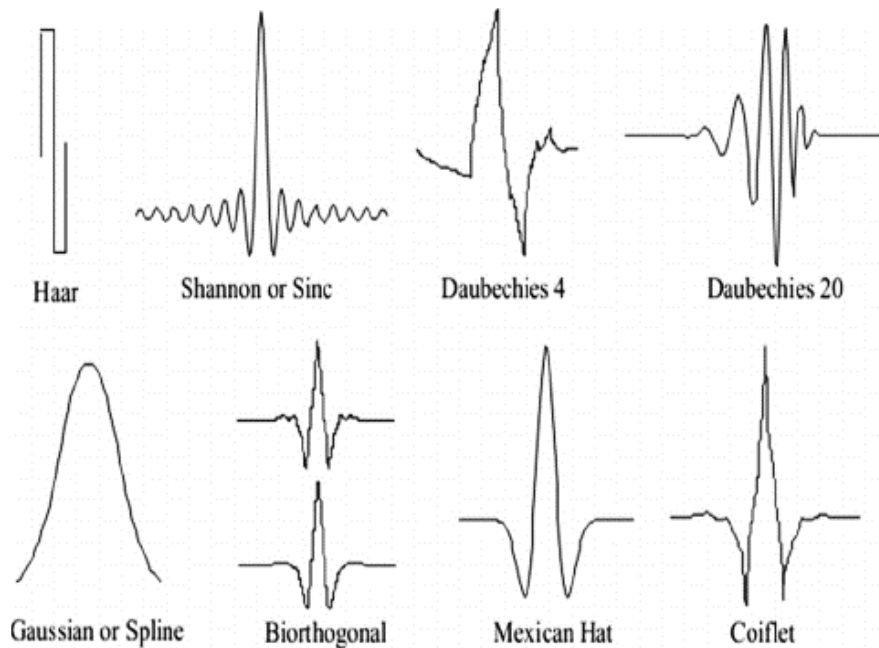


شکل ۶۴: دیاگرام کمبل برای یک روتور ساده

دیاگرام کمبل عموماً برای طراحی روتورهایی که دیسک پره روی آنها قرار گرفته، مانند توربینها و کمپرسورها و فن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطوریکه نقاط برخورد فرکانسهای طبیعی و خطوط تحریک نمایانگر تشدید در آن ناحیه می‌باشد. دیاگرام کمبل نموداری است که نمایانگر سرعت روتور در محور افقی (بر حسب دور در دقیقه) بر حسب فرکانس در محور عمودی (بر حسب هرتز) می‌باشد. فرکانسهای طبیعی پره و فرکانسهای تحریک در این دیاگرام رسم می‌شوند [۸].

۲-۲-۱۵- تبدیل موجک (wavelet transform)

تبدیل موجک در تشخیص و تعیین محل خرابی گیربکسها و بلبرینگها کمک زیادی می‌کند. موجکها دسته‌ای از توابع ریاضی هستند که برای تجزیه سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن بکار می‌روند. تبدیل موجک، تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک می‌باشد. موجکها نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند. چند نمونه موجک مادر در شکل ۶۵ نمایش داده شده‌اند.

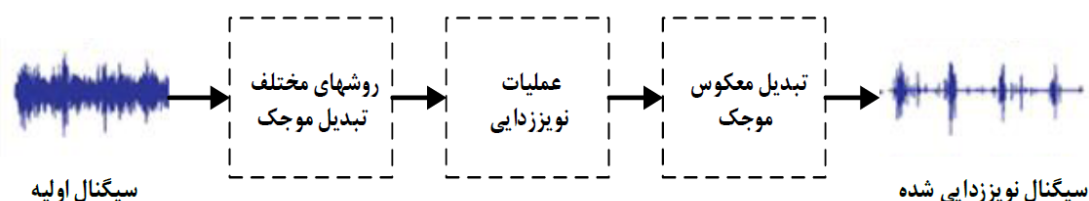


شکل ۶۵: چند نمونه موجک مادر

هنگام پیاده سازی تبدیل موجک، تابع موجک شکل خود را حفظ میکند اما در طول سیگنال، جابه جا شده و نیز در طی جابه جا شدن، فشرده و باز می شود و می تواند کل سیگنال را پوشش دهد. این روش بر خلاف تبدیل فوریه، قادر است تا قدرت تفکیک متفاوتی را برای محدوده های فرکانس پایین و بالا ایجاد نماید. در مقایسه با تبدیل فوریه می توان گفت که تبدیل موجک دارای خصوصیت محلی سازی بسیار بهتری است. به طور مثال تبدیل فوریه یک پیک تیز دارای تعداد زیادی فرکانس است، چرا که توابع پایه تبدیل فوریه، توابع سینوسی و کسینوسی هستند که دامنه آن‌ها در کل بازه ثابت است، در حالی که توابع موجک توابعی هستند که بیشتر انرژی آن‌ها در بازه کوچکی متمرکز شده است و به سرعت میرا می شوند. بنابراین با انتخاب مناسب موجک‌های مادر می توان فشرده سازی بهتری در مقایسه با تبدیل فوریه انجام داد [۸].

موجک‌ها بر مبنای دو تبدیل اصلی انتقال ($W(x+a)$) و پهن شدگی ($W(bx)$) بکار می روند. از مهمترین کاربردهای تبدیل موجک در آنالیز ارتعاشات می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- نوپزدایی از سیگنال ارتعاشات (شکل ۶۶)
- تشخیص محل و ماهیت نقاط منفرد (ضربه، پالس و ...) در سیگنال ارتعاشات



شکل ۶۶: مراحل حذف نویز از سیگنال

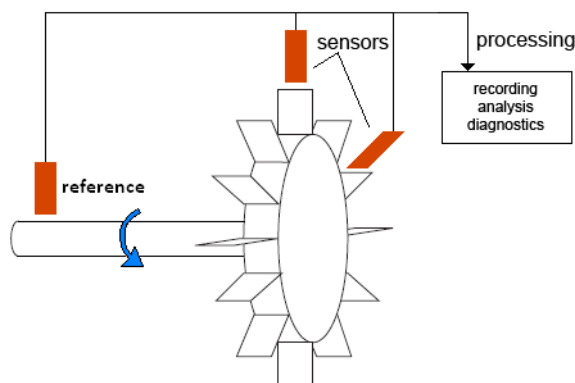
انواع متداول تبدیل موجک عبارتند از:

- تبدیل موجک پیوسته (CWT) Continuous wavelet transform

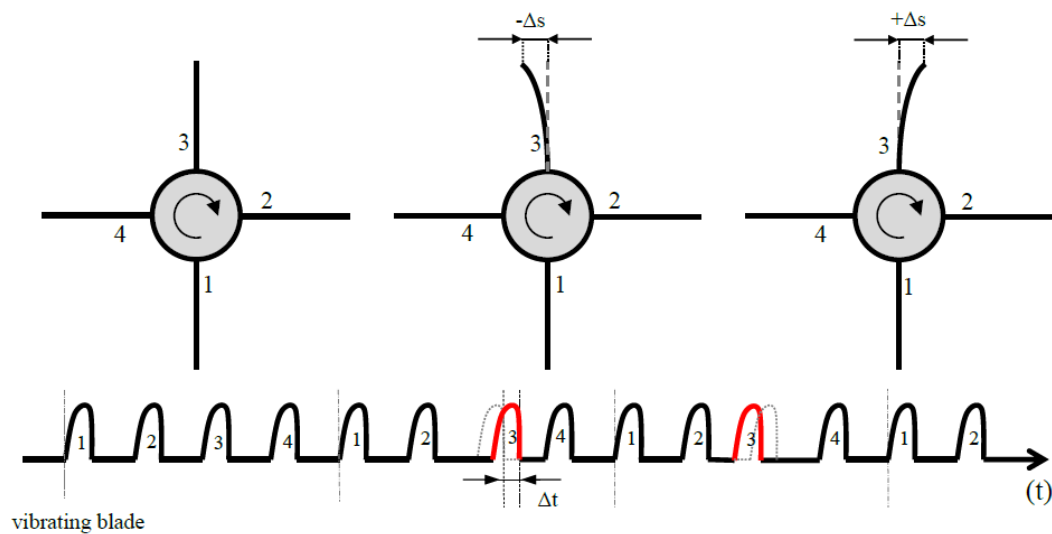
- تبدیل موجک گسسته (DWT) Discrete wavelet transform
- تبدیل سریع موجک (FWT) Fast wavelet transform
- تجزیه بسته‌های موجک (WPD) Wavelet packet decomposition
- تبدیل موجک ساکن (SWT) Stationary wavelet transform

۲-۱۶- روش زمان بندی نوک پره (Blade Tip Timing)

پره های توربین گاز به علت امکان وقوع تشدید در توربین یا کمپرسور و نوسانی بودن حرکت آن در معرض خستگی دور بالا قرار دارند از این رو روش BTT برای پایش وضعیت پره ها در حین کارکرد توربین و کمپرسور اهمیت بسزایی دارد چرا که بر خلاف دیگر آزمونهای غیر مخرب پره ها نیازی به توقف روتور ندارد. اولین ابزار اندازه گیری ارتعاشات پره ها، کرنش سنج ها بودند که در سال ۱۹۶۰ برای اولین بار به کار گرفته شدند. نصب کرنش سنجها و دستگاههای تله متری علاوه بر سختیهای فراوان دارای خطاهایی (از جمله تغییر رفتار دینامیکی پره، تعداد کم پره های تحت نظارت) بود که به تدریج موجب شد این روش کنار گذاشته شود. روش زمان بندی نوک پره بر اصل تقدم و تاخر گذر نوک پره از مقابل سنسور استوار است. به این صورت که اگر هیچ ارتعاشی در پره وجود نداشته باشد، نوک هر پره در هر دوران در زمان مشخصی از مقابل سنسور مربوطه (شکل ۶۷) که در راستای شعاعی نصب شده عبور می کند. اما اگر ارتعاشی در پره وجود داشته باشد زمان رسیدن پره به سنسور نسبت به زمان برنامه ریزی شده (بدون ارتعاش) کمتر یا بیشتر می شود (شکل ۶۸). در این روش با محاسبه زمان تقدم یا تاخر رسیدن نوک پره ها می توان ارتعاشات و جابجایی نوک پره ها را محاسبه نمود [۸].



شکل ۶۷: محل قرارگیری سنسورها در روش BTT



شکل ۸: زمان رسیدن پره به سنسور نسبت به حالت بدون ارتعاش

فصل سوم:

بررسی روشهای جدید عیب یابی با آنالیز ارتعاشات در
ماشینهای دوار نیروگاهی

۲-۳-۱- مقدمه

وجود ارتعاشات در ماشینها امری طبیعی است، حتی در بهترین شرایط کاری مقداری ارتعاشات وجود دارد که به علت عیوب بسیار کوچک اتفاق می افتد. هر ماشین یک حد مجاز ارتعاشی دارد که کمتر از آن حالت طبیعی می باشد. وقتی مشکلات مکانیکی از قبیل نامیزانی، عدم هم محوری، لقی و ... در ماشین اتفاق می افتد سطح ارتعاشات به تدریج از تراز طبیعی بالاتر می رود.

دانش عیب یابی در ماشینهای دوار حوزه وسیعی را در برمی گیرد. به منظور عیب یابی ابتدا به جمع آوری داده های ارتعاشی می پردازند و سپس این داده ها را با روشهای گوناگونی (مانند: تحلیل فرکانس، کپستروم، موجک، انولوپ، شکل موج زمانی و ...) تحلیل و نتایج آنها در تشخیص عیب استفاده می شود.

استفاده از روش آنالیز ارتعاشات بعنوان یک روش هشدار دهنده جهت آلام و تریپ ماشینهای دوار در نیروگاههای جهان حدود ۷۰ سال سابقه دارد و امروزه اکثر ماشینهای دوار نیروگاهها به سنسورهای ارتعاش سنج جهت اعلام حد آلام و تریپ مجهز می باشند.

اما کاربرد این روش بمنظور مانیتورینگ شرایط و تعمیرات پیش‌بینی شونده حدود ۴۰ سال است که در جهان آغاز شده و در برخی از نیروگاههای ایران نیز این تکنولوژی بکار گرفته شده یا در حال نصب می باشد.

