INSO
13546-2
1st. Edition

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۱۳۵۴۶-۲
چاپ اول

پایش وضعیت و عیب یابی‌های ماشین‌ها – پایش وضعیت ارتعاش- قسمت۲: پردازش، تحلیل و ارائه‌ی داده‌های ارتعاش

Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring - Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data

ICS:17.160

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک مادهٔ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است .

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان ، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود وکوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود .پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند درکمیتهٔ ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود .بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[1] ،کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور ، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود .

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدورگواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization
2 - International Electrotechnical Commission
3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« پایش وضعیت و عیب یابی‌های ماشین ها- پایش وضعیت ارتعاش- قسمت ۲: پردازش، تحلیل و ارائه‌ی داده‌های ارتعاش »

رئیس:	**سمت و/ یا نمایندگی**
ذره، مهدی (لیسانس ارشد مهندسی برق)	کارشناس استاندارد
دبیر:	
قاضوی، مصطفی (لیسانس مهندسی مکانیک)	مدیریت تدوین استانداردهای مبنا مرکز استاندارد دفاعی
اعضاء: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
اسمی خان، علی (لیسانس مهندسی مکانیک)	کارشناس
استاد حسین، روح ا.. (لیسانس مهندسی مکانیک)	کارشناس مدیران خودرو
افراز، شهاب (لیسانس مهندسی کامپیوتر)	مدیر تدوین شرکت مهندسی سیستم‌های مدیریت قابلیت اعتماد توازن
پیاهور، محمد (لیسانس مهندسی مکانیک)	کارشناس شرکت صقا
حکیمی زاده، صدف (فوق‌لیسانس مترجمی زبان)	کارشناس شرکت مهندسی سیستم‌های مدیریت قابلیت اعتماد توازن
صفی صمغ آبادی، محمد (لیسانس الکترونیک)	کارشناس شرکت مهندسی سیستم‌های مدیریت قابلیت اعتماد توازن

غلامی راد، شیوا (فوق‌لیسانس شیمی)	مدیر تدوین مرکز استاندارد دفاعی
نصرتی، ایمان (لیسانس مهندسی مکانیک)	مدیر فنی پایکار بنیان پنل

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
آشنایی با مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران	ب
کمیسیون فنی تدوین استاندارد	ج
پیش گفتار	ز
۱ هدف و دامنه‌ی کاربرد	۱
۲ مراجع الزامی	۱
۳ آماده سازی سیگنال	۲
۳-۱ کلیات	۲
۳-۲ سیستم‌های آنالوگ و دیجیتال	۴
۳-۲-۱ کلیات	۴
۳-۲-۲ فنون دیجیتالی کردن	۵
۳-۳ شکل دهنده‌های سیگنال	۵
۳-۳-۱ کلیات	۵
۳-۳-۲ انتگرال‌گیری و دیفرانسیل گیری	۵
۳-۳-۳ مقدار ارتعاش مجذور میانگین مربعات	۶
۳-۳-۴ گستره‌ی پویا	۷
۳-۳-۵ کالیبراسیون	۸
۳-۴ فیلتر کردن	۸
۴ تحلیل و پردازش داده ها	۱۰
۴-۱ کلیات	۱۰
۴-۲ تحلیل حوزه‌ی زمان	۱۰
۴-۲-۱ اشکال زمانی موج	۱۰
۴-۲-۲ تداخل	۱۲
۴-۲-۳ مدولاسیون	۱۴
۴-۲-۵ پایش پوش طیف بسامدی با باند باریک	۱۵
۴-۲-۶ مدار حرکت شفت	۱۵
۴-۲-۷ موقعیت شفت d.c	۱۷
۴-۲-۸ ارتعاش گذرا	۱۷
۴-۲-۹ ضربه	۱۸
۴-۲-۱۰ میرا شدن	۱۹
۴-۲-۱۱ میانگین گیری حوزه‌ی زمان	۲۱

ادامه فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
۴-۳ تحلیل حوزه‌ی بسامد	۲۴
۴-۳-۱ کلیات	۲۴
۴-۳-۲ تبدیل فوریه	۲۴
۴-۳-۳ نشت و ایجاد پنجره	۲۵
۴-۳-۴ تفکیک‌پذیری بسامد	۲۶
۴-۳-۵ طول ثبت (رکورد)	۲۶
۴-۳-۶ مدولاسیون دامنه (باندهای جانبی)	۲۷
۴-۳-۷ الایزینگ	۲۹
۴-۳-۸ نمونه برداری همزمان	۳۰
۴-۳-۹ میانگین گیری از طیف	۳۱
۴-۳-۱۰ نمودارهای لگاریتمی (با مراجع dB)	۳۲
۴-۳-۱۱ تحلیل بزرگنمایی	۳۳
۴-۳-۱۲ دیفرانسیل و انتگرال گیری	۳۴
۴-۴ نمایش نتایج در حین تغییرات عملیاتی	۳۵
۴-۴-۱ دامنه و فاز (نمودار بود)	۳۵
۴-۴-۲ نمودار قطبی (نمودار نایکوئیست)	۳۶
۴-۴-۳ نمودار کاسکاد (آبشار)	۳۷
۴-۴-۴ نمودار کمپبل	۴۰
۴-۵ تحلیل زمان واقعی و پهنای باند زمان عمل	۴۱
۴-۶ ردگیری مرتبه (آنالوگ و دیجیتال)	۴۲
۴-۷ تحلیل اکتاو و اکتاو کسری	۴۳
۴-۸ تحلیل سِپستروم	۴۳
کتابنامه	۴۶

پیش گفتار

استاندارد « پایش وضعیت و عیب یابی‌های ماشین‌ها – پایش وضعیت ارتعاش- قسمت۲: پردازش، تحلیل و ارائه‌ی داده‌های ارتعاش » که پیش نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط «شرکت مهندسی سیستم‌های قابلیت اعتماد توازن» تهیه و تدوین شده و در یکصد و شصت و هشتمین اجلاس کمیته‌ی ملی استاندارد اندازه‌شناسی و اوزان و مقیاس‌ها مورخ ۱۳۹۰/۰۹/۲۲ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینهٔ صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیهٔ این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO 13373-2:2005, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data

پایش وضعیت و عیب یابی‌های ماشین‌ها – پایش وضعیت ارتعاش- قسمت۲: پردازش، تحلیل و ارائه‌ی داده‌های ارتعاش

۱ هدف و دامنه‌ی کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روش‌های اجرایی برای پردازش و ارائه‌ی داده‌های ارتعاش و تحلیل نشانه‌های ارتعاش به منظور پایش وضعیت ارتعاش ماشین‌های دوار و اجرای عیب یابی در صورت مقتضی است. فنون مختلفی برای کاربردهای مختلف تشریح شده اند. فنون تقویت سیگنال و روش‌های تحلیلی که برای بررسی پدیده‌های پویای ماشین خاص به کار می‌روند نیز بیان شده اند. بسیاری از این فنون را می‌توان برای انواع دیگر ماشین ها، مانند ماشین‌های دارای حرکت متناوب، به کار برد. قالب‌های نمونه برای پارامترهایی که بطور معمول برای مقاصد ارزشیابی و عیب یابی ترسیم شده اند نیز ارائه می‌شوند.

این استاندارد اساساً به دو رویکرد مبنا برای تحلیل سیگنال‌های ارتعاش تقسیم شده است: حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی بسامد. بعضی از رویکردها برای دقیق‌تر نمودن نتایج عیب یابی با تغییر شرایط بهره برداری، نیز بیان شده اند.

این استاندارد، فقط شامل رایج ترین فنون استفاده شده در پایش وضعیت ارتعاش، تحلیل و عیب یابی ماشین‌ها می‌شود. فنون بسیار دیگری وجود دارند که برای تعیین رفتار ماشین‌هایی که در تحلیل عمیق‌تر ارتعاش و بررسی عیب یابی فراتر از پیگیری [1] عادی در پایش وضعیت ماشین‌ها کاربرد دارند، به کار می‌روند. تشریح مفصل این فنون فراتر از حوزه‌ی کاربرد این استاندارد می‌باشد اما برخی از این فنون دارای مقاصد خاص پیشرفته‌تر در بند ۵ به صورت اطلاعات تکمیلی فهرست شده اند.

برای ماشین‌هایی با انواع و اندازه‌های خاص، استانداردهای ISO7919 و ISO10816 ، رهنمودهایی برای کاربرد بزرگی‌های ارتعاش پهن باند به منظور پایش وضعیت را ارائه می‌نمایند و مدارک دیگری مثل VDI3839 و VDI3841 اطلاعات تکمیلی درباره مشکلات خاص ماشین‌ها که می‌توانند در زمان انجام عیب یابی‌های ارتعاش هدایت کننده آشکار شوند را ارائه می‌کنند.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزیی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود.

در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آنها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها مورد نظر است.

استفاده از مرجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

ISO 1683, Acoustics — Preferred reference quantities for acoustic levels

---

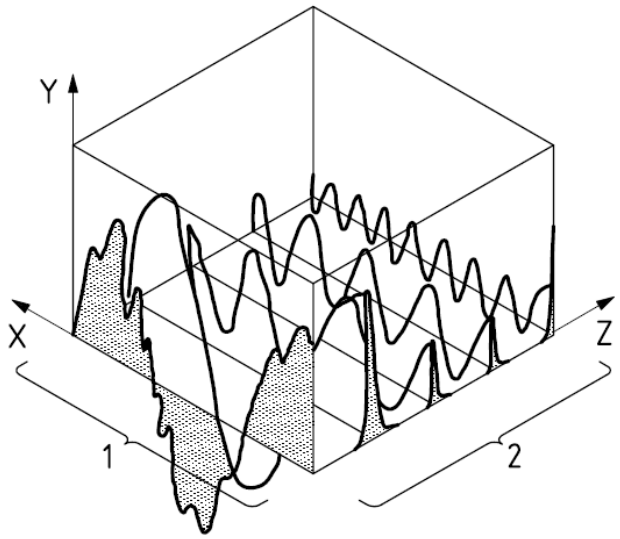
1- Follow-on

۳ آماده سازی سیگنال

۳-۱ کلیات

اصولاً تمام اندازه گیری‌های ارتعاش با استفاده از یک ترانسدیوسر به دست می‌آید که متناسب با مقدار لحظه‌ای شتاب ارتعاشی، سرعت یا جابجایی، یک سیگنال الکتریکی آنالوگ را تولید می‌نمایند. این سیگنال را می‌توان بر روی یک تحلیل‌گر پویای سیستم ثبت نمود، برای تحلیل‌های بعدی مورد بررسی قرارداد و یا مثلاً بر روی یک اسیلوسکوپ نمایش داد. برای به دست آوردن دامنه‌های واقعی ارتعاش، ولتاژ خروجی در یک فاکتور کالیبراسیون ضرب می‌شود که این فاکتور برای حساسیت ترانسدیوسر و بهره‌های تقویت کننده و ثبت‌کننده در نظر گرفته می‌شود. بیشتر تحلیل‌های ارتعاش در حوزه بسامد انجام می‌شوند، اما ابزارهای مفیدی نیز وجود دارند که تاریخچه زمانی حوزه ارتعاش را در نظر می‌گیرند.