تحلیل ارتعاشات به بررسی و تفسیر سیگنالهای ارتعاشی که توسط سنسورها از نقاط مختلف ماشین (معمولاً یاتاقانها) دریافت می گردند، می پردازد.

تمام ماشینهای دوار با فرکانسهای متفاوتی در حال ارتعاشات می باشند. این فرکانسها به خصوصیات منبع تولید ارتعاشات وابسته می باشند. سیگنال ارتعاشی که از یک نقطه ماشین بدست می آید، برآیند تمام امواج ارتعاشی وارد شده به آن نقطه می باشد. بعنوان مثال سیگنال ارتعاشی که از یک گیربکس دریافت می شود دارای فرکانسهای مختلفی از قبیل فرکانس دوران محور و هارمونیکهایش، فرکانس تماس دندانه‌ها، فرکانسهای مربوط به یاتاقانها و ... می باشد. در صورتیکه هر یک از اجزاء ماشین شروع به تخریب کند، مشخصه‌های ارتعاشی آن تغییر می کند و هدف از تحلیل ارتعاشات شناسایی و بررسی این تغییرات و در نهایت تشخیص عیب ماشین می باشد.

جهت انجام تعمیرات پیش‌بینانه ابتدا باید داده‌های ارتعاشی به طریق صحیح از نقاط مختلف ماشین جمع‌آوری و سپس به کمک تکنیکهای مختلف به تجزیه و تحلیل این اطلاعات پرداخته شود.

لازم به ذکر است که رفتار ارتعاشی ماشینهای دوار به عوامل زیادی بستگی دارد که در هنگام اندازه‌گیری باید به آنها توجه شود. چند نمونه از این عوامل عبارتند از:

- لقی قطری (Diametrical clearance) یاتاقانها
- سرعت کاری (پیوسته) ماکزیمم ماشین
- بار استاتیکی یاتاقان (مانند وزن شفت که بر یاتاقان وارد می شود)
- بار دینامیکی یاتاقان (از قبیل: نیروهای ناشی از کوپلینگ، نامیزانی و ...)
- مقادیر تنش / کرنش واقعی (که توسط بارهای استاتیکی و دینامیکی ایجاد شده‌اند)
- موقعیت خط مرکز شفت

- دمای یاتاقان‌ها (در حالت نازک‌ترین لایه روغن)
- موقعیت فیزیکی یاتاقان‌ها (که بر شکل مدهای مختلف شفت تاثیر می‌گذارد)
- ناهمگونی الکتریکی (Electrical runout) شفت
- ناهمگونی مکانیکی (Mechanical runout) و خارج از مرکزی شفت
- نوع یاتاقان ژورنال
- انعطاف پذیری پایه‌های یاتاقان‌ها
- انعطاف پذیری فونداسیون
- نسبت وزن پوسته به محور
- ماشینهای مجاور یا تحریک‌های خارجی دیگر (تأثیر بالقوه دارند)
- تغییرات بارگذاری
- تغییر دمای محیط (بین روز و شب و یا تابستان و زمستان)

۲-۳-۲- انواع روشهای عیب‌یابی ماشینهای دوار

عیب یا خطا ترجمه‌ای از واژه Fault است که در کاربرد سخت‌افزار "عیب" و در نرم‌افزار "خطا" در نظر گرفته می‌شود. فرآیند عیب‌یابی عموماً با شناسایی یک رفتار غیر عادی ماشین در طی عملیات مانیتورینگ، آنالیزهای روزمره و یا بصورت تجربی آغاز می‌شود. ردیابی عیب با انجام مقایسه بین پارامترهای واصف ماشین و مقادیر مبنا صورت می‌گیرد که این مقادیر مبنا از طریق تجربه و یا مطابق پیشنهاد سازنده و یا از طریق انجام آزمایشات لازم در زمان راه اندازی اولیه ماشین و یا از طریق داده‌های آماری محاسبه می‌گردد. در علوم مختلف (کامپیوتر و شبکه، ریاضی، پزشکی و ...) روشهای زیادی برای تشخیص (diagnosis) و طبقه‌بندی عیوب معرفی شده‌اند، اما بر اساس استاندارد ISO13379 دو روش اصلی برای عیب‌یابی ماشینهای دوار بکار گرفته می‌شود:

- روشهای عددی و هوش مصنوعی (Machine Learning techniques): این روشها عموماً بصورت اتوماتیک می‌باشند و در این روشها نیازی به آگاهی و شناخت از مکانیزم شروع و گسترش عیب ندارند. ولی این روشها نیاز به مدت زمانی جهت آموزش سیستم برای شناسایی عیوب مختلف می‌باشند.
- یکی از قدیمی‌ترین این روشها برای عیب‌یابی الگوریتم نزدیکترین همسایه (K-Nearest Neighbors algorithm) می‌باشد. در این روش از تعدادی داده نمونه برای آموزش قوانین KNN استفاده می‌شود. این قوانین موقعیت نقاط نمونه را ذخیره کرده و هنگام دریافت داده‌های جدید فاصله آنها را از نقاط نمونه محاسبه می‌کنند. به تدریج برای برطرف کردن نواقص الگوریتم KNN روشهای تکمیلی دیگری از قبیل PCA, SVM, ... ایجاد شد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) نیز در شاخه الگوریتمهای ریاضی برای عیب‌یابی قرار دارند. آنها توانایی یادگیری بصورت خودآموز دارند و خیلی راحت می‌توان از آنها استفاده نمود. البته برای اجتناب از بروز همپوشانی یک

سری تغییرات اصلاحی روی آنها انجام شده است. بطور کلی استفاده از شبکه های عصبی در کنار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) در عیب یابی موفق بوده است.

در روش شبکه های عصبی علاوه بر در نظر گرفتن اطلاعات موجود، آموزش سیستم در دراز مدت نیز هدف می باشد. با گذشت زمان و کسب اطلاعات تجربی از ماشین در اثر وقوع عیوب مختلف، آموزش شبکه عصبی برای در نظر گرفتن این اطلاعات انجام خواهد گرفت.

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM: Support Vector Machine) در مقایسه با شبکه های عصبی بجای استفاده از یک نگاشت غیر خطی، از ضرب داخلی یک تابع کرنل در یک فضای چند بعدی استفاده می کند. لذا برای حل مسائل غیر خطی با ابعاد بالا و حجم داده های زیاد مزایای فراوانی دارد. این روش از مدل‌های یادگیری آموزش یافته به همراه تحلیل‌های آماری و برگشتی استفاده می کند. قدرت این روش در طبقه بندی عیوب موجب شده تا در عیب یابی بطور وسیع از آن استفاده شود و جزو روش‌های متداول یادگیری ماشین (machine learning) قرار گیرد.

شبکه های بایسیان (Bayesian Networks) نیز یک مدل آماری احتمالاتی است که از یک سری نمودار برای یافتن وابستگی های شرطی استفاده می کند.

- روش‌های مبتنی بر مدل: این روش‌ها متکی بر استفاده از مدل عیوب و مدل‌های رفتار ماشین می باشند. در این روش از مقایسه اطلاعات اندازه گیری شده با جداول و اطلاعات تجربی موجود یا اطلاعات حاصل از مدلسازی عیوب، تشخیص عیب انجام می گیرد. این روش همچنان در صنایع مختلف وجود دارد.
- در ماشین‌ها و سیستم های بزرگ و پیچیده به علت تعدد عیوب مختلف در سیستم و تاثیرات متقابل آنها بر روی یکدیگر، مشخصه های عیوب در شرایط مختلف کارکرد و بهره برداری از ماشین یا سیستم تعیین می گردند و سپس در جداولی که بیانگر عیوب و مشخصات آنها با پروسه کارکرد و بهره برداری است، دسته بندی لازم صورت می گیرد. در این روش داده ها با توجه به موقعیت نقطه اندازه گیری تحلیل می شوند و از موقعیت و ارتباط فیزیکی نقاط اندازه گیری برای عیب یابی استفاده می شود.
- در روش‌های مبتنی بر مدل نیز ممکن است از هوش مصنوعی استفاده گردد ولی خیلی شایع نمی باشد [۹ و ۱۰].

۲-۳-۳- دسته بندی و کاربرد روش‌های مختلف آنالیز ارتعاشات در عیب یابی

روش‌های استخراج مشخصه های ارتعاشی نقش مهمی در عیب یابی ماشین‌های دوار دارند. این روش‌ها پیوسته در حال پیشرفت و توسعه بوده و در عیب یابی از طریق تحلیل ارتعاشات بسیار مؤثر می باشند. تحقیقات برای توسعه روش‌های اتوماتیک عیب یابی ادامه دارد و ابزارهایی از قبیل شبکه های عصبی و شبکه های فازی به‌همراه روش‌های تحلیل ارتعاشات برای افزایش کارایی آنها به کار می روند.

بطور کلی روشهای حوزه زمان کمک چندانی به تشخیص عیب نمی‌کنند و بیشتر برای پایش وضعیت به کار می‌روند. اما از طریق روشهای حوزه فرکانس و زمان-فرکانس و همچنین با کمک از شبکه‌های عصبی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) می‌توان عملیات عیب‌یابی را ساده‌تر و به صورت اتوماتیک و آنالیز انجام داد.

عیب‌یابی در ماشینهای دوار از طریق آنالیز ارتعاشات سه مرحله اصلی دارد:

- ۱- دریافت داده‌ها (DAQ: Data Acquisition) به کمک سنسورهای ارتعاشی
- ۲- تحلیل داده‌ها: استخراج مشخصات و رفتار ارتعاشی ماشین از داده‌ها (Feature extraction)
- ۳- عیب‌یابی (Fault Detection)

روشهای موثر تحلیل داده‌های ارتعاشی نقش مهمی در موفقیت عیب‌یابی دارد. در سی سال اخیر برخی از محققان روشهای آنالیز ارتعاشات را از نقطه نظرهای متفاوتی مرور کرده‌اند. در دهه ۱۹۸۰، Mathew و Alfredson روشهای پایش وضعیت ارتعاشی را در حوزه زمان و فرکانس برای یاتاقانهای بلبرینگ مرور کردند. Smith و Kim آنالیز طیف فرکانسی، آنالیز مؤلفه اصلی، آنالیز زمان-فرکانس، تبدیل موجک گسسته و الگوریتم شناسایی تغییر را ارائه نمودند. Lebold و McClintic روشهای آماری در تشخیص عیوب ارتعاشی گیربکس‌ها را مرور نمودند. Tandon و Choudhury روشهای اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاشات و آکوستیک را برای عیب‌یابی بلبرینگها مرور نمودند. Chow روشهای بر اساس مدل (model-based) و روشهای پردازش سیگنال را برای عیب‌یابی موتورها بررسی نمود [۹].

بطور کلی روشهای آنالیز ارتعاشات برای ماشینهای دوار را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود:

- حوزه زمان: برای سیگنالهایی که در طول زمان فرکانس آنها تغییر می‌کند مناسب می‌باشد.
- حوزه فرکانس: برای سیگنالهایی که فرکانس ثابت دارند مفید است.
- حوزه زمان-فرکانس که به دو شاخه تقسیم می‌شود:

• روشهای خطی:

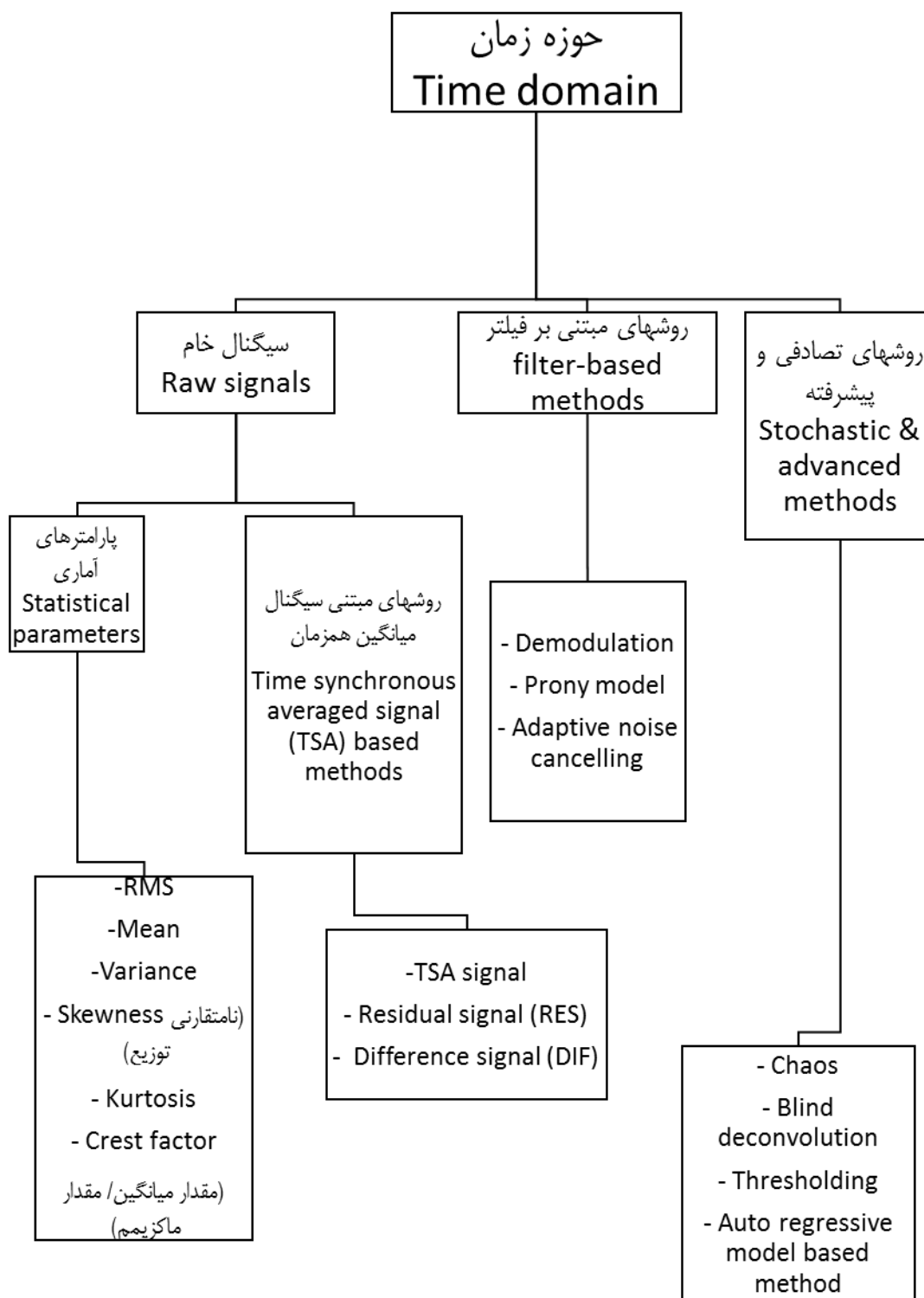
روشهای خطی می‌توانند معکوس گرفته شده و به حوزه زمان برگردانده شوند. بنابراین برای پردازش سیگنال (حذف نویز و فیلترهای متغیر زمانی مانند STFT) مناسب‌تر می‌باشند.

• روشهای غیرخطی:

این روشها توزیع انرژی سیگنال را در حوزه زمان-فرکانس بیان می‌کنند که برای تحلیل، دسته‌بندی و شناسایی مشخصات سیگنال مناسب می‌باشند. اطلاعات زاویه فاز در این روشها از بین می‌رود و لذا نمی‌توان سیگنال را به حوزه زمان برگرداند.

۲-۳-۱- روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه زمان

سیگنالهای خام ارتعاشی در ابتدا بصورت یک سری مقادیر عددی (نشان دهنده جابجایی، سرعت یا شتاب) در حوزه زمان می‌باشند. روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه زمان طبق فلوچارت شکل ۶۹ دسته‌بندی می‌شوند [۹]:



شکل ۶۹: روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه زمان

الف) روش‌های مبتنی بر سیگنال خام:

- پارامترهای آماری:

پارامترهای RMS و Crest factor در عیب‌یابی یاتاقانها و گیربکس‌ها استفاده می‌شوند. پارامتر RMS (ریشه میانگین مربعات) در تشخیص نامیزانی ماشین‌های دوار هم خیلی مؤثر و پرکاربرد است ولی برای تفکیک و شناسایی عیوب به اندازه کافی مؤثر نیست.

Thandon نشان داده که تحلیل پارامترهای آماری (توزیع گوسی) ارتعاشات در عیب‌یابی یاتاقانها مؤثر است. Mathew و Alfredson نیز این موضوع را تایید نموده‌اند. Andrade بین CDF (Cumulative Density Function) توزیع هدف و CDF توزیع مرجع مقایسه‌ای انجام داد و از میزان شباهت آنها توانست ترک دندانه‌های گیربکس در اثر خستگی را به درستی شناسایی کند.

مقدار میانگین (Mean)، واریانس (Variance) و اسکیونس (Skewness) به ترتیب ممانهای اول تا سوم توزیع احتمال هستند. کورتوسیس (Kurtosis) به عنوان ممان چهارم توزیع احتمال تعریف می‌شود و میزان مسطح بودن یا تیزی توزیع حالت نرمال را اندازه‌گیری می‌کند. از این پارامتر بیشتر در عیب‌یابی یاتاقانها و گیربکسها استفاده می‌شود. همچنین برای عیب‌یابی بلبرینگها از ترکیب RMS و Peak و کرتوسیس و Crest با روش خاصی استفاده شده است.

- روش‌های بر اساس سیگنال میانگین همزمان در حوزه زمان:

سیگنالهای TSA همان سیگنالهای خام زمانی هستند که بطور همزمان میانگین‌گیری شده‌اند و مقدار نویز تا حد زیادی کاهش یافته است. سیگنالهای تکراری پس از TSA اطلاعات مربوط به عیوب را می‌توانند نشان دهند. البته لازم است که فرکانسهای تکراری سیگنال دلخواه از قبیل فرکانسهای عیوب بلبرینگها و گیربکسها و شفتها را بدانیم. این روش در عیب‌یابی بلبرینگها و گیربکسها عملکرد خوبی داشته است.

سیگنالهای باقیمانده (RES) همان سیگنالهای TSA هستند که مؤلفه‌های شفت و هارمونیکهای آنها حذف شده‌اند. این سیگنالها ممکن است به سیستم (ماشین) وابسته باشند.

سیگنالهای اختلاف (DIF) با حذف مؤلفه‌های مش بندی منظم از سیگنال TSA بدست می‌آیند. سیگنالهای RES و DIF برای عیب‌یابی گیربکسها بطور مؤثر بکار می‌روند.

ب) روش‌های مبتنی بر فیلتر

فیلترها بصورت گسترده جهت حذف نویز و تفکیک سیگنالها در روشهای تحلیل سیگنال بکار می‌روند، که تمام این روشها را روشهای مبتنی بر فیلتر نامگذاری می‌کنند. این روشها سه دسته اصلی دارند:

- دمودولاسیون (demodulation)

- مدل پرونی (Prony model)

- حذف نویز انطباق پذیر (Adaptive noise cancelling: ANC)

دمودولاسیون دامنه و فاز روش مهمی در پردازش سیگنال می‌باشد. دمودولاسیون دامنه که انولوپ (envelop) یا پوش نیز نامیده می‌شود، سیگنالهای فرکانس پایین را از نویز محیط جدا می‌کند و امکان اندازه‌گیری آسان آنها را فراهم می‌کند. در عیب‌یابی گیربکسها، دمودولاسیون دامنه که متمرکز بر هارمونیکهای اصلی دندانه‌های گیربکس می‌باشد بکار

می رود. این روش برای عیب‌یابی بلبرینگها نیز مفید بوده است. دمودولاسیون فاز در محدوده تشدید سازه‌ای، ضربه‌هایی که توسط عیوب القاء و تحریک شده اند را نمایان می‌کند.

مراحل دمودولاسیون عموماً با استفاده از فیلترهای متعارف IIR (پاسخ ضربه نامحدود infinite impulse response) از قبیل باترورث (butterworth)، جبیشف (chebyshev)، بسل (bessel) و بیضوی در باند فرکانسی عبوری یا باند فرکانسی توقف شروع می‌شود.

مدل پرونی یک الگوریتم برای یافتن فیلتر IIR مناسب با یک پاسخ ضربه مشخص در حوزه زمان می‌باشد. این روش در عیب‌یابی یاتاقانها بکار می‌رود.

در روش ANC یک فیلتر انطباقی در یک سیستم حذف نویز انطباقی بکار گرفته شده و در عیب‌یابی یاتاقانها مؤثر واقع شده است. همچنین روش ANC غیر همزمان (آسنکرون) در عیب‌یابی بلبرینگهای خود تنظیم موفق بوده است.

ج) روشهای تصادفی و پیشرفته

روشهای پیشرفته از قبیل پارامترهای تصادفی برای تحلیل ارتعاشات در حوزه زمان استفاده می‌شوند.

آشوب (chaos) برای استخراج مشخصات ارتعاشی عیوب بلبرینگها استفاده می‌شود. Nirbito امکان سنجی کاربرد روش blind deconvolution برای عیب‌یابی یاتاقانها با سیگنالهای نویز دار نسبتاً شدید را بررسی و با موفقیت آزمایش نمود.

حذف نویز با روش آستانه گذاری (سخت افزاری و نرم افزاری) در تحلیل ارتعاشات زیاد بکار می‌رود و معمولاً با انولوپ یا روشهای دیگر هنگام عیب‌یابی استفاده می‌شود. روش خود بازگشتی مبتنی بر مدل در عیب‌یابی ماشینها با موفقیت استفاده شده است [۹].

۲-۳-۳-۲- روشهای آنالیز ارتعاشات در حوزه فرکانس و حوزه زمان-فرکانس

این روشها عموماً بهتر از روشهای حوزه زمان در تشخیص عیب ماشینها عمل می‌کنند، زیرا که مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با عیوب براحتی در این روشها بدست می‌آید.

همانطور که در جدول ۱ دیده می‌شود با افزایش مرتبه پارامتر تبدیل حوزه فرکانس یا حوزه زمان-فرکانس تاثیر این روشها در عیب‌یابی افزایش می‌یابد. این روشها با محاسبه correlation یا مقدار لگاریتمی پارامترهای تبدیل نیز بکار می‌روند. برای مثال پس از کاربرد گسترده اسپکتروم (در هر دو حالت خطی و لگاریتمی) در عیب‌یابی، پاور اسپکتروم به عنوان طیف مرتبه دوم با موفقیت در عیب‌یابی بکار می‌رود.

کاربرد روشهای آنالیز ارتعاشات مناسب به نوع ماشین و روش عیب‌یابی بهینه آن بستگی دارد. در جدول ۲۹ زیر روشهای تحلیل ارتعاشات در حوزه فرکانس و زمان-فرکانس بطور خلاصه نمایش داده شده اند [۹].

جدول ۲۹: روش‌های آنالیز ارتعاشات در حوزه فرکانس و زمان-فرکانس

مرتبۀ ۴	مرتبۀ ۳	مرتبۀ ۲	مرتبۀ ۱
	Bicoherence spectrum	Power spectrum Power cepstrum	FFT
	Bilinearity	Cyclostationarity	Correlation of spectrum Signal averaging
Wigner Trispectra	Wigner bispectra	Spectrogram wigner distribution	Short time fourier transform (STFT)
		scalogram	Continuous wavelet transform (CWT) Discrete wavelet transform (DWT)
			Discrete wavelet packet analysis (DWPA) Time-averaged wavelet spectrum (TAWS) Time-frequency scale domain (TFS)

حوزه فرکانس یا تحلیل طیف فرکانسی ارتعاشات شایع‌ترین روش برای عیب‌یابی یاتاقانها می‌باشد. در این روش داده‌های ارتعاشی در حوزه زمان اندازه‌گیری شده و با کاربرد تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند. محدوده فرکانسی اندازه‌گیری به سرعت دورانی ماشین بستگی دارد.

روش عیب‌یابی به این صورت است که یک طیف فرکانسی در حالت سلامت ماشین بعنوان طیف پایه (base line) ذخیره می‌گردد و طیفهای بدست آمده در زمانهای بعدی تحت شرایط سرعت و بار یکسان با این طیف پایه مقایسه شده و عیب‌یابی می‌گردد. هر گونه افزایش دامنه ارتعاشات نسبت به طیف پایه می‌تواند نشانگر پیدایش مشکلی در ماشین باشد.