شکل ۱ رابطه‌ی بین سیگنال ارتعاش در حوزه‌ی زمان و بسامد را نشان می‌دهد. از این تصویر می‌توان خاطر نشان کرد که چهار سیگنال همپوشانی کننده وجود دارند که به صورتی که در صفحه تحلیل‌گر می‌توان مشاهده نمود ترکیب می‌شوند تا یک نمودار مرکب تشکیل دهند (نمودار سیاه رنگ). تحلیل‌گر از طریق فرآیند فوریه، این سیگنال مرکب را به چهار مولفه بسامد مجزای نشان داده شده تبدیل می‌کند.



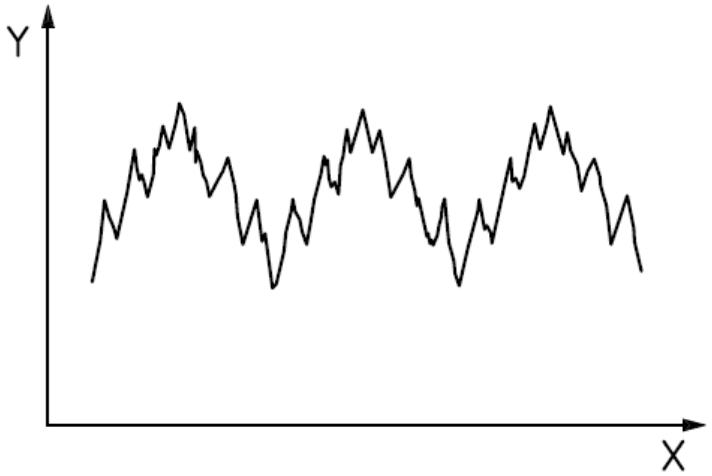
راهنما:

X	زمان	۱	اوسیلوگرام[1] حوزه‌ی زمانی
Y	دامنه/بزرگی	۲	طیف حوزه‌ی بسامد
Z	بسامد		

شکل ۱- حوزه‌های بسامد و زمان

1- Oscillogram

شکل ۲ مثالی ساده‌تر از یک نمودار مرکب است که از یک ترانسدیوسر تک گرفته شده و بر روی صفحه تحلیل‌گر دیده می‌شود. در این مورد فقط سه سیگنال همپوشانی کننده به صورتی که در شکل ۳ نشان داده شده است وجود دارند و بسامدهای مجزا در شکل ۴ نشان داده شده اند.

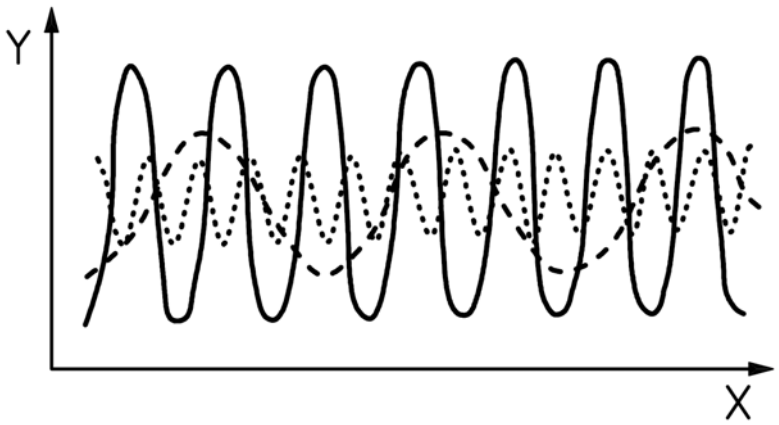


راهنما:

X زمان

Y دامنه

شکل ۲- سیگنال ترکیب طیف پایه

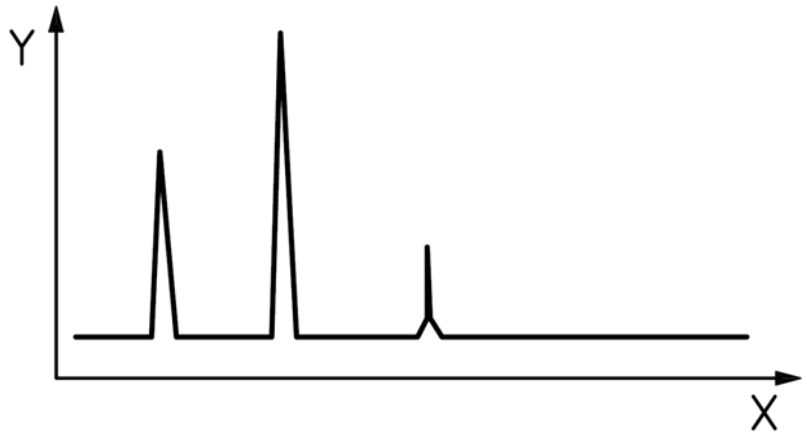


راهنما:

X زمان

Y دامنه

شکل ۳- سیگنال‌های همپوشانی کننده



راهنما:

X بسامد

Y دامنه

شکل ۴- بسامدهای گسسته

در بسیاری از بررسی ها، ارتباط بین ارتعاش از نقاط مختلف سازه یا جهات مختلف ارتعاش، به اندازه خود داده‌های ارتعاشی مختلف مهم هستند. به این دلیل، تحلیل‌گرهای چندکاناله سیگنال با خصایص تحلیل دو کاناله داخلی، دردسترس هستند. در هنگام بررسی سیگنال‌ها با این فن، روابط دامنه و فاز برای سیگنال‌های ارتعاش مهم هستند.

۳-۲ سیستم‌های آنالوگ و دیجیتال

۳-۲-۱ کلیات

سیگنال آنالوگ خارج شده از یک ترانسدیوسر را می‌توان به وسیله سیستم‌های آنالوگ و دیجیتال پردازش نمود. از قدیم، سیستم‌های آنالوگی به کار گرفته شده اند که شامل فیلترها، تقویت کننده ها، ثبت کننده ها، یکپارچه کننده‌ها و دیگر اجزایی هستند که سیگنال را تغییر می‌دهند، اما ویژگی‌های آنالوگ سیگنال را حفظ می‌کنند. اخیراً، مزایای دیجیتالی نمودن سیگنال ها، بیشتر و بیشتر مشهود شده است. یک مبدل آنالوگ-به-دیجیتال (ADC[1])، به طور مکرر، از سیگنال آنالوگ نمونه برداری می‌کند و آن را به سری مقادیر عددی تبدیل می‌نماید. بنابراین برای فیلتر نمودن، یکپارچه سازی، طیف یابی (به ۴-۳-۲ مراجعه کنید) ایجاد هیستوگرام‌ها یا هر فعالیت مورد نیاز دیگر، می‌توان از روشهای معمول ریاضی در کامپیوترها استفاده نمود. البته، سیگنال دیجیتالی شده را می‌توان به صورت تابعی از زمان رسم نمود. سیگنال آنالوگ همانند سیگنال دیجیتالی شده در خصوص فرض منطقی برای انتخاب مناسب بسامد نمونه برداری، دارای اطلاعات مشابهی است.

1- Analog-to-Digital-Converter

در هنگام استفاده از یک روش آنالوگ یا دیجیتال، دانستن حساسیت سیگنال تحت اندازه گیری، دارای اهمیت است. حساسیت، نسبت مقدار ولتاژ خروجی واقعی سیگنال به بزرگی واقعی پارامتر تحت اندازه گیری است. برای دستیابی به تعریف مناسب سیگنال، سیگنال مورد نظر باید به طور معناداری بزرگتر از سطح نوفه‌های محیط اطراف باشد، اما نه به اندازه‌ای بزرگ که سیگنال دچار اعوجاج شود (مثلاً به گونه‌ای که قله-های سیگنال بریده [1]شوند).

۳-۲-۲ فنون دیجیتالی کردن

مهمترین پارامترها در فرایند دیجیتالی نمودن، نرخ نمونه برداری و تفکیک‌پذیری می‌باشند. مهم است که اطمینان حاصل شود که هیچ بسامدی بالاتر از نصف نرخ نمونه برداری وجود نداشته باشد. در غیر اینصورت، تاریخچه‌های زمانی دچار اعوجاج می‌شوند یا تبدیل فوریه سریع (FFT[2]) مولفه‌های الایزینگ[3] را نشان می-دهند که واقعاً وجود ندارند (برای اطلاعات بیشتر در مورد الایزینگ، به ۴-۳-۷ مراجعه کنید). نرخ نمونه برداری به وسیله نوع تحلیلی که قرار است انجام شود و محتوای بسامدی پیش بینی شده‌ی سیگنال تعیین می‌شود. اگر نموداری از ارتعاش در برابر زمان مطلوب باشد، توصیه می‌شود که نرخ نمونه برداری، حدوداً ۱۰ برابر بزرگترین بسامد مورد نظر در سیگنال باشد. هرچند، اگر یک طیف بسامدی مد نظر باشد، برای محاسبه FFT، لازم است تا نرخ نمونه برداری، بزرگتر از ۲ برابر بسامد مورد نظر در اندازه گیری باشد. از فیلترهای ضدالایزینگ برای حذف هر گونه نوفه با بسامد-بالا یا دیگر مولفه‌های بسامد-بالا که بالاتر از نصف نرخ نمونه برداری قرار دارند، استفاده می‌شود. در هنگام دیجیتالی نمودن، تعداد بیت‌های مورد استفاده که هر نمونه را نشان می‌دهند باید به اندازه کافی باشند که بتوانند درستی الزام شده را تامین نمایند.