این روش کاربرد فراوانی در تحلیل ارتعاشات دارد و سیستمهای نرم‌افزاری خبره عملیات تفسیر اطلاعات را بسیار آسان نموده‌اند. همچنین با استفاده از نمودارهای سه‌بعدی water-fall که با این روش تهیه می‌گردد، می‌توان هر گونه تغییر کوچکی در شرایط ماشین را مشاهده و عیب‌یابی نمود.

پاور اسپکتروم که همان مربع اسپکتروم (FFT) است، در عیب‌یابی ماشینهای دوار بسیار مؤثرتر می‌باشد. این روش که اسپکتروم مرتبه دوم (bispectrum) نیز نامیده می‌شود بیشتر در عیب‌یابی یاتاقانهای ماشینهای دوار به کار می‌رود. اسپکتروم مرتبه سوم (bicoherence) برای اندازه‌گیری کوه‌رنس فاز در بین سه مؤلفه طیف فرکانسی ناشی از کوپل شدن امواج غیر خطی در عیب‌یابی یاتاقانها بکار می‌رود.

پاور کپستروم برابر لگاریتم پاور اسپکتروم می‌باشد و در عیب‌یابی ماشینهای دوار کاربرد مؤثری دارد. سیکلو استیشنری (cyclostationary)، مرتبه دوم روش میانگین‌گیری همزمان در حوزه فرکانس بوده و ابزار مؤثری در تشخیص زود هنگام عیوب گیربکسها می‌باشد.

در سالهای اخیر روشهای حوزه زمان-فرکانس توسعه زیادی یافته‌اند و مهمترین مشخصه آنها این است که قابلیت نمایش سیگنال در هر دو حوزه را دارا می‌باشند. این مشخصه به تحلیل سیگنالهای ارتعاشی گذرا کمک می‌کند. روشهای اولیه حوزه زمان-فرکانس مانند FFT و STFT در پایش وضعیت ماشینها کاربرد زیادی دارند.

توزیع وینگر (Winger) و اسپکتروگرام روش‌های مرتبه دوم شناخته شده‌ای در حوزه زمان-فرکانس هستند که برای تشخیص عیوب گیربکسها کاربرد دارند. مراتب سوم و چهارم طیف ممان وینگر که به ترتیب توزیع وینگر bi-spectra و tri-spectra نامیده می‌شوند برای پایش وضعیت ارتعاشی ماشینهای دوار استفاده می‌شوند. مرتبه چهارم طیف وینگر در عیب‌یابی سیستم ولوهای (valve) یک موتور استفاده شده است. تبدیل موجک پیوسته (CWT) نیز در عیب‌یابی ماشینهای دوار کاربرد دارد. همچنین اسکالوگرام (Scalogram) بعنوان مرتبه دوم CWT در عیب‌یابی گیربکس‌ها استفاده شده است. از تبدیل موجک گسسته (DWT) برای عیب‌یابی بلبرینگها استفاده شده است [۹].

۲-۳-۴- عیوب متداول ماشینهای دوار و مرور کارهای گذشته

در همه روش‌های عیب‌یابی تجربه عامل تعیین‌کننده می‌باشد. امروزه جهت درک بهتر از وضعیت سیستم و بخصوص در مورد عیوب‌هایی که مشخصه‌های یکسان دارند از مدل تحلیلی و آزمایشگاهی جهت بدست آوردن مشخصه‌های بیشتر استفاده می‌شود.

Heinz Bloch, Geitner عوامل خرابی در چند نوع ماشین را دسته‌بندی کرده و مشخصه‌های فرکانسی چند عیب متداول را ارائه کردند. Nathoo, Grenwelge چند عیب در توربینهای بخار را بر حسب تغییر پارامترهای ارتعاشی به صورت تحلیلی و تجربی دسته‌بندی کردند. Beatty اثر پدیده تماس و سایش را در توربوماشینها بررسی و احتمال پیدایش مؤلفه‌های فرکانس بالا را در پاسخ فرکانسی سیستم بصورت تحلیلی و آزمایشگاهی نشان داد. Lim اثرات ارتعاشی چند عیب متداول را برحسب فرکانس جمع‌آوری کرد. Mitchell عیوب مختلف در ماشینهای مختلف و بخصوص در ماشینهای دوار را برحسب فرکانس به صورت تجربی دسته‌بندی کرد.

Edward, Less, Friswell تحلیل‌های انجام‌گرفته در مورد عیوب نامیزانی و خمیدگی و ترک شفت را جمع‌آوری کرده و این عیوب را سه عیب اساسی در توربوماشینها معرفی کرد. در همه مطالعات صورت‌گرفته تجربه عامل تعیین‌کننده بوده است و تحلیل‌های صورت‌گرفته نیز در جهت تأیید مشاهدات تنظیم شده‌اند [۱۵-۱۷].

۱) نامیزانی محورهای دوار

شایعترین عامل لرزش در توربینها نامیزانی است. نامیزانی توزیع نابرابر وزن یک قسمت حول محور دوران آن می‌باشد. استاندارد ISO 1925 نامیزانی را "شرایطی که در یک محور وجود دارد که نیروهای ارتعاشی یا حرکت ارتعاشی را تحت عنوان نیروهای جانب مرکزی به یاتاقان هایش وارد می‌کند"، تعریف می‌نماید.

نامیزانی در توربین-ژنراتور، عیب ناشی از قرار نگرفتن محور اینرسی روتور بر محور تقارن آن می‌باشد. در همه محورهای دوار مقداری نامیزانی اولیه وجود دارد و رفع کامل نامیزانی در سیستمهای واقعی امکان پذیر نیست. غالباً در استانداردها مقدار مجازی برای ارتعاش سیستم در اثر آن در نظر گرفته می‌شود. همچنین نامیزانی در اثر کارکرد، تعمیر و نگهداری،

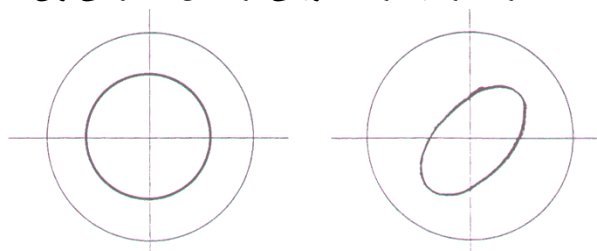
مک‌های ریخته‌گری نیز بوجود می‌آید. این عیب در نهایت باعث سایش آب بندها، شکست و خرابی یاتاقانها یا تشدید می‌شود.

مطالعات اولیه روی سیستم‌های نامیزان به منظور مرتفع کردن این مشکل بوده ولی چون رفع کامل این مشکل امکان‌پذیر نبوده در نتیجه مطالعات بعدی بیشتر در جهت کم کردن دامنه ارتعاشی صورت گرفته که این مطالعات در نهایت در مرحله طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رفتار ارتعاشی سیستم‌های نامیزان توسط Orcutt, Lund مطالعه شد. در این مطالعه اثرات نامیزانی روی سیستم با در نظر گرفتن سختی و میرایی خطی در یاتاقانها و اثرات ژيروسکوپیک دیسکها به کمک ماتریس انتقال به صورت تئوری مطالعه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در این مقایسه هدف بدست آوردن فرکانسهای طبیعی سیستم بود و نتایج تا فرکانس طبیعی سوم مقایسه شده‌اند. غالباً شفت‌ها بسته به دور آنها به دو دسته صلب و انعطاف‌پذیر تقسیم می‌گردند. بالانس کردن شفت‌ها در اثر نامیزانی از مهمترین مسائل می‌باشد و در شفت‌های انعطاف‌پذیر این مسئله اهمیت بیشتری دارد و این شفت‌ها باید در N یا $N+2$ صفحه میزان شوند (N تعداد سرعت‌های بحرانی که سیستم در دوری بالاتر از آن کار می‌کند) Kellenberger مسئله میزان کردن شفت‌ها را بررسی و اهمیت و دقت هر کدام از روشهای اخیر را مقایسه کرد. وی نشان داد که میزان کردن شفت‌ها در N یا $N+2$ صفحه از نظر دقت و هزینه باید مقایسه شوند. در روش T.M توزیع نقطه‌ای برای نامیزانی در شفت در نظر گرفته شده بود با پیشرفت در صنعت رایانه‌ای امروز مدل کردن روتورها با روش اجزای محدود نیز گسترش یافته است و این امر امکان تحلیل سیستم را به شکل توزیع‌های دلخواه از نامیزانی فراهم کرده است. Gash رفتار سیستم را با F.E در اثر نیروی نامیزانی و تأثیرات میرایی ژيروسکوپیک و اثرات فونداسیون بررسی کرد. در همان سال Nelson, Mcvaugh نیز با در نظر گرفتن المان تیر برای شفت، صلب در نظر گرفتن دیسکها و تعریف پارامترهای خطی میرایی و سختی در یاتاقانها رفتار سیستم را در اثر نیروی نامیزانی بررسی کردند. به علت تشابه رفتار سیستم در گذر از سرعت‌های بحرانی با پاسخ سیستم به نیروی نامیزانی، گاهی از پاسخ سیستم به نامیزانی جهت محاسبه فرکانسهای طبیعی سیستم نیز استفاده شده است. مطالعاتی که در سالهای اخیر روی مسئله صورت گرفته بیشتر در زمینه استفاده از مستهلک‌کننده‌ها به منظور کم کردن دامنه پاسخ به نامیزانی و یا مطالعه تأثیر پارامترهای غیرخطی بر پاسخ سیستم، استفاده از تکنیک‌های حل به جهت کم کردن حجم محاسبات و یا بدست آوردن توزیعی از نامیزانی به منظور بالانس کردن سیستم بوده است.

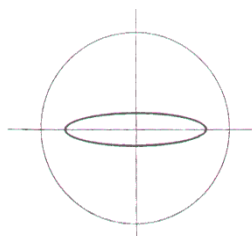
ارتعاشات ناشی از نامیزانی غالباً "در فرکانس $1 \times RPM$ روی می‌دهد، و دامنه آن در راستای شعاعی بیشتر از دامنه در راستای محوری است. دامنه ارتعاشات با افزایش سرعت بطور غیر خطی با شیب تند، زیاد می‌شود و با کاهش سرعت بطور غیر خطی با شیب تند کم می‌شود. دامنه ارتعاشات ناشی از نامیزانی متناسب با مقدار جرم و شعاع نامیزانی و سرعت دورانی تغییر خواهد کرد. با افزایش سرعت، دامنه متناسب با مجذور سرعت در جهت شعاعی افزایش می‌یابد. در سرعت‌های زیر سرعت بحرانی با افزایش سرعت، زاویه فاز نیز افزایش می‌یابد و بعد از سرعت بحرانی اختلاف فاز به 180° درجه خواهد رسید.

از آنجائیکه مشخصه‌های ارتعاشی نامیزانی با اندازه گیری لرزش محور بهتر بدست می‌آیند لذا برای اندازه گیری حرکت نسبی شفت نسبت به یاتاقان پیک‌آپ‌هایی را درون یاتاقان نصب می‌کنند. با فرض اینکه ارتعاشات مهم دیگری در سیستم وجود نداشته باشد، حرکت مقطع شفت دایروی یا تا حدی بیضوی می‌باشد (شکل ۷۰). اگر مسیر حرکت شکل بیضوی بخود بگیرد بطوریکه نسبت قطر بزرگ به کوچک نسبتاً "بالا باشد (مثلاً" نسبت ۸ به ۱ یا نسبت ۱۰ به ۱ یا بیشتر)،

احتمالاً "ماشین در محدوده یک فرکانس تشدید سازه‌یی کار می‌کند و نباید با عیب نامیزانی اشتباه گرفته شود (شکل ۷۱). این نکته را با توجه به اثر تغییر در سرعت دورانی بر شکل مسیر می‌توان کنترل کرد [۱۱-۱۷].



شکل ۷۰: مسیر دایره‌ای یا بیضوی مرکز شفت نامیزان



شکل ۷۱: مسیر بیضوی با نسبت قطر زیاد ناشی از تشدید احتمالی

در شکل ۷۲ مشخصه‌های ارتعاشی و همچنین محل‌های اندازه‌گیری و زاویه فاز برای دو حالت نامیزانی استاتیکی و دینامیکی (کوپلی) نشان داده شده است.



شکل ۷۲: نامیزانی جرمی استاتیکی (راست) و دینامیکی (چپ)

۲) خمیدگی محور

تغییر شکل شفت در توربوماشینها در اثر عدم گرمایش یکنواخت محور مخصوصاً "در راه‌اندازی سیستم، نیروی وزن زیاد، نامیزانی زیاد و نصب انقباضی حاصل می‌گردد. خمیدگی شفت علاوه بر ایجاد ارتعاش غیر مجاز در سیستم، سبب تماس شفت با آب‌بند و یا نوک پره با پوسته شده و گرمای حاصله مشکل را دو چندان می‌کند. علاوه بر موارد ذکر شده خمیدگی موجب آسیب دیدگی کوپلینگها و یاتاقانها نیز می‌گردد. رفع این عیب، علاوه بر مرتفع ساختن آن از آسیب دیدگی بقیه قسمت‌ها نیز جلوگیری می‌کند.

خمیدگی شفت علاوه بر موارد ذکر شده در عیب نامیزانی سبب آسیب دیدگی یاتاقانها و کوپلینگها نیز می‌گردد. شناسایی این مشکل و رفع آن علاوه بر مرتفع نمودن مشکل، از آسیب دیدگی بقیه قسمت‌ها نیز جلوگیری خواهد کرد. اولین خمیدگی در شفت در اثر تماس و سایش و حرارت ناشی از آن در سال (۱۹۲۵) گزارش گردید ولی هیچ‌گونه تحلیلی روی مجموعه

صورت نگرفت. در سال (۱۹۷۶) مدل تک‌جرمی جهت تحلیل رفتار سیستم به کار گرفته شد و نحوه تغییرات زاویه فاز و دامنه با سرعت سیستم در یاتاقانهای صلب بررسی گردید. در سال (۱۹۷۸) اثرات یاتاقانها نیز بر مجموعه افزوده شده و تحلیل روی سیستم چند جرمی صورت گرفت. در روش اخیر که براساس روش ماتریس انتقال می‌باشد. یاتاقانها خطی مدل گردیدند. دقت روش اخیر در سال (۱۹۸۰) به کمک مقادیر آزمایشگاهی روی پنج نوع یاتاقان مختلف بررسی شد و مشخص گردید که مدل بکاررفته دقیق می‌باشد و از طرفی مدل بکارگرفته‌شده، پاسخ سیستم را درحالت واقعی بیان نخواهد کرد. با مشخص شدن رفتار ارتعاشی سیستم در سال (۱۹۸۸) روشی جهت میزان کردن شفت انعطاف‌پذیر خمیده ارائه گردید. در این تحقیق، سه روش مختلف جهت میزان کردن سیستم ارائه شد. در روش اول نامیزانی و خمیدگی بصورت، جرمی نامیزان در سیستم در نظر گرفته شده و سیستم در سرعت بالانس، بالانس می‌گردد. حسن این روش در اندازه‌گیری مسقیم دامنه در اثر نامیزانی می‌باشد. در روش دوم، اندازه‌گیری تنها به صورت میزان کرن جرم نامیزان صورت می‌گیرد و خمیدگی دینامیکی شفت نیز مرتفع می‌گردد. و بدین ترتیب با دستگاههای اندازه‌گیری میزان خمیدگی استاتیکی شفت اندازه‌گیری می‌شود. در روش سوم، سیستم در سرعتی نزدیک به سرعت بحرانی بالانس گردیده و دامنه به مقدار معینی کاهش داده می‌شود و در نتیجه در بقیه سرعتها، دامنه ارتعاش کم خواهد بود. در این روش در حقیقت بالانس طوری صورت می‌گیرد که پاسخ سیستم در سرعت بحرانی حداقل باشد. در سال (۱۹۸۹) مدل کاملتری از سیستم ارائه و نیروهای وارده بر سیستم در اثر خمیدگی محاسبه گردیدند و اثراتی نظیر زاویه دوران دیسک نیز در نظر گرفته شده و بدین ترتیب به صورت تحلیلی اثرات این زاویه و موقعیت دیسک روی پاسخ خمشی و جابجایی سیستم و زوایای فاز هریک بحث گردید.

این عیب عمدتاً با فرکانس $1 \times RPM$ و $2 \times RPM$ رخ می‌دهد. ارتعاشات حاصله از خمیدگی شفت بیشتر در محور ظاهر گشته و در اندازه‌گیری بر روی یاتاقان کمتر مشاهده می‌گردد (بطور کلی دو نوع اندازه‌گیری ارتعاش در ماشینهای دوار بکار گرفته می‌شود که شامل اندازه‌گیری مطلق یاتاقان با شتاب‌سنج و اندازه‌گیری نسبی شفت به پوسته یاتاقان با سنسور غیر تماسی است). این عیب از نظر مشخصات ارتعاشی خیلی شبیه به عدم هم‌محوری یاتاقانها می‌باشد. شکل موج زمانی دامنه پاسخ سیستم، سینوسی بوده و با گذشت زمان تغییر نخواهد کرد و پاسخ سیستم ماندگار خواهد بود. حرکت مقطع شفت بیضوی و یا دایروی می‌باشد که از این نظر شبیه به نامیزانی رفتار خواهد کرد. نحوه تشخیص عیوب با مشخصه ارتعاشی یکسان در ادامه ذکر گردیده است [۱۱-۱۷].

۳) ترک محور

مشکل مهم دیگر در توربین‌ها پیشرفت مقطعی ترک در شفت می‌باشد. این مشکل در مقایسه با سایر مشکلات توربین‌ها بندرت اتفاق می‌افتد ولی در صورت بروز این مشکل، علاوه بر از بین رفتن محور، سبب آسیب دیدگی سایر قسمت‌ها نیز خواهد شد. این عیب عموماً "در اثر خستگی همچنین تغییرات ناگهانی دما یا بار و یا تنش بیش از حد در محور بوجود می‌آید.

وجود ترک باعث پیدایش ارتعاشاتی در محور می‌شود که دامنه‌اش به عمق و شکل ترک و همچنین به موقعیت ترک در ارتباط با شکل مد شفت بستگی دارد. بنابراین تشخیص بموقع ترک و انجام تعمیرات لازم برای جلوگیری از خسارات بیشتر، اهمیت فراوانی دارد.

ترک باعث عدم تقارن در سختی محور می‌شود که تحت شرایط کاری و با استفاده از تکنیک‌های عیب‌یابی معمول بسختی قابل شناسایی می‌باشد زیرا که در یک دوران، سختی شفت حین باز و بسته شدن ترک تغییر می‌کند. برای تعیین مشخصه‌های ارتعاش محور ترک دار، مدل‌های متفاوتی ارائه شده ولی هنوز تحقیقات کامل انجام نشده است. در اینجا با اشاره مدل، نتایج حاصله از هر یک توضیح داده می‌شود.

در مدل اول، ترک با استفاده از اصل کار مجازی و اصل بقا انرژی مدل شده است. در نتیجه معادلات حرکت، بعثت نیروهای نامیزانی که باعث باز و بسته شدن متناوب ترک می‌شود، غیر خطی هستند. بررسی وحل معادلات نشان می‌دهند که دامنه ارتعاش در صورتیکه نامیزانی با ترک هم فاز باشد، صفر است و اگر نامیزانی با ترک 180° درجه اختلاف فاز داشته باشد، دارای پاسخ با فرکانس $1 \times \text{RPM}$ بسیار شبیه ارتعاش در اثریک نامیزانی اضافی با زاویه و دامنه مشخص می‌باشد. در نتایج تجربی نیز مشاهده می‌شود که وقتی اختلاف فاز نامیزانی با ترک بین 45° - درجه تا 135° درجه است، اثرات ترک در رفتار ارتعاشی کاملاً مشهود است. ولی خارج از این محدوده رفتار شفت به گونه‌ای است که گویا ترک ندارد و دامنه ارتعاشات با فرکانس $2 \times \text{RPM}$ به بردار نیروی نامیزانی بستگی دارد و هنگامی که نامیزانی و ترک هم فاز باشند، به حداکثر می‌رسد.

در مدل دوم، سختی سیستم، با یک ماتریس انعطاف پذیری وابسته به زمان که از تبدیل مختصات دوار به مختصات ثابت در فضا بدست آمده، نمایش داده می‌شود. ترک در حال تنفس را با اضافه کردن چند ترم سختی به ماتریس انعطاف پذیری بصورتی مدل کرده‌اند که وقتی ترک باز است این ترم‌ها تأثیر می‌گذارند و هنگام بسته بودن ترک این ترم‌ها حذف می‌شوند. نتایج عددی نشان داد که مشخصات شفت ترک دار شبیه مشخصات یک شفت با سختی نامتقارن است، بطوریکه یک تشدید در فرکانس $1/2 \times \text{RPM}$ و یک ناپایداری درست قبل از اولین سرعت بحرانی وجود دارد. بعلاوه تشدیدهایی در نسبتهای فرکانسی $1/3$ و $2/3$ نیز وجود دارند. همچنین موقعیت نیروهای نامیزانی نسبت به ترک در باز و بسته بودن ترک نقش مهمی دارند.

این عیب در مقایسه با دیگر عیوب از موارد نادر می‌باشد. ولی اهمیت این عیب از آن جهت است که در صورت بروز هزینه، هنگامی که بار می‌آورد. Gash ترک را تغییر در سختی سیستم در نظر گرفت که در اثر باز و بسته شدن (تنفس ترک) سختی سیستم را تغییر می‌دهند و با حل معادله حرکت سیستم با ضرائب پریودیک، نشان داد که مؤلفه‌های زیرسرعت در پاسخ سیستم ظاهر می‌گردند.

Papadopoulos و Dimargonas پیدایش مؤلفه‌های زیر سرعت در پاسخ سیستم را به عنوان پارامترهای عیب‌یابی ترک معرفی کردند.

Nataraj و Nelson ترک محور را با F.E مدل کردند. در مدل تنها اثر کاهش سختی در نظر گرفته می‌شد و اثر تغییرات سختی در اثر تنفس ترک در نظر گرفته نمی‌شد و المان ترک به صورت یک المان جدا با سختی آن المان در نظر گرفته می‌شد. Luo و Zhao تأثیر ترک شفت را در کم شدن سختی سیستم، افزایش خیز مکانیکی، کاهش فرکانس طبیعی سیستم، در نظر گرفتند و با استفاده از منطق ریاضی و تحلیل فرکانسی سیستم روشی را جهت تشخیص ترک ارائه کردند. تاریخچه کاملی از این پدیده را تا سال (۱۹۹۰) می‌توان در مقاله wauer مشاهده کرد.

Rajab و Sabeeh اثر ترک را روی یک تیر تیموشنکو در نظر گرفتند. با مدل‌های تحلیلی برای ترک در موقعیتها و همچنین عمق مختلف، تغییرات فرکانس طبیعی سیستم را بررسی کردند. با استفاده از تغییرات سه فرکانس طبیعی اول روشی را برای مکان‌یابی ترک با عمق مختلف در موقعیت‌های مختلف را پیشنهاد کردند.

Tsai and Wang اثر ترک را بصورت فنرهای موضعی در نظر گرفتند. در این مطالعه از روش ماتریس انتقال استفاده گردیده و تنها اثر ترک کاملاً باز را در نظر گرفته و رفتار سیستم را بررسی کردند. در این مدل شفت بصورت تیر تیموشنکو مدل گردیده و با محاسبه معادله فرکانسی سیستم و حل آن و بدست آوردن فرکانس و شکل و مقایسه آن با مدل بدون ترک، موقعیت ترک را روی شفت بدست آوردند [۱۱-۱۷].