۳-۳ شکل دهنده‌های سیگنال

۳-۳-۱ کلیات

سیگنال‌های ارتعاش خروجی ترانسدیوسرها، معمولاً قبل از آنکه ثبت شوند، به مقداری آماده سازی نیاز دارند تا سطح ولتاژ درست برای ثبت شدن به دست آید یا اینکه نوفه‌ها یا دیگر مولفه‌های ناخواسته حذف شود. تجهیزات آماده سازی سیگنال شامل منابع تأمین توان ترانسدیوسر، پیش تقویت کننده ها، تقویت کننده ها، یکپارچه سازها و دیگر انواع فیلترها هستند. فیلتر نمودن بعداً در بند ۳-۴ مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۳-۲ انتگرال‌گیری و دیفرانسیل گیری

ارتعاشات ثبت شده می‌توانند بر حسب جابجایی، سرعت یا شتاب باشند. معمولاً، یکی از پارامترها به خاطر گستره بسامدی مورد نظر (در هنگام استفاده از جابجایی، سیگنال‌های بسامد-پایین مشهودتر هستند و در صورت استفاده از شتاب، سیگنال‌های با بسامد-بالا بیشتر مشهود هستند) یا به خاطر معیار مورد کاربرد، ترجیح داده می‌شود. با انتگرال‌گیری یا دیفرانسیل گیری، یک سیگنال ارتعاش می‌تواند به مقداری متفاوت

1- Clipped
2- Fast Fourier transforms
3- Aliasing

تبدیل شود. انتگرال گیری از شتاب نسبت به زمان، سرعت را به دست می‌دهد و انتگرال‌گیری از سرعت جابجایی را می‌دهد. انتگرال‌گیری دوگانه از شتاب، مستقیماً جابجایی را ایجاد می‌کند. دیفرانسیل گیری، عمل عکس انتگرال‌گیری را انجام می‌دهد.

از نظر ریاضی، برای حرکت هارمونیک، روابط زیر به کار می‌روند:

جابجایی : $x = \int v dt = \int\int (a dt) dt = -1/\omega^2 a$ (۱)

سرعت : $v = \frac{dx}{dt} = \int a dt$ (۲)

شتاب : $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ (۳)

که در آن ω بسامد زاویه‌ای ارتعاش هامونیک است $\omega = 2\pi f$.

یادآوری – به زیربند ۴-۳-۱۲ نیز مراجعه نمایید.

ترانسدیوسر ارتعاشی رایج، یک شتاب سنج می‌باشد، بنابراین انتگرال گیری از دیفرانسیل گیری رایج‌تر است. این امر باعث رضایت است زیرا دیفرانسیل گیری از یک سیگنال مشکل‌تر از انتگرال گیری از آن می‌باشد، اما باید دقت ویژه‌ای در هنگام انتگرال گیری از سیگنال‌ها در بسامدهای پایین به عمل آید. یک فیلتر بالا گذر باید به کار گرفته شود تا قبل از انتگرال گیری، بسامدهایی را که پایین‌تر از آن بسامدهای مورد نظر هستند، حذف شود.

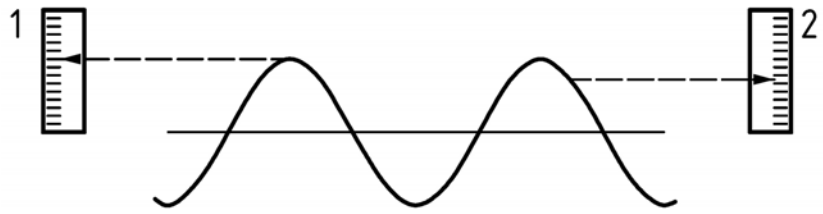
۳-۳-۳ مقدار ارتعاش مجذور میانگین مربعات[1]

در استانداردهای مربوط به سنجش ارتعاشات، اغلب از مقدار مجذور میانگین مربعات (r.m.s) سیگنال ارتعاش استفاده می‌شود. اغلب معیارهایی در گستره بسامدی مشخصی، برای مقادیر ارتعاش r.m.s اعمال می‌شوند. این کمیت، بیشترین استفاده را در مدت زمان ارائه شده دارد. هنگامی که مولفه‌های بسامدی زیادی وجود داشته باشد یا مدولاسیون و موارد دیگر وجود دارند، دیگر مقیاس‌های سیگنال ارتعاشی می‌توانند گمراه کننده باشند. به هر حال مقدار r.m.s کمیتی ریاضی است که می‌توان آن را برای هر سیگنالی به دست آورد و اکثر وسایل به گونه‌ای طراحی شده اند که بتوانند این کمیت را به دست دهند (به شکل ۵ مراجعه کنید). مقدار r.m.s را می‌توان به شکلی دیگر با استفاده از یک تحلیل‌گر طیف و به وسیله انتگرال‌گیری از طیف بین بسامدهای بالایی و پایینی خواسته شده به دست آورد.

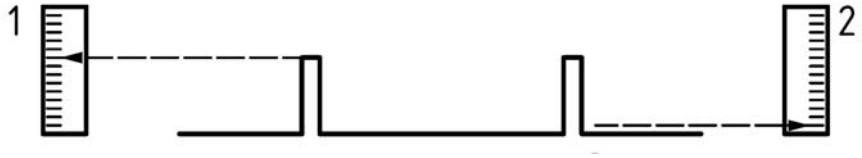
اگر مقدار خوانده شده در یک دوره زمانی کوتاه، به صورت قابل ملاحظه یا تغییر کند، یک سیگنال ارتعاشی را می‌توان در صورت نیاز فیلتر نمود و روی اندازه گیر r.m.s نشان داد. هرچند، اگر خروجی نمایش داده

1- Root-mean-square

شده به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر نماید، در طول یک دوره زمانی نامشخص، باید یک میانگین را به دست آورد. این کار ممکن است به وسیله یک دستگاه که ثابت زمانی طولانی تری دارد انجام شود.



الف) سیگنال سینوسی که در آن مقدار r.m.s، ۰/۷۰۷ برابر مقدار قله است



ب) سیگنال غیر سینوسی

راهنما:

۱ مقدار قله

۲ مقدار r.m.s

شکل۵- مقدار R.m.s

۳-۳-۴ گستره‌ی پویا

گستره‌ی پویا، نسبتی بین کوچک ترین و بزرگ ترین سیگنال‌های بزرگی است که تحلیل‌گر خاص می‌تواند بطور همزمان جمع آوری نماید. بزرگی سیگنال ها، متناسب با ولتاژ خروجی ترانسدیوسرها، معمولاً بر حسب میلی ولت هستند.

گستره‌ی پویای سیستم‌های آنالوگ معمولاَ به خاطر نوفه الکتریکی محدود می‌شود. این موضوع معمولاً فقط مربوط به خود ترانسدیوسر نمی‌شود، بلکه فیلترها، تقویت کننده ها، ثبت کننده‌ها و غیره را نیز تحت تاثیر قرار داده و همه آنها به سطح نوفه می‌افزایند به گونه‌ای که نتیجه می‌تواند به صورت تعجب آوری بالا باشد.

در سیستم‌های دیجیتال، گستره پویا به درستی نمونه برداری بستگی دارد. نرخ نمونه برداری باید برای بسامدهای مد نظر کافی باشد. رابطه بین تعداد بیت ها، N، که برای نمونه برداری از یک سیگنال آنالوگ و گستره پویا، D به کار می‌رود (اگر یک بیت برای علامت به کار گرفته شود) به صورت زیر است:

$$6(N-1) = DdB \quad (۴)$$

بنابراین، یک تحلیل‌گر سیگنال پویا (DSA[1]) با تفکیک‌پذیری ۱۶ بیت، گستره‌ی پویای ۹۰dB را خواهد داشت اما هر گونه عدم درستی، گستره‌ی پویا را کاهش می‌دهد.

۳-۳-۵ کالیبراسیون

کالیبراسیون هر یک از ترانسدیوسرها، در مستندات ذکر شده است (برای مثال ISO16063-21) و معمولاً قبل از استفاده در محل واقعی خودشان، در آزمایشگاه کالیبره می‌شوند. به هر حال توصیه می‌شود که برای هر نصب در میدان، یک وارسی برای کالیبراسیون انجام شود. وارسی میدانی برای کالیبراسیون، معمولاً شامل کالیبراسیون ترانسدیوسر نمی‌شود، بلکه شامل مابقی سیستم‌های اندازه گیری/ ثبت، مثل تقویت کننده ها، فیلترها، انتگرال گیرها و ثبت کننده‌ها می‌شود. اغلب اوقات، این کار به صورت قرار دادن یک سیگنال معلوم در سیستم می‌شود تا خروجی مربوط به آن بررسی شود. بسته به نوع اندازه گیری، این سیگنال می‌تواند یک پله d.c، یک نوفه‌ی سینوسی یا تصادفی باشد.

ترانسدیوسرهای خاص، مثل ترانسدیوسرهای جابجایی یا پروب‌های مجاورتی، از پیش کالیبره می‌شوند. به هر حال، در این موارد، توصیه می‌شود کالیبراسیون آنها در میدان و در ارتباط با سطحی که اندازه گیری می‌شود، وارسی شود. چون پروب‌های مجاورتی به متالورژی و پرداخت شفت حساس هستند. کالیبراسیون این پروب‌ها در محل به وسیله میکرومترهای با فک متحرک[2]، انجام شده و خروجی‌ها برای هر کدام ثبت می‌شوند.

در هنگام وارسی کالیبراسیون ترانسدیوسرهای ارتعاشی، یک جدول لرزه مورد نیاز است.

کشش‌سنج[3]ها نیز اغلب پس از آنکه در میدان نصب می‌شوند، کالیبره می‌شوند. مطلوب ترین کالیبراسیون، اعمال باری مشخص به جزئی است که اندازه گیری می‌شود. اگر این کار عملی نباشد، می‌توان از یک کالیبراسیون شنت[4] بهره گرفت به این صورت که یک مقاومت کالیبراسیون، به صورت موازی به کشش‌سنج متصل می‌شود و بدین صورت، مقاومت ظاهری سنجه به مقداری مشخص تغییر می‌یابد که معادل با کشش معینی است که به وسیله فاکتور سنجه تعیین می‌شود.

۳-۴ فیلتر کردن

سه نوع فیلتر اصلی برای آماده سازی و تحلیل سیگنال وجود دارد:

- پایین گذر،
- بالا گذر، و
- میان گذر.