۴) عدم هم‌محوری

یکی دیگر از عیوب شایع در توربین-ژنراتور، عدم هم‌محوری در محل کوپلینگها می‌باشد. علیرغم وجود یاتاقانهای خودتنظیم و کوپلینگهای انعطاف پذیر هم‌محور کردن دو شفت و یاتاقانهایشان تا اینکه هیچ نیرویی برای ارتعاشات وجود نداشته باشد، خیلی مشکل است. همچنین اگر روشی برای کنترل انبساط گرمایی موضعی لوله‌ها، پایه و فونداسیون توربین-ژنراتور پیش بینی نشده باشد کرنش بیش از اندازه لوله و یا فونداسیون باعث بوجود آمدن این عیب می‌شوند. عدم هم‌محوری، حتی با کوپلینگهای انعطاف پذیر، باعث پیدایش دو نیروی محوری و شعاعی می‌شود که باعث ارتعاشات محوری و شعاعی می‌شوند. این نیروها حتی وقتی که عدم هم‌محوری در محدوده انعطاف پذیری کوپلینگها باشد، نیز وجود دارند. نیروها و بنابراین مقدار ارتعاشات با افزایش عدم هم‌محوری، افزایش می‌یابند. اصولاً "دو نوع عدم هم‌محوری وجود دارد:

الف) عدم هم‌محوری زاویه‌ای: بطوریکه خطهای مرکزی دو شفت، همدیگر را با یک زاویه قطع می‌کنند.

ب) عدم هم‌محوری موازی: بطوریکه خطهای مرکزی دو شفت موازی یکدیگرند ولی نسبت به یکدیگر جابجا شده‌اند.

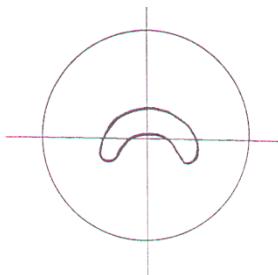
کوپلینگهای چند پینی یا چند دندانه‌ای ارتعاشات با فرکانس بیشتری را تولید می‌کنند. عدم هم‌محوری کوپلینگ موجب نیروهای اصطکاک یا خیز در کوپلینگ می‌شود. این عیب در چرخش محور، باعث خیز سیستم محور و یاتاقان می‌شود و این نیروها را تقویت می‌کند. همچنین ممکن است باعث پدیده‌های ثانویه از قبیل تشدیدهای هارمونیک شود. این عیب در نهایت باعث شکستگی‌هایی در آب‌بندها، کوپلینگها، پیچهای کوپلینگ، یاتاقان، یا دو انتهای شفت می‌شود.

عدم هم‌محوری در ماشینهای مولد و مبدل قدرت در محل کوپلینگها از عیوب شایع در توربو ماشینها می‌باشد. مشکلات مربوط به مدل کردن کوپلینگها و تنوع نوع کوپلینگها بررسی رفتار سیستم را در اثر آن مشکل ساخته است. Chaika تأثیر کوپلینگهای انعطاف‌پذیر را بر رفتار ارتعاش پیچشی و فرکانسهای طبیعی بررسی کرد و در این بررسی کوپلینگها انعطاف‌پذیر و معده حرکت سیستم نیز با در نظر گرفتن سختی و میرایی در محل کوپلینگها بدست آمد. Xu مدل کوپلینگهای صلب را برای مدل یک سیستم آزمایشگاهی به کار گرفت. مدل اخیر توسط یک الکتروموتور رانده می‌شد و ممانها و نیروهای حاصله از عدم هم‌محوری در محل کوپلینگها در معادله حرکت وارد گردید و پس از محاسبه پاسخ فرکانسی سیستم مؤلفه‌های اول و دوم دور شفت به عنوان فرکانسهای اصلی تحریک ظاهر گردیدند.

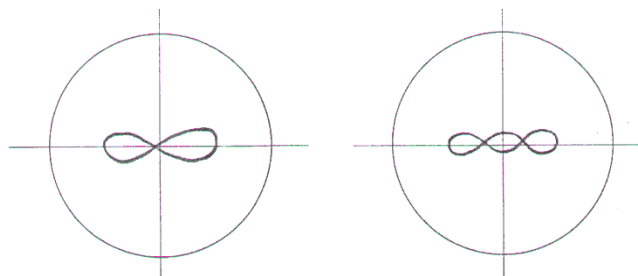
Sekhar and Parabhu با استفاده از سوپر المانها برای مدل شفت و دیسک نیروهای حاصله از عدم هم‌محوری را به صورت مؤلفه‌های اول و دوم شفت بسط داده و با محاسبه پاسخ سیستم برای هریک از مؤلفه‌ها، نشان دادند که تغییرات دور سیستم دامنه متناظر با مؤلفه دوم افزایش بیشتری خواهد یافت.

عدم هم‌محوری باعث ایجاد ارتعاش با فرکانسهای $1 \times \text{RPM}$ و $2 \times \text{RPM}$ می‌گردد ولی با پیشرفت این عیب، نرخ افزایش دامنه با فرکانس $2 \times \text{RPM}$ ، بیشتر است همچنین ارتعاشات ناچیزی هم با فرکانس مضارب بالاتر دارد. دامنه ارتعاشات ناشی از عدم هم‌محوری، در راستای محوری بزرگتر از راستای شعاعی می‌باشد. همچنین بیشتر دامنه ارتعاشات در محور و کمی هم در یاتاقان و پوسته ظاهر می‌شود.

اگر فرکانس ارتعاشات $1 \times \text{RPM}$ باشد، حرکت مقطع شفت الگویی شبیه به یک موز دارد (شکل ۷۳)، ولی در فرکانسهای بالاتر (مثلاً مضارب ۲ یا ۳) حرکت مقطع شفت الگویی شبیه "8" خواهد بود یا شبیه آنچه که در شکل ۷۴ آمده است، دارد.



شکل ۷۳: مسیر موزی شکل مرکز شفت ناشی از عدم هم‌محوری (در حالت $1 \times \text{RPM}$)



شکل ۷۴: مسیر مرکز شفت ناشی از عدم هم‌محوری (در حالت $2 \times \text{RPM}$ و $3 \times \text{RPM}$)

فرکانس $1 \times \text{RPM}$ در حالت نامیزانی نیز اتفاق می‌افتد و تفاوت این دو حالت در این است که در نامیزانی دامنه با مجذور سرعت تغییر می‌کند در حالیکه در عدم هم‌محوری این مؤلفه تقریباً ثابت است. (جز در نزدیکی سرعت بحرانی). خمیدگی شفت خیلی شبیه به عدم هم‌محوری زاویه‌ای عمل می‌کند و بنابراین مشخصات ارتعاشاتی مشابه دارند. عموماً هر وقت که دامنه ارتعاشات محوری بزرگتر از نصف ارتعاشات شعاعی ماکزیمم باشد، در آن صورت احتمال عدم هم‌محوری یا خمیدگی شفت وجود دارد. در عدم هم‌محوری تغییر فاز وجود ندارد و فاز در راستای محوری حول یاتاقان شفت تقریباً ثابت است [۱۱-۱۷].

۵) تماس و سایش

تمام تلاش‌ها در طراحی، کاربری و نگهداری، جز در مورد سایش‌های کوچک و کم اهمیت که خود تصحیح هستند، پرهیز از سایش می‌باشد. سایش آخرین مرحله قبل از شکست نهایی می‌باشد و علائم ارتعاشی آن، آخرین هشدار محسوب می‌شود. از آنجائیکه سایش نتیجه نهایی چند مشکل دیگر از قبیل نامیزانی، عیوب لوله‌کشی و پایه‌ها، شوک‌های حرارتی و غیره می‌باشد، تقریباً "هر عیبی از دستگاه در نهایت باعث سایش می‌شود.

وجود فواصل کم بین بخش‌های ثابت و متحرک در توربوماشین‌ها و بخصوص در نزدیکی لب پره‌ها، در محل آب‌بندها، سبب افزایش احتمال برخورد روتور با استاتور (بخش‌های ساکن سیستم) در اثر تحریکات خارجی نظیر زلزله و عیوب دیگر همانند نامیزانی زیاد، عدم هم‌محوری و ... می‌گردد. به علت ماهیت تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی نیروهای خارجی اعمال شده بر سیستم و همچنین جهت اعمال این نیروها بر سیستم، بررسی رفتار سیستم بطور کامل امکان‌پذیر نیست به همین جهت مدل‌های بکارگرفته شده غالباً ساده بود و رفتار کلی سیستم را بیان کرده و عمدتاً به مسئله پایداری در سیستم در نتیجه اعمال این نیروها توجه می‌گردد. تماس و سایش سبب غیرخطی شدن معادله حرکت سیستم می‌گردد این معادله توسط kirk با نیروی تحریک ناشی از کنده‌شدن پره محاسبه گردید. از طرفی نحوه اعمال نیرو، جهت اعمال نیرو و همچنین خواص نیرو و خواص روتور و استاتور نقش مهمی در ناپایداری سیستم خواهند داشت. یکی دیگر از علل پیدایش این مشکل عدم دریافت گرمای یکنواخت روتور در مرحله راه‌اندازی و در نتیجه خمیدگی شفت و تماس آن با بخش‌های ساکن است که پیش‌بینی رفتار ارتعاشی سیستم در این حالت بسیار مشکل است زیرا تماس و سایش سبب گرم‌شدن موضعی شفت و در نتیجه خمیدگی آن می‌گردد و از طرفی با گذشت زمان توزیع گرما در سیستم یکنواخت‌شده و امکان خمیدگی شفت کمتر خواهد شد.

همه موارد اخیر بر آستانه ناپایداری سیستم تأکید دارند و دسته اول مطالعات صورت گرفته در مورد مشکل تماس و سایش به این مورد توجه داشته‌اند. اما دسته دیگر تحقیقات صورت گرفته به نیروی برانگیزش سیستم پرداخته و رفتار دینامیکی سیستم در اثر این نیروها و همچنین نیروی ثانویه ایجادشده در سیستم در نتیجه تماس و برخورد را بررسی کرده‌اند پیدایش مؤلفه‌های بالای سرعت، جهش فرکانس طبیعی سیستم در اثر برخورد، اثرات پوسته و سختی و میرایی آن بر نیروی حاصله و زوایای برخورد و جدایش و حرکت مقطع شفت، اثر تحریکات خارجی نظیر زلزله و حل معادله غیرخطی و پیدایش مضاربی از فرکانس نیروی زلزله در پاسخ سیستم، بررسی رفتار سیستم در اثر میرایی ناشی از برخورد میرایی هیدرودینامیکی (ناشی از لزجت سیال)، در نظر گرفتن تعداد برخوردهای بیشتر در هر دور سیستم، بدست آوردن زمان تماس بصورت تابعی از میرایی و سختی استاتور و روتور، حاصل تحقیقات دسته دوم مطالعات بوده است.

چون عیب تماس و سایش نتیجه عیوب دیگر است بنابراین مشخصه‌های ارتعاشاتی آن نیز متأثر از منبع ایجاد آن می‌باشد. فرکانس غالب در این عیب همان فرکانس عیب اصلی خواهد بود. در توربین-ژنراتور عامل اصلی تماس و سایش نامیزانی زیاد در محور می‌باشد. بعلاوه ماهیت غیرخطی تماس و سایش، هارمونیک‌های مختلفی از سرعت دورانی شفت در پاسخ سیستم مشاهده خواهد شد. تغییرات پیوسته سختی و میرایی سبب تغییر رفتار سیستم در دور ثابت و همچنین تغییر فرکانس طبیعی سیستم می‌گردند. پاسخ سیستم در این حالت گذرا بوده و تکرار نمی‌شود و غالباً "همه مؤلفه‌های هم فرکانس، زیر فرکانس و بالا فرکانس را دربرمی‌گیرد. در یک دور ثابت ممکن است دامنه بعضی از فرکانسها افزایش و یا کاهش یابد. از دیگر مشخصه‌های این عیب پیدایش دامنه‌های بزرگ در حوالی فرکانسهای طبیعی و یا مضارب آن است.

سایش بین قسمتهای دوار و ثابت، الگوهای مختلفی را برای حرکت مقطع شفت تولید می‌کند. مواجه شدن با یک الگوی خاص معمولاً "به توسعه سایش بستگی دارد."

در یک سایش خیلی ملایم طوری که محور و قسمت ساکن در هر دور یکبار همدیگر را فقط لمس می‌کنند، الگوی حرکت مقطع شفت ممکن است شبیه دایره یا بیضی الگوی نامیزانی باشد که کمی تغییر شکل یافته است. سایش خیلی سبکی که باعث "ضربه و پرش" محور می‌شود، ممکن است باعث ارتعاشات زیرفرکانس (معمولاً نصف سرعت کاری) شود. در این حالت الگویی شبیه الگوی چرخش روغن بدست می‌آید، با این تفاوت که حلقه داخلی حول حلقه خارجی دوران نمی‌کند. وقتی که سایش شدیدتر می‌شود، الگوی حرکت مقطع شفت ممکن است حالات مختلفی به خود بگیرد، از قبیل فرکانسهای هارمونیک، فرکانسهای غیر هم‌فرکانس تصادفی، و فرکانسهای تشدید مؤلفه‌های مختلف. شکل (۱-۵) جوقتی که سایش پیوسته است، ارتعاشات می‌تواند در بسیاری از فرکانسها با دامنه‌های نوسانی اتفاق بیافتد (ارتعاشات تصادفی). وقتی سایش منقطع (ناپیوسته) است، ممکن است ارتعاشات در فرکانس $1 \times \text{RPM}$ یا $2 \times \text{RPM}$ اتفاق بیافتد. در برخورد و تماس با بخشهای ساکن، سختی و میرایی و همچنین اینرسی بخش ساکن، در معادله حرکت محور در لحظه برخورد وارد شده و سبب غیرخطی شدن معادله حرکت سیستم می‌گردد. اگر استاتور صلب فرض شود، معادله سیستم خطی باقی مانده و نیروهای مماسی و قائم ناشی از برخورد در معادله حرکت وارد می‌شوند. در این حالت فرکانس پاسخ سیستم تابع فرکانس تحریک بوده و تعداد برخورد در هر دور و همچنین شکل حرکت مسیر، سبب پیدایش مضارب صحیحی از فرکانس کارکرد سیستم در پاسخ می‌گردند. دامنه ارتعاشات در هر دو راستای محوری و شعاعی وجود دارد و همچنین بیشتر ارتعاشات در شفت و بقیه در یاتاقان و پوسته نمایان می‌شود [۱۱-۱۷].

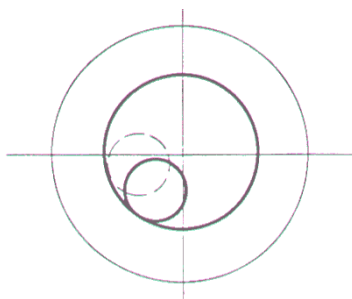
۶) چرخش روغن و ناپایداری در یاتاقانها

چرخش روغن و ناپایداری در یاتاقانهای ژورنال یکی از عیوب خودتحریک است که در اثر تغییر بعضی خواص نظیر درجه حرارت پدید می‌آید. این عیب فقط در ماشینهایی که دارای یاتاقان روغنی هستند بوجود می‌آید. سرعت نسبی شفت و یاتاقان و همچنین حرکت لنگ‌زنی شفت سبب می‌گردد که در دوره‌های بالا زمان لازم جهت توزیع فشار روغن در داخل یاتاقان فراهم نگردد و سیستم خودبخود تحریک شود. در یاتاقانهایی که پایدار نیز هستند به علت عدم نصب صحیح یاتاقان، تغییرات دما و یا بروز مشکلات دیگر ممکن است این عیب پدید آید. در سرعتهای پایین این عیب چندان مشخص نمی‌شود ولی با افزایش سرعت، زمان لازم جهت توزیع فشار روغن فراهم نمی‌گردد. ارتعاشات چرخش روغن غالباً "خیلی شدید (با دامنه زیاد) است، اما بسادگی قابل شناسایی است زیرا که فرکانس ارتعاشات آن کمی پایین‌تر از نصف سرعت کاری شفت است."

مکانیزم چرخش روغن به این صورت است که تحت عملکرد معمولی، شفت بر یک طرف یاتاقان سوار می‌شود. شفت در یک موقعیت خارج از مرکز یاتاقان کار می‌کند، و در نتیجه لایه روغن تحمل‌کننده بار را به یک طرف می‌کشد. این لایه روغن متشکل از مولکولهایی است که تعدادی از آنها که مجاور شفت هستند، میل به چسبیدن به شفت و دوران با سرعت دورانی شفت دارند و آن مولکولهایی که در مجاورت یاتاقان هستند، میل به چسبیدن به یاتاقان و ساکن ماندن دارند. در نتیجه لایه روغن بین شفت و یاتاقان تحت یک نیروی برشی قرار می‌گیرد و با یک سرعت میانگین بین سرعت شفت و

بکار گرفته شد. در این مدل تمام نیروهای حاصله در یاتاقان از جمله نیروی اینرسی نیز در معادلات حرکت وارد گردید و سختی و میرایی سیستم بصورت توابعی غیرخطی در معادله حرکت وارد شدند. با حل معادلات غیرخطی و فرض توابع غیرخطی بصورت پارابولیک نشان داده شد که در فرکانس آستانه ناپایداری تأثیر اینرسی از بین می‌رود و آستانه ناپایداری تابع فرکانس تحریک و فرکانس طبیعی سیستم است.

Rao (۱۹۸۳) پیوستگی سیال ورودی و خروجی به محفظه یاتاقان را به عنوان عاملی جهت ناپایداری معرفی کرده و با نوشتن معادلات مربوطه، فرکانس ناپایداری را نصف فرکانس دورانی شفت بدست آورد. در این حالت حرکت مقطع شفت شبیه یک دایره یا بیضی همراه با یک حلقه داخلی می‌شود (شکل ۷۵). همچنین چون فرکانس ارتعاشات دقیقاً نصف دور کاری نیست، بنابراین حلقه داخلی در جهت دوران محور حول حلقه خارجی می‌گردد [۱۱-۱۷].



شکل ۷۵: مسیر مرکز شفت در اثر چرخش روغن

۷) لقی مکانیکی

لّقی مکانیکی (Mechanical Looseness) شامل لّقی در اتصال به فونداسیون، قطعات متصل به شفت و یاتاقانها می‌باشد. تشخیص لّقی در اتصال به فونداسیون بخاطر مشاهده اختلاف فاز شدید بین سیستم و فونداسیون و کم بودن دامنه ارتعاشات، اختلاف فاز در سایر قسمت‌ها پیدایش این حالت در سرعت‌های بالاتر و کم شدن و یا از بین رفتن اثر آنها در سرعت‌های پایین‌تر، مشاهده مضارب بالاتر از فرکانس دورانی سیستم در پاسخ سیستم، غالباً "آسانتر است. پاسخ سیستم به عیب لّقی در اتصال به فونداسیون تکرار شونده و دائمی می‌باشد. لّقی قطعات دوار سبب افزایش نامیزانی سیستم می‌گردد و در دور ثابت با گذشت زمان اختلاف بین فرکانس قطعه لّقی و محور دوار ثابت شده و پاسخ سیستم در حوزه زمانی به شکل پدیده ضربان ظاهر خواهد شد. لّقی در یاتاقان و اتصالات آن سبب تغییر سختی سیستم می‌شود.

دیسک‌ها و یاتاقانهای بوشی (حلقوی) ممکن است در اثر تغییرات ناگهانی دما دچار لّقی شوند. برای تصحیح این عیب معمولاً "باید محور باز شود. مشخصه ارتعاشات ناشی از لّقی اتصالات انقباضی محور اینست که فرکانس ارتعاشات ناشی از آن فرکانس بحرانی محور یا تکیه‌گاه است.

در مورد لّقی یاتاقان چون مشخصات مشابهی با چرخش روغن دارد معمولاً "با هم اشتباه می‌شوند. برای پرهیز از این عیب، جهت آب‌بندی کردن مفصل افقی پوسته یاتاقان نباید از سیلیکن-رابر استفاده کرد. در مورد لّقی پوسته یاتاقان باید تمام پیچ‌ها را کنترل کرد.

شلی یا لقی متصل به شفت یا لقی در فونداسیون و یا اتصال فونداسیون به سیستم که سبب حرکت با قید (مقید) سیستم و قطعه شل می‌گردد از عمده مشکلات توربوماشین‌ها به شمار می‌رود. به علت تشخیص نسبتاً آسان در شلی فونداسیون و به اتصال فونداسیون به سیستم و تأثیر ثانویه قطعات لقی روی دیگر عیب‌های ماشین و آسان نبودن تهیه مدل ریاضی، توجه کمتری به شناسایی این عیب به کمک علائم ارتعاشی آن شده است. Heinz Geitner در سال (۱۹۱۳) انواع لقی در فونداسیون و یا اتصال سیستم به فونداسیون را دسته‌بندی و پیدایش مؤلفه‌های بالا سرعت در پاسخ سیستم را به عنوان مشخصه این عیب معرفی کردند. Muszynska در سال (۱۸۹۸) اثر قطعات لقی دوار را به عنوان نامیزانی روی یک سیستم دیسک و روتور در نظر گرفت و امکان پیدایش پدیده ضربان در پاسخ سیستم را به عنوان مشخصه این عیب معرفی کرد. ارتعاشات ناشی از لقی مکانیکی معمولاً "با فرکانس $2 \times \text{RPM}$ تولید می‌شود اما گاهی با مضارب بالاتر هم تولید می‌شود. دامنه ارتعاشات بیشتر در راستای شعاعی است و مقدار ناچیزی در راستای محوری است. تغییر فاز هم معمولاً نامنظم است. تغییر در میزانی و هم‌محوری عموماً بر ارتعاشات ناشی از لقی تأثیر می‌گذارد. دامنه و سایر مشخصات ارتعاشی ناشی از لقی، ناپایدار بوده و با مشاهده حرکت مقطع شفت، شکل منظمی مشاهده نخواهد شد. مشاهده اختلاف فاز زیاد بین قسمت‌های مختلف سیستم می‌تواند دلیلی بر عیب لقی باشد [۱۱-۱۷].

۲-۳-۵- مشخصات ارتعاشی عیوب متداول ماشینهای دوار (مطابق استاندارد ISO 13373-1)

در جدول ۳۰ مشخصات ارتعاشی عیوب متداول ماشینهای دوار ارائه شده است. استفاده از طیف فرکانسی اطلاعاتی مهم در زمینه سنجش مشکلات ارتعاشی در اختیار ما قرار می‌دهد. علاوه بر آن، پارامترهای دیگری نظیر تغییر زاویه فاز بعثت تغییر سرعت و یا عوامل دیگر، پایداری و تکرارپذیری دامنه ارتعاشی، جهت ارتعاشات اجزاء ماشین نسبت به روتور و توجه به مکانی از ماشین که دارای ارتعاشات غالب می‌باشد در تشخیص عیوب ارتعاشی موثر می‌باشد. همچنین در جدول ۳۱ به علل پیدایش این عیوب اشاره شده است.

جدول ۳۰: مشخصه های ارتعاشی عیوب متداول ماشینهای دوار

نوع عیب	مشخصات فرکانسی	ملاحظات (زاویه فاز، اطلاعاتی بیشتری در مورد بسیاری از عیوب به ما می‌دهد)
نامیزانی	1X	تغییرات در بالانس سبب تغییر در دامنه ارتعاشی هارمونیک اول می‌گردد. دامنه ارتعاشات زمانی که سرعت کاری بر فرکانس بحرانی روتور منطبق گردد بسیار بالا می‌رود. تغییر زاویه فاز قابل توجهی در زمان عبور از فرکانس بحرانی روتور مشاهده می‌گردد. در سرعت ثابت دامنه ارتعاشات ثابت می‌باشد.
عدم هم محوری	1X، 2X و یا هارمونیکهای بالاتر	عدم هم محوری زاویه ای و موازی بعثت هندسه کوپلینگ. این عدم هم محوری سبب تحرکات ارتعاشی بعثت خمش محور می‌گردد. در بعضی موارد، اندازه دامنه هارمونیکهای ارتعاشی در راستای شعاعی و محوری مشابه می‌باشند.