1- Dynamic signal analyser
2- Micrometre spindles
3- Strain gauge
4- Shunt

فیلترهای پایین گذر، همانطور که از نامشان بر می‌آید، فقط مولفه‌های دارای بسامد-پایین سیگنال را عبور می‌دهند و مولفه‌های دارای بسامد-بالایی را که فراتر از بسامد محدود کننده فیلتر (بسامد قطع) هستند را عبور نمی‌دهند. مثال‌های کاربردی عبارتند از فیلترهای ضدالایزینگ (به ۴-۳-۷ مراجعه کنید)، یا فیلترهایی که مولفه‌های بسامد-بالا که برای بررسی‌های خاص، ناخواسته هستند را جدا می‌سازند (مثل مولفه‌های مش بندی دنده برای بالانس).

فیلترهای بالاگذر عمدتاً قبل از تحلیل برای جدا کردن نوفه ترانسدیوسر بسامد-پایین (نوفه گرمایی) یا برخی دیگر از مولفه‌های ناخواسته از سیگنال به کار می‌روند. از آنجا که چنین مولفه‌هایی علیرغم اینکه مورد نظر نیستند، می‌توانند گستره پویای مفید تجهیزات اندازه گیری را به شدت کاهش دهند، این جداسازی دارای اهمیت است.

فیلترهای میان گذر، هنگامی که در تحلیل گنجانده می‌شوند، برای جداسازی باندهای بسامدی مجاز به کار می‌روند. انواع بسیار معمول فیلترهای میان گذر، فیلترهای اکتاو[1] و فیلترهای اکتاو 1/n هستند که به طور خاص برای ارتباط دادن اندازه گیری‌های ارتعاشی با اندازه گیری‌های نوفه به کار می‌روند.

هنگام تحلیل سیگنال‌های دارای گستره پویای بزرگ، فیلتر کردن به طور خاص دارای اهمیت است. برای مثال، اگر بسامدهایی با دامنه‌های بالا و پایین در طیف وجود داشته باشند، به دلیل وجود محدودیت‌هایی در گستره پویای تحلیل کننده، معمولاً نمی‌توان آنها را با یک سطح درستی یکسان، مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در چنین مواردی، ممکن است برای بررسی دقیق‌تر مولفه‌های دارای دامنه پایین، ضروری باشد تا مولفه‌های دارای دامنه بالا فیلتر شوند.

همچنین فیلتر کردن برای جداسازی سیگنال‌های حاوی اطلاعات از اختلالات (مثل نوفه‌های الکتریکی که در گستره‌ی بسامدی بالا وجود دارند یا موج‌های لرزشی که در گستره‌ی بسامدی پایین وجود دارند) دارای اهمیت است.

هنگامی که فیلترها برای جداسازی مولفه‌های بسامدی خاص به منظور بررسی شکل موج استفاده می‌شوند، به حصول اطمینان از اینکه فیلتر، به طور کافی، هر گونه مولفه بسامدی به جز مولفه‌های خواسته شده را جدا می‌سازد، باید دقت شود. فیلترهای ساده، چه آنالوگ و چه دیجیتال، شاخصه‌های جدا کننده خیلی تندی دارند، چون شیب فیلتر، بیرون از باند انتقال ضعیف است.

مثال- یک فیلتر خاص با ۲۴dB بر اکتاو تقریباً ۱۵٪ یک مولفه‌ای با بسامد دوبرابر ، و حدود ۴۵٪ مولفه‌ای با ۱٫۵ برابر بسامد قطع را عبور می‌دهد. برای بهبود شاخصه جلوگیری کننده فیلتر، می‌توان از چندین فیلتر ساده بصورت آبشاری در کنار هم استفاده نمود یا به جای آنها از یک فیلتر مرتبه بالاتر استفاده کرد.

1- Octave

۴ تحلیل و پردازش داده ها

۴-۱ کلیات

پردازش داده‌ها شامل کسب داده‌های خام، فیلتر کردن نوفه‌های ناخواسته و یا دیگر سیگنال‌های نامربوط و قالب دهی به سیگنال‌های اندازه گیری شده به شکل مورد نیاز برای تشخیص‌های بعدی است. بنابراین، پردازش داده‌ها، گامی مهم در جهت دستیابی به تشخیص‌های مفید و معنادار است. دستگاهی که سیگنال‌های ارتعاش را از ترانسدیوسر کسب می‌کند، باید دارای تفکیک‌پذیری مناسب هم در دامنه و هم در زمان باشد. اگر کسب داده‌ها به صورت دیجیتالی باشد، آنگاه تفکیک‌پذیری دامنه باید برای کاربرد به اندازه کافی بالا باشد. تعداد بیت‌های بیشتر برای تفکیک‌پذیری، امکان دستیابی به درستی و حساسیت بالاتر را به وجود می‌آورد. اما نوعاً به سخت افزارهای گرانتر و قدرت پردازش بالاتر نیاز دارد.

هنگامی که سیگنال‌ها به دست آید، مرحله بعدی، پردازش آنها و سپس نمایش خروجی‌ها به صورت قالب-های مفید گوناگون است به گونه‌ای که تشخیص را برای کاربر بسیار آسانتر نماید. مثال‌هایی از چنین قالب-هایی عبارتند از نمودارهای نایکوئیست، نمودارهای قطبی، نمودارهای کمپبل[1]، نمودارهای آبشاری[2] و کاسکاد[3] و نمودارهای تضعیف دامنه. بنابراین هدف از این بند، ارائه روش‌های مختلف برای کاربر است تا بتواند، شرایط ماشین‌ها را بهتر تعیین نماید.

۴-۲ تحلیل حوزه‌ی زمان

۴-۲-۱ شکل‌های موج زمانی

در گذشته، تحلیل شکل موج روش اولیه‌ی تحلیل ارتعاش بود. معمولاً یک نمودار ارتعاش لحظه‌ای به ازای محور زمان یا نوسان نگار به صورت گرافیکی تحلیل می‌شد و قله‌های پهن باند، ثبت می‌شدند. هرچند این فنون پهن باند، هنوز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، پرداختن به شکل موج با برخی فنون مبنایی‌تر ذهنی نیز مفید هستند. برای مثال، یک یاتاقان گرد[4] خراشیده شده می‌تواند با بررسی داده‌های شکل موج به دست آمده از ترانسدیوسرهای جابجایی آشکار شود، یک شکل موج دارای نوک یا انتهای پایینی قلاب شده، نشاندهنده یک ساییدگی، سستی مکانیکی و غیره است.

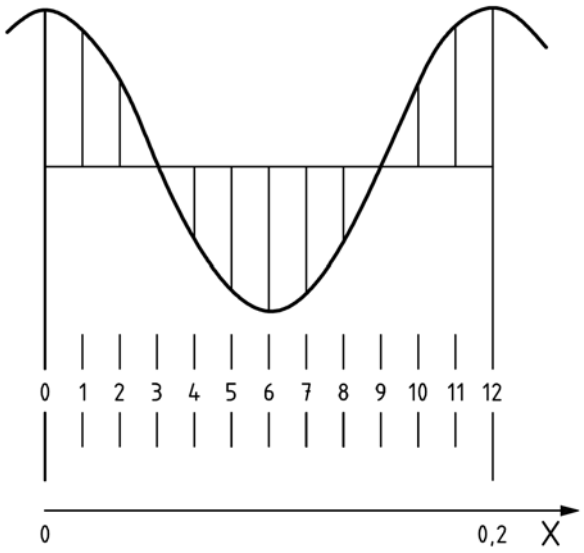
در حالیکه این علامت‌ها در حوزه زمان می‌توانند شکل موجی را ترسیم نمایند که اطلاعات مبنای مربوط به طبیعت پدیده‌ای که در ماشین رخ می‌دهد را ارائه می‌نماید، ممکن است نیاز به فنون تحلیلی عمیق‌تر برای بسامدها وجود داشته باشد به صورتی که در بند ۴-۳ تشریح شده است.

تحلیل شکل موج‌ها بر مبنای این اصل است که هر گونه ثبت متناوب، می‌تواند به صورت بر هم نهی سینوس‌هایی نشان داده شود که بسامدهای آنها، مجموع (انتگرال) چندین بسامد شکل موج هستند. اشکال ۶ تا ۹، چند مثال از این شکل موج‌ها را نشان می‌دهند.

1- Campbell diagrams
2- Waterfall plots
3- Cascade plots
4- Journal

شکل ۶ اساساً یک سینوس تک چرخه‌ای با دامنه ثابت است. دامنه دوتایی (یا قله تا قله) ارتعاش، بوسیله اندازه گیری دامنه دوتایی نمودار و سپس ضرب کردن آن در حساسیت اندازه گیری و سیستم ثبت که از کالیبراسیون تعیین می‌شود به دست می‌آید. این بسامد از طریق شمارش تعداد چرخه ها، در یک دوره‌ی زمانی مشخص به دست می‌آید. زمان بر روی نوسان نگار بوسیله خطوط زمان بندی، یا براحتی با دانستن سرعت حرکت کاغذ نمایش داده می‌شود. برای نمودار نشان داده شده، ۶۰ خط زمان بندی بر هر ثانیه وجود دارد، بنابراین، ۱۲ خط نشان دهنده دوره‌ی تناوب مبنا، T، و برابر با ۰٫۲s هستند و بنابراین بسامد $f=1/T$، برابر ۵Hz است. اگر از تعداد چرخه‌ها در بخش طولانی تری از ثبت داده‌ها استفاده شود، درستی بهتر می-شود.

شکل ۷، بر هم نهی دو موج سینوسی را نشان می‌دهد که در آن سه چرخه با پایین ترین بسامد وجود دارد. مولفه‌ها را می‌توان با رسم پوش‌های سینوسی (حدود بالایی و پایینی) بر روی تمامی قله‌ها و دوره‌های نمودار[1] از هم جدا نمود همانطور که نشان داده شده است. دامنه و بسامد مولفه بسامد-پایین، برابر با موارد حاصل از پوش است. فاصله‌ی عمودی بین پوش ها، نشان دهنده‌ی مقدار قله تا قله مولفه بسامد-بالا است و معمولاً می‌توان بسامد-بالا را محاسبه نمود. در این مثال، می‌توان نتیجه گرفت که بسامدها با فاکتور سه، با هم تفاوت دارند. هنگامی که نسبت بسامد دو موج سینوسی بر روی هم قرار گرفته بالا باشد، آنها را به صورتی که نشان داده شده می‌توان از هم جدا کرد؛ در تمام موارد دیگر، تحلیل فوریه مفیدتر است.

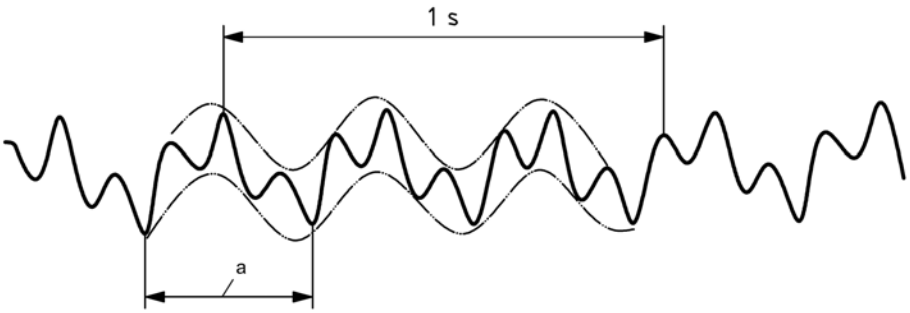


راهنما:

X زمان، s

شکل ۶- ویژگی‌های شکل موج

1- Troughs



راهنما:

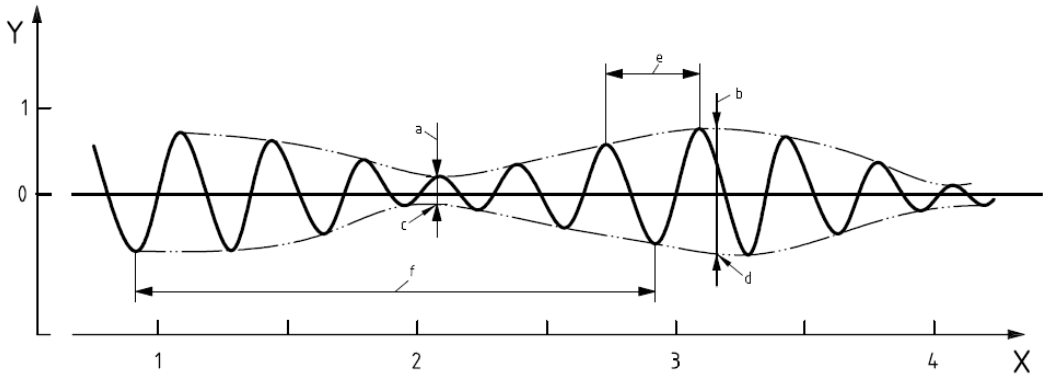
a چرخه.

شکل ۷- برهم نهی

۴-۲-۲ تداخل

اغلب، سیگنال‌هایی که شبیه نمودار نشان داده شده در شکل ۸ هستند و در آن پوش‌ها خارج از فاز هستند، دارای برآمدگی ها[1] و تورفتگی ها[2] می‌باشند. این سیگنال بوسیله دو مولفه ایجاد می‌شود که از نظر بسامد و دامنه به هم نزدیک هستند. این مورد را تداخل[3] می‌نامند که نوع خاصی از برهم نهی است. یک مثال از تداخل، بسامدهای دوپره یک ملخ دو قلو[4] است که با یکدیگر یک کشتی را حرکت می‌دهند. قله‌های دو سیگنال به طور متناوب، با هم جمع و از هم کم می‌شوند. دیگر شاخصه‌های تداخل این است که طول ضربان‌ها تقریباً یکی است و اینکه فاصله‌ی بین قله‌ها در برآمدگی ها، متفاوت با آن چیزی است که در تورفتگی‌ها وجود دارد. فواصل بین پوش‌ها در برآمدگی و تورفتگی، به ترتیب نشاندهنده جمع و تفریق مقادیر قله تا قله دو مولفه است. مثال دیگر، ارتعاش اجباری به وجود آمده بوسیله ماشین‌های جفت شده (کمپرسورها و دیگر ماشین ها) است که بوسیله موتورهای الکتریکی غیرسنکرون به حرکت در می‌آیند.

1- Bulges
2- Waists
3- Beating
4- Twin propeller



راهنما:

X زمان، s

Y دامنه

a مقدار قله تا قله در تورفتگی ۰٫۲ .

b مقدار قله تا قله در برآمدگی ۰٫۷ .

c تورفتگی.

d برآمدگی.

e چرخه‌ی ارتعاش: ۰٫۳۳ ثانیه مطابق ۳Hz.

f چرخه ضربان: ۲s مطابق ۰٫۵Hz.

شکل ۸- مثالی از تداخل

مثال – اگر دامنه مولفه اصلی X_m و مولفه فرعی X_n باشند، اندازه گیری‌ها نشان می‌دهد که با $X_m + X_n = 0.7$ و $X_m - X_n = 0.2$، جواب عبارتست از $X_m = 0.45$ و $X_n = 0.25$. این دامنه‌های ثبت شده باید در حساسیت سیستم ضرب شوند تا دامنه‌های واقعی بدست آیند. بسامد اصلی را می‌توان با شمارش تعداد قله ها، همانطور که قبلاً تشریح شد، بدست آورد (در شکل ۸ برابر با ۳Hz است). این بسامد همچنین برابر مجموع چندین بسامد ضربان[1] و در این مورد ۶ مرتبه است. بسامد مولفه فرعی، یک مرتبه بالاتر (۷) یا یک مرتبه پایینتر (۵) از بسامد ضربان است. فاصله بین قله‌ها در تورفتگی‌ها نشان می‌دهد که کدام یکی وجود دارد، زیرا مولفه اصلی را نشان می‌دهد. در شکل ۸، فاصله باریک‌تر است بنابراین مولفه اصلی دارای بسامد-بالاتری است. در شکل ۸، بسامد ضربان ۰٫۵Hz است و بسامد اصلی ۵ برابر، یعنی ۲٫۵ Hz است.

شایان ذکر است که بسامد ضربان، تفاوت بین بسامدهای هر دو مولفه است، اما میانگین بسامد قله برابر با نصف جمع هر دو می‌باشد. یک قاعده ساده برای محاسبه‌ی بسامدها بدین صورت است:

(۵)

$$f_b = f_m - f_n$$

که در آن

f_b بسامد ضربان است؛

1- Beat

f_m بسامد مولفه اصلی است؛

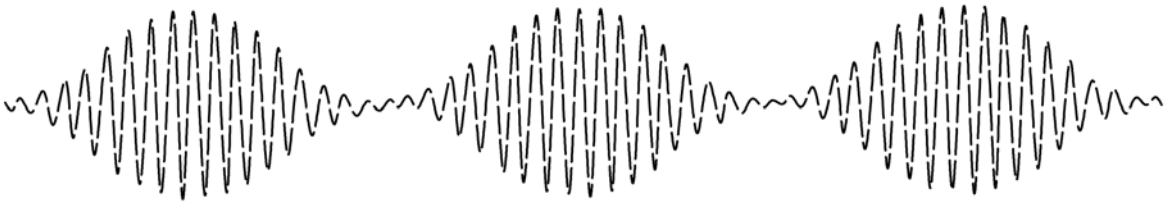
f_n بسامد مولفه فرعی است.

در مثال نشان داده شده در شکل ۸، با شمارش قله‌ها مشخص می‌شود که ۶ قله در ۲ ثانیه وجود دارد که این بدان معناست که $f_m = 3Hz$. چرخه‌ی ضربان، یک چرخه در همان دوره زمانی است، بدین معنی که $f_b = 1/(2s) = 0.5Hz$. با معکوس کردن معادله (۵) داریم $f_n = f_m - f_b$ که بسامد مولفه فرعی را به این صورت به دست می‌دهد $f_n = 3Hz - 0.5Hz = 2.5Hz$.

۴-۲-۳ مدولاسیون

شکل ۹، نمودار ارتعاشی مدوله شده را نشان می‌دهد. این نمودار شبیه تداخل است اما در واقع فقط یک مولفه است که دامنه آن با زمان تغییر می‌کند (مدوله شونده). این مورد قابل تمیز از تداخل نیز هست چون فواصل بین قله‌ها در برآمدگی‌ها و تورفتگی‌ها با هم برابر است. همچنین طول برآمدگی‌ها ممکن است یکسان نباشد. مشکلات دنده‌ها اغلب منجر به مدولاسیون بسامد مش[1] دنده‌ها در بسامد دورانی دنده‌ها می‌شود.

متاسفانه، بسیاری از داده‌های ثبت شده ارتعاش، شامل بیش از دو مولفه می‌باشد و ممکن است شامل مدولاسیون و به همراه آن تداخل هم باشد. تحلیل چنین داده‌هایی بسیار دشوار است اما ممکن است تحلیل‌گر بتواند بخش‌هایی از اطلاعات ثبت شده را بیابد که در آن بخش‌های یک مولفه بطور موقت غالب باشد و بسامد و دامنه‌ی آن مولفه را در آن بخش بدست آورد.



شکل ۹ – مدولاسیون

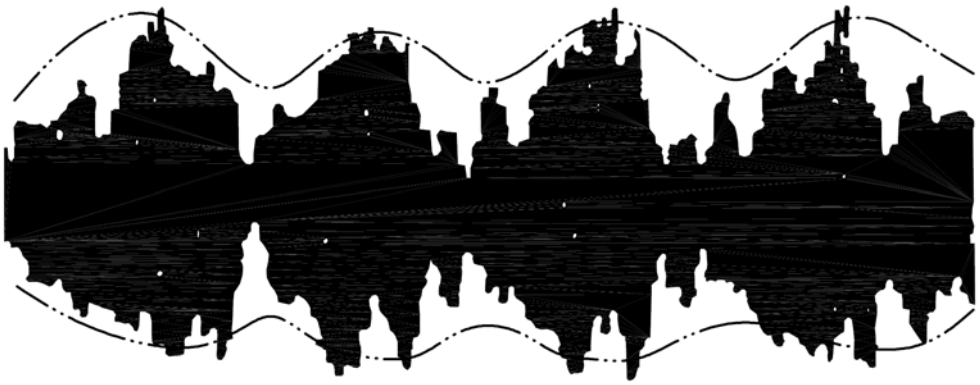
۴-۲-۴ تحلیل پوش

تحلیل پوش، فرآیندی برای جداسازی[2] مولفه‌ها با سطح پایین در یک باند بسامدی کم پهن است که تحت ارتعاش پهن باند با سطح بالا محو شده است (ارتعاش آزاد و تحریک شده به وسیله ضربه، ارتعاش درگیر شدن دنده‌ها و غیره). آشکار سازی پوش، وسیله‌ای برای شناسایی نقص هایی[3] را فراهم می‌کند که قبلاً و با قابلیت اطمینان بالاتری به وجود آمده اند. معمول ترین کاربرد آن، در تحلیل دنده‌ها و یاتاقان دارای عنصر غلتنده[4] است که در آنها یک رخداد تکرار شونده با بسامد-پایین و عموماً دارای دامنه-کم (مثل یک دندانه

1- Mesh frequency
2- Demodulation
3- Flaws
4- Rolling element bearings

خراب که وارد شبکه دنده‌ها می‌شود یا یک تکه کنده شده توپی یا استوانه ای[1] که به یاتاقان ضربه می‌زند)، تشدید (ها) با بسامد-بالا را تحریک نموده و موجب می‌شود که بسامد-بالا به وسیله بسامد عیب مدوله شود، نمونه‌ای از یک مسیر پوش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

خاطر نشان می‌شود که لازم است مولفه مدوله شده از قبل بوسیله فیلتر نمودن باند باریک، جداسازی شود.