چرخش روغن در یاتاقانهای ژورنال	فرکانس ۰.۴۲ فرکانس کاری 1X	تغییرات در شرایط کاری یاتاقانها و یا هندسه آن می تواند سبب تغییرات بصورت پایدار در 1X و یا هارمونیکهای بالاتر گردد. و یا سبب ناپایداری در فرکانسهای زیر فرکانس کاری می شود (چرخش روغن وبخار). در مورد آخر ارتعاشات معمولاً پایدار نیست و با گذشت زمان افزایش می یابد. استفاده از روشهای دیگر ممکن است برای تشخیص این عیب لازم باشد.
خرابی یاتاقانهای غلتشی	فرکانسهای بالا	برای ردیابی این عیب نیاز به ترانسدیسورهای با پاسخی فرکانس بالا می باشد. ارتعاشات در این حالت در ناحیه یاتاقان آسیب دیده متمرکز می شود. در این حالت ارتعاشات معمولاً پایدار نیست و با گذشت زمان افزایش می یابد. استفاده از روشهای دیگر ممکن است برای تشخیص این عیب لازم باشد.
خمیدگی روتور	2X, 1X و یا هارمونیکهای بالاتر	تغییر 1X بسیار معمول است. اگر خمیدگی روتور در نزدیکی کوپلینگ باشد، ارتعاشات 2X در راستای محوری بطور متناوب مشاهده می گردد. در یک سرعت ثابت مقدار ارتعاشات روتور ثابت است.
ترک روتور	2X, 1X و یا هارمونیکهای بالاتر	رشد در بردار 2X نشانه ایی از بحرانی شدن ترک عرضی می باشد. تغییر در بردار 1X و یا هارمونیکهای بالاتر نیز ممکن است اتفاق بیافتد.
لقی اجزاء روتور	1X و هارمونیکهای سرعت دورانی ماشین	مقادیر ارتعاشات ممکن است مابین سیکلهای استارت و خاموش کردن ماشین متغیر و ناپایدار باشد. در بعضی از موارد فرکانسهای زیر فرکانس کاری نیز مشاهده می گردد.
عیوب چرخ دنده	فرکانسهای بالا	برای ردیابی نیاز به ترانسدیسورهای با پاسخ های فرکانسی بالا دارد. در حالت نقص در یک دندانه: 1X و ضرایب آن. برای سایدگی دندانه: فرکانس مش چرخ دنده همراه با sidebands و ضرایب آن.
تشدید	در فرکانسهای تحریک مانند زمانیکه سرعت روتور با فرکانس طبیعی روتور و پایه برابر می-شود	نامیزانی روتور معمولترین تحریکی می باشد که می تواند سبب رزونانس اجزاء غیر دوار ماشین شود. در ماشینهای الکتریکی، یک تحریک عمده در فرکانس 2X می باشد که ناشی از تحریکات نیروی الکترومغناطیس است.
سایش	در اکثر موارد در 1X، و همچنین ضرایبی از 1X، فرکانسهای طبیعی و	سایش کم در سرعتهای پایین اتفاق می افتد ممکن است بخوبی خود را نشان دهد. ولی سایشی که در سرعتهای بالا اتفاق می افتد ممکن است سبب تغییر ناگهانی در دامنه ارتعاشات ماشین شود که خاموش کردن ماشین را الزام می نماید. در بعضی از مواقع سایش بعلت بارگذاری سریع ماشین و یا در اثر تغییر ناگهانی در شرایط حرارتی ماشین اتفاق می افتد. در بقیه موارد سایش ممکن است بخاطر در نظر گرفتن لقی های کوچک ما بین قطعات دوار و ثابت اتفاق بیافتد

جدول ۳۱: عیوب متداول ماشینهای دوار و علل پیدایش آنها

علت ارتعاشات	علل ایجاد عیب	توضیحات (پدیده‌های ثانویه، راه رفع عیب)
--------------	---------------	---

نامیزانی	تولرانس در ساخت، تغییرات در مواد بکار رفته، ایجاد شیار روی شفت، عدم وجود تقارن در طراحی، کاربرد نادرست ماشین، تغییر طول قطعات، تغییر درجه حرارت، خمیدگی شفت، سوراخ‌های بوجود آمده هنگام ریخته‌گری، پره‌های ضخیم‌تر، سوراخ خارج از مرکز، ماشینکاری خارج از مرکز پولی‌ها و ...	برای تصحیح نامیزانی دو روش وجود دارد: ۱- میزان کردن درجا ۲- میزان کردن به کمک ماشین میزان کننده معمولا "محورها با سرعت بالا را در سرعت کامل درجا میزان می‌کنند. هنگام تولید موتورها و پمپ‌ها و توربین‌ها و ... محورها را قبل از سوار کردن روی ماشین یکمک ماشین میزان کننده میزان می‌کنند. این عیب در نهایت باعث سایش آببندها، شکست یاتاقانها یا تشدید می‌شود.
عدم هم‌محوری	کرنش بیش از اندازه شفت و یا مونتاژ و فونداسیون نادرست، گرمای موضعی.	این عیب باعث تولید نیروهای اصطکاک یا خیز در کوپلینگ‌ها می‌شود. یا ممکن است باعث تشدید های هارمونیک شود. همچنین در نهایت باعث شکستگی‌هایی در آببندها، کوپلینگ‌ها، یاتاقانها، یا دو انتهای شفت می‌شود. این مشکل را با استفاده از پیک‌آپ‌های غیر تماسی و یا اینکه با استفاده از تکنیک آنالیز ارتعاشات تصحیح می‌کنند.
خمیدگی محور	عدم گرمایش یکنواخت محور، نیروی وزن زیاد، نامیزانی زیاد، نصب انقباضی	این عیب علاوه بر ایجاد ارتعاش غیر مجاز در سیستم، باعث تماس شفت با آبند و یا نوک پره با پوسته می‌شود. همچنین باعث آسیب دیدگی کوپلینگ‌ها و یاتاقانها نیز می‌شود. راه حل موقت آن کاربرد روش "نقطه گرم" است.
سایش	معمولا "هر عیبی از دستگاه در نهایت باعث تماس و سایش می‌شود. اما غالبا" نامیزانی زیاد عامل اصلی این مشکل است.	سایش آخرین مرحله مشکل قبل از شکست نهایی است. سایش‌های کوچک معمولا "توسط خودشان تصحیح می‌شوند ولی در مورد سایش‌های مهم باید علت اصلی را پیدا کرد و آنرا تصحیح کرد.
لقی مکانیکی	شل بودن پیچ و مهره‌ها و اندازه نبودن اتصالات انقباضی و همچنین تغییرات ناگهانی دما نیز می‌تواند باعث لقی شود. (خصوصا" در دیسک‌ها و یاتاقانهای بوشی)	لقی قطعات دوار باعث افزایش نامیزانی می‌شود. برای تصحیح لقی باید سفت بودن تمام پیچ‌ها را کنترل کرد یا اگر مشکل طراحی وجود داشته باشد، باید طراحی قطعه را تصحیح کرد.
ترک محور	تغییرات ناگهانی دما، بار و یا تنش‌های بیش از حد در محور و یا بارهای تناوبی (در اثر خستگی)	ترک باعث تغییر سختی محور شده و در نهایت باعث از بین رفتن محور می‌شود و ممکن است به قسمتهای دیگر نیز آسیب برساند. برای اصلاح باید قسمت ترک خورده (از قبیل شفت، پره‌ها، دیسک‌ها و...) را عوض کرد.
چرخش روغن	این عیب بوسیله خود سیستم روغنکاری در یاتاقانها و معمولا" در سرعتهای بالا تحریک می‌شود.	این عیب باعث ارتعاشات با دامنه زیاد در محور می‌شود. برای اصلاح می‌توان فضای لقی بین یاتاقان و شفت را کاهش داد یا از یاتاقانهای کفشی استفاده کرد.
لقی یاتاقانها	شل بودن قطعات داخلی و یا اتصالات یاتاقان	لقی در یاتاقانها و اتصالات آن سبب تغییر سختی سیستم می‌شود. این عیب معمولا" با چرخش روغن اشتباه می‌شود. برای تصحیح باید یاتاقان را باز کرد و از محکم بودن اتصالات آن اطمینان حاصل کرد.

۴-۲- تعیین روش‌های بهینه عیب‌یابی با آنالیز ارتعاشات و پیشنهاد پروژه های آتی

در فصل سوم بیان شد که با استفاده از روش‌های عددی و هوش مصنوعی می‌توان عملیات عیب‌یابی را بصورت اتوماتیک انجام داد. و همچنین مشخص شد که استفاده از شبکه‌های عصبی در کنار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) در عیب‌یابی بهینه‌ترین روش می‌باشد.

پیشنهاد پروژه های آتی در زمینه عیب‌یابی ماشین‌های دوار با آنالیز ارتعاشات:

- بررسی روش زمان بندی نوک پره در عیب‌یابی توربین‌ها و کمپرسورها و نحوه پیاده سازی آن
- بررسی روش تبدیل موجک و کاربردهای آن در عیب‌یابی ماشین‌های دوار با آنالیز ارتعاشات
- کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در عیب‌یابی ماشین‌های دوار با آنالیز ارتعاشات

۲-۵- نتیجه گیری

در این گزارش موارد زیر بررسی گردید:

- انواع سنسورهای ارتعاشی رایج در صنعت (شامل: شتاب سنج، سرعت سنج و جابجایی سنج) و همچنین مشخصات فنی برخی از آنها
- قابلیت‌های سخت افزار های پایش وضعیت ارتعاشی در سه گروه زیر:
 - دستگاه های آنالیز ارتعاشات پرتابل
 - کارتهای داده برداری ارتعاشی
 - سخت افزارهای پایش وضعیت ارتعاشی
- قابلیت‌های نرم افزار های پایش وضعیت ارتعاشی
- انواع روشهای متداول آنالیز ارتعاشات از قبیل شکل موج زمانی، طیف فرکانسی، میانگین گیری، نمودار ترند و پارامترهای آماری
- انواع روشهای جدید آنالیز ارتعاشات از قبیل نمودارهای بود و قطبی، نمودار مدار شفت، نمودار آبشاری، کپستروم، انولوپ، تحلیل مرتبه، نمودار خط مرکز شفت، تبدیل موجک و روش زمان بندی نوک پره
- کاربرد روشهای جدید در عیب یابی با آنالیز ارتعاشات در ماشینهای دوار نیروگاهی

۲-۶- مراجع بخش دوم

۱. گزارش «اندازه‌گیری و پردازش داده‌های ارتعاشی»، PMEPN03/T6، پژوهشگاه نیرو، خرداد ۱۳۸۰
2. Victor Wowk, "Machinery Vibration: Measurement and Analysis", McGraw-Hill, 1991
3. P.A.Lynn and W.Fuerst, "Introductory Digital Signal Processing with computer applications", John Wiley&Sons Pub.,1989
4. N.Ahmed and T.Natarajan, "Discrete-Time Signals and Systems", Reston Pub.,1983
5. R.D.Strum and D.E.Kirk, "First principles of Discrete systems and Digital Signal Processing", Addison-Wesley Pub.,1988
6. R.A.Roberts and C.T.Mullis, "Digital Signal Processing", Addison-wesley Pub.,1987
7. J.R.Johnson, "Introduction to Digital Signal Processing", Prentice-Hall Pub., 1989
8. Internet pages (such as www.Wikipedia.com)
9. S.Singh, M.Vishwakarma, "A review of vibration analysis techniques for rotating machines", IJERT, ISSN:2278-0181, Vol 4, Issue 03, March 2015
10. Sujesh Kummar, "Vibration based fault diagnosis techniques for rotating mechanical components: review paper", IconMMEE 2018, Iop Publishing
11. Robert C.Eisenmann, "Machinery Malfunction Diagnosis and Correction", Prentice-Hall,1998
12. Lindley R.Higgins, "Maintenance Engineering Handbook", McGraw-Hill, 1998
13. J. S. Mitchell, "Introduction to Machinery Analysis and Monitoring", Second Edition, Wiley, 1993.
14. J. S. Rao, "Vibratory Condition Monitoring of Machines", CRC Press, 2000.
۱۵. گزارش «بررسی و تعیین عیوب مکانیکی متداول ماشینهای دوار»، PMEPN06/T1، پژوهشگاه نیرو، آذر ۱۳۸۱
۱۶. گزارش «بررسی و انتخاب یک نیروگاه نمونه جهت پیاده سازی سیستم عیب یابی ماشینهای دوار با استفاده از روشهای آنالیز ارتعاشات و جریان موتور»، PMEPN08/T2، پژوهشگاه نیرو، تیرماه ۱۳۸۶
۱۷. گزارش «تاریخچه موضوعی پروژه و پیاده سازی و تست سیستم در نیروگاه»، PMEPN08/T9، پژوهشگاه نیرو، شهریورماه ۱۳۸۶