شکل ۱۰- تحلیل پوش

۴-۲-۵ پایش پوش طیف بسامدی با باند باریک

پایش پوش طیف بسامد با باند باریک هر گونه نفوذ یک پوش که معمولاً یک حد هشدار در محدوده یک طیف مرجع است را آشکار می‌کند. پوش با پهنای باند ثابت که در آن تفاوت بسامد، عددی برابر با خطوط در بسامدهای پایین و بالا است، معمولاً برای ماشین‌هایی با سرعت ثابت استفاده می‌شود.

یک پوش پهن باند با درصد ثابت، تفاوت بسامد (افست[2]) بین پوش و مولفه پایش شده را متناسب با افزایش در بسامد افزایش می‌دهد. این روش مزایایی دارد، زیرا تمامی مولفه‌های هارمونیک بر روی تغییرات کوچک سرعت، در باند بسامدی یکسانی باقی می‌مانند.

حدود دامنه برای مولفه‌های بسامد منفرد از دو نوع می‌باشد. یک افست با درصد ثابت معمولترین نوعی است که به کار می‌رود زیرا محاسبه آن ساده است و فقط به طیف مرجع تکی نیاز دارد.

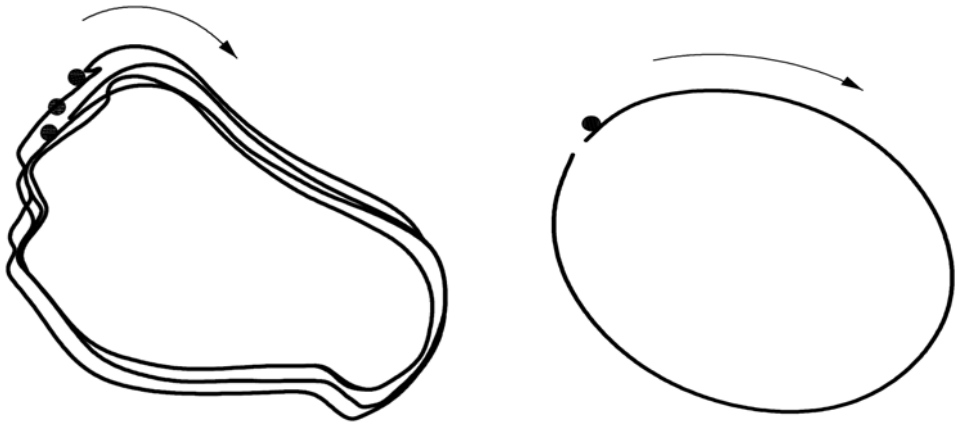
یک روش مشخص تر، محاسبه ابزاری آماری برای هر قسمت پوش و سپس قرار دادن محدوده هشدار برابر با ۲٫۵ تا ۲٫۸ برابر انحراف معیار بالاتر از ابزار مذکور است. محاسبه‌ی آماری نیاز به ۴ یا ۵ طیف با تفکیک-پذیری بالا دارد و سپس به صورت خودکار برای تفاوت‌های نرمال در تغییرات دامنه که بطور معمول در طیف ماشین‌ها مشاهده می‌شوند محسوب می‌شود.

۴-۲-۶ مدار حرکت شفت[3]

تحلیل مدار حرکت شفت را می‌توان بر روی هر ماشین با استفاده از ترانسدیوسرهای جابجایی که معمولاً به صورت°۹۰ و جدا نصب می‌شوند، انجام داد. در ماشین‌های دوار بزرگ که دارای یاتاقان‌های غلاف دار

1- Roller
2- Offset
3- Shaft orbit

هستند، استفاده از تحلیل مدار حرکت شفت برای تعیین حرکت شفت در فضای تهی یاتاقان معمول است. به هر حال توصیه می‌شود به این موضوع دقت شود که اطمینان حاصل شود که نمایش مدار حرکت شفت، به صورت غیرضروری توسط خستگی مکانیکی و الکتریکی شفت، دچار اعوجاج نشود. تفسیر درست مدار حرکت می‌تواند دیدی نسبت به ماهیت تابع نیرو را ارائه دهد. تعیین این مورد که آیا چرخش روتور رو به جلو (در جهت دوران) یا رو به عقب (در خلاف جهت دوران) است، نیز امکانپذیر می‌باشد. نمایش مسیر حرکت می‌تواند به صورت سیگنال‌های فیلتر نشده یا فیلتر شده باشد. نمودارهای نوعی مدار حرکت پهن باند (فیلتر نشده) یا با بسامد-تکی (فیلتر شده) در شکل ۱۱ نشان داده شده اند.



الف) فیلتر نشده ب) فیلتر شده

شکل ۱۱- مدارهای حرکت شفت

نمایش سنکرون فیلتر شده (×۱) معمول است؛ اما هارمونیک‌های دیگر یا بسامدهای زیر سنکرون نیز در نمایش مدار حرکت نمایش داده شده اند تا بتوان یک مساله را بیشتر تشریح یا حل نمود. یک علامت (نقطه، هایلایت[1] و غیره) که مرجع شفت را مشخص می‌کند (یعنی سیگنال یک-بر-هر دور)، اطلاعاتی را در خصوص رابطه‌ی بین بسامدهای دورانی و ارتعاشی ارائه می‌دهد.

نمودار مدار حرکت، حرکت پویای مرکز شفت دوران کننده در صفحه‌ی اندازه گیری را نشان می‌دهد. یک مدار حرکت گاهی یک نمایش لیساژو[2] نامیده می‌شود. ترانسدیوسرهای مدار حرکت باید از یک نوع یکسان بوده و باید بصورت عمود (۹۰° و جدا) نصب شوند. اگر ترانسدیوسرها عمودی نباشند، مدار حرکت دچار انحراف خواهد شد. در مورد یک شفت دندانه دار، قرارداد به صورت پوچ-روشن[3] است. پوچ، نشاندهنده شروع دندانه و روشن پایان دندانه را نشان می‌دهد. بنابراین، در شکل ۱۱، جهت چرخش ساعتگرد است.

جهت دوران شفت، ساعتگرد یا پاد ساعتگرد بسته به جهت نشان داده شده به صورت مستقل تعیین می-شود. اگر جهت چرخش با جهت دوران یک باشد، ارتعاش به عنوان چرخش رو به جلو در نظر گرفته می-شود. چرخش رو به عقب زمانی است که جهت چرخش مخالف جهت دوران باشد. در شکل ۱۱، از آنجا که هر دو جهت دوران و چرخش ساعتگرد هستند، چرخش رو به جلو است.

1- Highlight
2- Lissajous
3- Blank-bright

۴-۲-۷ موقعیت شفت d.c

برای تعیین موقعیت شفت d.c، از ترانسدیوسرهای جابجایی متناوباً استفاده می‌شود تا داده‌هایی از بارگذاری نسبی یاتاقان‌های غلاف دار به وسیله نسبت‌های خروج از مرکزشان به دست آید. وضعیت یاتاقان گردها درون یاتاقان هایشان به صورتی که از بخش d.c سیگنال (یعنی فاصله) اندازه گیری می‌شود، در پایش ماشین‌های بزرگ، بسیار مفید است. موقعیت d.c می‌تواند بلند کردن مناسب یاتاقان را صحه گذاری نماید و موقعیت شفت را تصحیح نماید. به هر حال توصیه می‌شود به این نکته توجه شود که از نمایش نادرست ناشی از انحراف .d.c شفت در طول یک دوره زمانی طولانی پرهیز شود.

۴-۲-۸ ارتعاش گذرا

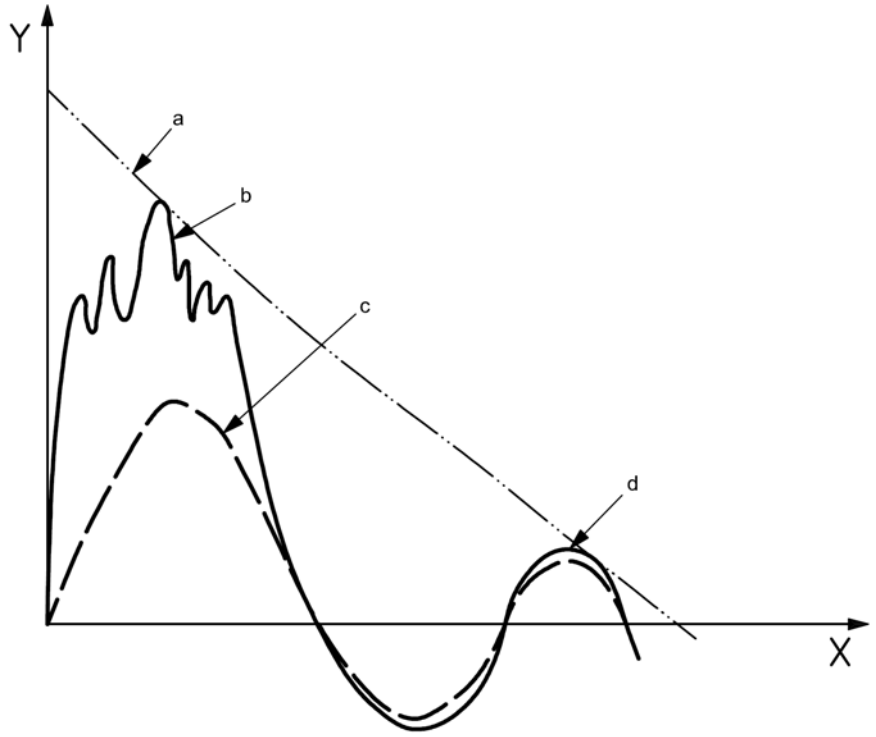
ارتعاش گذرای سرعت معمولاً به صورت اطلاعات ارتعاشی توصیف می‌شوند که در حین شرایط راه اندازی یا از کار افتادن در یک دوره کاری ماشین به دست می‌آیند. داده‌های ارتعاشی معمولاً به صورت قالب‌های نمایشی مثل نمودارهای کاسکاد (آبشاری)، نمودارهای بود[1]، نمودارهای قطبی (نمودارهای نایکوئیست) و نمودارهای کمپل نشان داده می‌شوند.

ارتعاش گذرا زمانی اتفاق میافتد که بوسیله یک نیروی لحظه‌ای تحریک صورت گیرد. این امر می‌تواند به صورت یک ضربه تکی یا به صورت تحریک نوسانی با مدت زمان کوتاه باشد. هنگامی که تحریک قطع می-شود، سازه تمایل دارد تا با بسامدهای طبیعی خودش ارتعاش کند در حالی که میرایی در سیستم، باعث تضعیف به صورت نمایی می‌شود.

بنابراین، تاریخچه‌ی زمانی پاسخ سازه بعد از آنکه نیرو قطع می‌شود، ترکیبی از موج (های) سینوسی کاهش یابنده است. مثالی از موج سینوسی میرا شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. می‌توان گفت که شکل موج ترکیبی حاصل از بر هم نهی مُدهای طبیعی سیستم، بوسیله نیروهای لحظه‌ای به صورت همزمان تحریک می‌شوند. در کل مولفه‌های بسامد-بالاتر، سریعاً تضعیف می‌شوند و شکل موج ترکیبی، به صورت پیش رونده‌ای به سوی پاسخ سینوسی میرا شده با پایین ترین مد بسامدی، تضعیف می‌شود و مدهای بسامد-بالا، میرا می‌شوند.

خرابی‌های موجود در یاتاقان دارای عناصر غلتنده، معمولاً از روی پاسخ‌های گذرای بسامد-بالا به عیوب توپی یا مسیر مشخص می‌شوند.

1- Bode



راهنما:

X زمان

Y دامنه

a تاخیر نمایی قله پوش دامنه

b شکل موج مرکب

c شکل موج مد کوتاه ترین بسامد

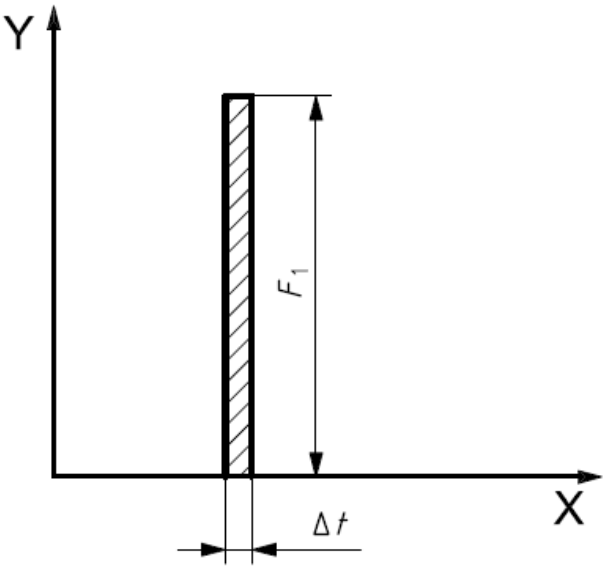
d شکل موج زوال یافته

شکل ۱۲- ارتعاش گذرا

۹-۲-۴ ضربه

پاسخ ضربه، تاریخچه زمانی پاسخ ارتعاشی یک سیستم مکانیکی به یک ضربه است که می‌توان آن را به صورت یک نیروی F که در طول مدت زمان بسیار کوتاه Δt، اعمال می‌شود نشان داد که در آن ضربه، انتگرال $F_1.dt$ از t به $(t+\Delta t)$ است، به شکل ۱۳ مراجعه کنید.

در بسیاری از موارد، پاسخ ضربه برای شناسایی بسامدهای تشدید در سازه‌های ایستا استفاده می‌شود.



راهنما:

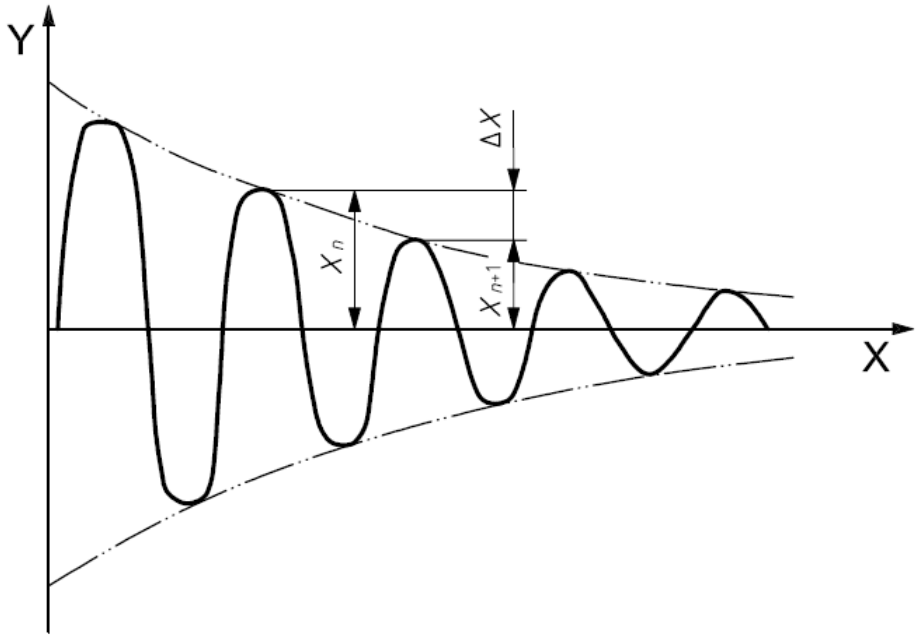
X زمان

Y نیرو

شکل ۱۳- تحریک ضربه

۴-۲-۱۰ میرایی

میرا شدن، مکانیزمی است که به وسیله آن حرکت ارتعاشی به صورت‌های دیگر انرژی و معمولاً گرما، تبدیل شده و منجر به تضعیف بزرگی‌های ارتعاش می‌شود. مقدار میرایی، c، اغلب متناسب با سرعت ارتعاش است و حتی هنگامی که اینگونه هم نباشد، اغلب برای اهداف تحلیل‌های ریاضی فرض می‌شود. یک سیستم دارای میرایی بحرانی c_c است اگر دارای کوچکترین مقدار میرایی مورد نیاز برای برگرداندن سیستم به موقعیت تعادلش بدون نوسان باشد. اگر میرایی سیستم، کمتر از مقدار بحرانی باشد، با دامنه‌های تضعیف شونده نوسان می‌کند (به شکل ۱۴ و ISO2041 مراجعه کنید). برای یک سیستم با چند درجه‌ی آزادی، ممکن است برخی از مدها دارای مقداری کمتر از میرایی بحرانی باشند و برخی از آنها، مقداری بیشتر داشته باشند.



راهنما:

X زمان

Y دامنه

شکل ۱۴- دامنه‌های تضعیف شونده به علت میرایی

اگر دامنه ارتعاش تضعیف شونده یک مد خاص، X، به ازای مدت زمان رسم شود، کاهش لگاریتمی، d، برابرست با:

(۶)

$$d = 1/n \ln(X_1 / X_{n+1})$$

که در آن n، تعداد چرخه‌ها برای دامنه در زمانی است که از X_1 به X_{n+1} تضعیف می‌شود.

فاکتور اتلاف، یک مقیاس رایج از میرایی نسبی در یک سیستم است. کاهش لگاریتمی، d، به صورت رابطه $h=d/\pi$ به فاکتور اتلاف، h، بستگی دارد.

یادآوری ۱– نوعاً نمادهایی که برای نشان دادن فاکتور اتلاف به کار می‌روند عبارتند از h، z و η. نمادهای معمول برای کاهش لگاریتمی عبارتند از α و Λ.

فاکتور اتلاف را نیز می‌توان برحسب نرخ تضعیف، X'، بر حسب دسی بل بر ثانیه به صورت زیر به دست آورد:

$$h = X'/(27.3 f_n) \qquad (۷)$$

که در آن f_n بسامد طبیعی بر حسب هرتز است.

مقدار میرایی، c، در یک سیستم بوسیله Q، نمایش داده می‌شود که فاکتور بزرگی نمایی در بسامد طبیعی میرا نشده است. فاکتور بزرگ نمایی، تابعی از بسامد بوده و نسبت دامنه جابجایی پویای سیستم به جابجایی

ایستای سیستم است اگر سیستم در معرض یک نیروی ثابت با بزرگی برابر قرار گیرد. مشروط بر اینکه هیچ بر هم کنش عمده‌ای بین مدها وجود نداشته باشد، آن گاه برای یک مد خاص، Q را می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

(۸)

$$Q = 1/(2c/c_c)$$

از منحنی‌های پاسخ اندازه گیری شده، می‌توان برای یک مد خاص، Q را از روی نسبت بسامد تشدید، f_r ، با تفاوت بین بسامدها در نقطه‌هایی با توان نصف (۰/۷۰۷ برابر حداکثر دامنه) در هر طرف منحنی، تقریب زد:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \qquad (۹)$$

که در آن:

f_r بسامد تشدید است؛

$\Delta f = f_2 - f_1$ با f_1 و f_2 نقاط دارای نصف توان می‌باشند.

فاکتور بزرگ نمایی، با تقریب به کاهش لگاریتمی مرتبط می‌شود:

$$Q \approx \pi / d \qquad (۱۰)$$

یادآوری ۲- اگر میرایی کوچک باشد، $Q = 1/h$.

به عنوان مثال، شکل ۱۵ نشاندهنده نمونه‌ای از فاکتور Q است که که از یک نمودار بود به دست آمده است. نتیجه مشابهی را می‌توان از یک نمودار قطبی به دست آورد.

هنگامی که علت و معلول ارتعاش در ماشین‌های دوار بررسی می‌شود، میرایی یک کمیت مفید است. یک مد نزدیک به سرعت عملیاتی می‌تواند تا زمانی که به خوبی میرا می‌شود و بنابرآن به پاسخ کمک نمی‌نماید، مورد قبول باشد. در عوض، یک مد با میرایی بسیار کوچک ممکن است به قدری حساس باشد که ماشین شدیداً پاسخ دهد یا حتی ممکن است قادر نباشد که از سرعت تشدید عبور نماید.

۴-۲-۱۱ میانگین گیری حوزه‌ی زمان

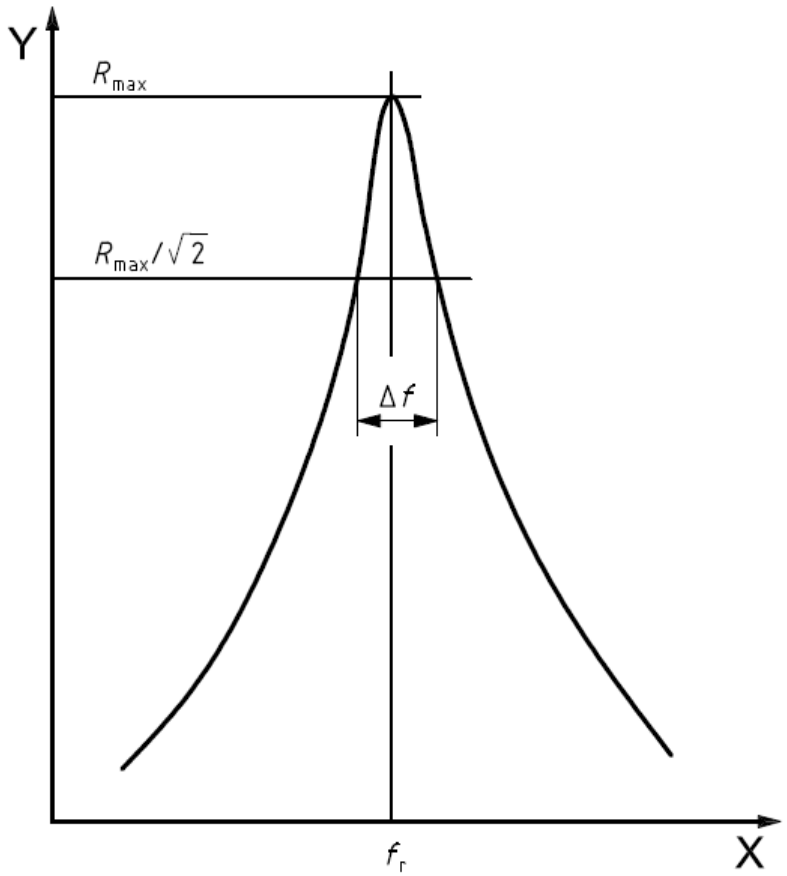
هر سیگنال شامل مولفه‌هایی است که با فرآیندها یا حرکت‌ها در ماشین‌های و تجهیزات پایش شده و همچنین آنهایی که غیرسنکرون هم هستند (با مبدایی که مستقل از سیستم تحت مشاهده است)، همزمانی م (سنکرون است). این مولفه‌ها را می‌توان با تحلیل بسامد از هم جدا نمود (به ۴-۳ مراجعه کنید). دیگر فنون معمول که برای شناسایی این اتفاقات به کار گرفته می‌شود، میانگین گیری حوزه زمان نام دارد. در این فرآیند، هر نمونه داده، از طریق یک پالس یا محرک[1] مرجع، با عناصر دوار مختلف سنکرون می‌شود. میانگین‌گیری، که می‌تواند گستره‌ای از چند نمونه تا بیش از ۲۰۰ نمونه را شامل شود، در حوزه زمان محاسبه شده و یک طیف مبنای شکل موج زمانی میانگین نتیجه شده به دست می‌آید. آن بخش‌های

1 - Trigger

سیگنال زمانی که غیرسنکرون با مرجع هستند، با پیشروی فرآیند، یکدیگر را حذف می‌نمایند. هر چه میانگین‌ها بیشتر باشد، بهتر است و این تعداد بستگی به نوع کاربرد دارد.

در میانگین گیری حوزه زمان، نمونه‌های متناظر، در واقع به صورت جبری به هر یک از داده‌های ثبت شده اضافه می‌شوند و سپس بر تعداد داده‌های ثبت شده تقسیم می‌شوند. نتیجه اینست که شکل موج تکرارشونده، بدون عیب باقی می‌ماند در حالیکه تمام میانگین‌های دیگر (شامل شکل موج‌های تکرارشونده دیگر) به سمت صفر میل می‌کنند. نرخی که تضعیف صورت می‌گیرد، برابر با ریشه دوم تعداد میانگین هاست.

یادآوری – ۱۰۰ میانگین (داده‌ها ثبت شده) سیگنال‌های ناخواسته را با فاکتور ۱۰، کاهش می‌دهند؛ ۱۰۰۰۰ میانگین آن‌ها را با فاکتور ۱۰۰ کاهش می‌دهد.



راهنما:

X بسامد

Y پاسخ

شکل ۱۵ – فاکتور Q

این فن برای شناسایی روتوری که در یک ماشین چندروتوره، منبع پدیده ارتعاش است، بسیار سودمند است. از این فن می‌توان برای آشکارسازی خرابی‌های مختلف مثل دنده ها، پره‌ها و رول های[1] آسیب دیده در ماشین‌های کاغذ بهره برد.

مثال ۱ – یک مثال خوب، یک پمپ است که به وسیله یک توربین به حرکت در می‌آید و دارای دنده‌های حرکت دهنده‌ای با سرعت‌های مختلف شفت است که بر روی هر شفت یک محرک سنکرون کننده یک بار-بر-دور وجود دارد. سیگنال خروجی یک شتاب سنج که بر روی جعبه دنده سوار شده است را می‌توان با میانگین گیری حوزه زمان تحلیل کرد که در این صورت، فرآیند برای محرک سنکرون کننده، تکرار می‌شود که عدم تعادلی در شفت توربین به وجود آمده است. با استفاده از محرک شفت پمپ، سیگنال به الگویی تناوبی در بسامد گذرکننده پره، کاهش می‌یابد و نشان دهنده یک آفست شعاعی ثابت شفت پمپ درون محفظه خودش است.

مثال ۲ – مثال دیگر، جایی است که پل‌های کشش‌سنج بر روی دو پره بزرگ یک توربین آبی نصب شده باشند و سیگنال‌های خروجی آنها به وسیله دورسنجی[2] مورد سنجش قرار می‌گیرند. از محرک یک بار-بر-دور برای سنکرون کردن فرآیند میانگیری حوزه زمان استفاده می‌شود. بعد از چندین میانگین گیری برای کاهش نوفه‌ی جریان، ممکن است یک الگوی ناهموار به وجود آید که برای هر پره یکسان است. اما از نظر زمانی، به اندازه زاویه دورانی پره ها، دارای آفست[3] است. تشخیص یک جریان ناهموار از طریق یک سری دریچه کوچک صورت می‌گیرد که توربین را تغذیه می‌نمایند. سپس از این الگو برای تنظیم مجدد دریچه‌ها و حتی اجازه خروج جریان و کاهش تنش‌های پویای روی پره‌ها استفاده می‌شود.

هرچند، میانگین گیری حوزه زمان، ماهیتاً نسبتاً دشوار است، ولی نمی‌تواند رخدادهای غیرسنکرون مانند خرابی‌های ضداصطکاکی یاتاقان را نشان دهد.

میانگین گیری طیف بسامدی پیچیده در موارد تحقق موفق، به طور عادی به وضعیت ارتعاشی حالت پایدار نیاز دارد. اگر بسامد تحریک غیرپایدار یا سرعت دورانی متغیر وجود داشته باشد، میانگین گیری ساده حوزه زمان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. به جای این کار، لازم است تا از سیگنال در بازه‌های زمانی ثابت فرآیند تحریک (یعنی بازه‌هایی برابر با زاویه روتور که دارای مسافت یکسان هستند یا دیگر موقعیت ها، این کار را می‌تواند با استفاده از یک رمزگذار انجام داد) نمونه برداری شود. نتیجه انتقال موفق بسامد، یک طیف مرتب سازی شده به جای یک طیف بسامد است. برای سیگنال‌های پاسخ ضربه، می‌توان میانگین گیری را در حوزه زمان با تحریک رخداد، یعنی محرکی که به وسیله تحریک ضربه، تنظیم می‌شود، اجرا نمود.

منبع محرک به تجهیزات دوار محدود نمی‌شود. به عنوان مثال، کاربردهای دیگر عبارتند از تسمه‌های ماشین کاغذ، نوار نقاله‌ها و غیره. به علاوه، منبع سیگنال محدود به ارتعاش نیست. این منبع می‌تواند یک سیگنال پردازشی مربوط به ماشین تحت بررسی باشد که یک عیب فنی یا یک پارامتر فرآیند را که بهتر است برای توسعه خرابی تحت پایش قرار گیرد، شناسایی نماید. همچنین ممکن است به جای تحریک از شفت‌های مختلف، مثل مورد چندین شفت در یک جعبه دنده، از یک ضرب کننده بسامد استفاده شود.

1- Rolls
2- Telemetry
3- Offset

۴-۳ تحلیل حوزه‌ی بسامد

۴-۳-۱ کلیات

تعداد بسیاری از تحلیل‌های ارتعاشی در حوزه‌ی بسامد انجام می‌شوند، چون منابع مختلف ارتعاش را معمولاً می‌توان بوسیله بسامدهایی که در آنها رخ می‌دهند، از هم جدا کرد. یک کانال تکی که در حوزه بسامد تحلیل شده است، مقدار زیادی از اطلاعات را در اختیار می‌گذارد، اما اغلب این موضوع مهم است که ارتعاش به یک کانال دوم به صورت یک مرجع فاز یا دامنه یا هر دو ارتباط داده شود.

۴-۳-۲ تبدیل فوریه

فن پایه برای تبدیل یک نمودار زمانی پهن باند به بسامدهای مجزا یا باندهای بسامدی استفاده از تبدیل فوریه است، فنّی ریاضی که مولفه‌های تشکیل دهنده سیگنال ارتعاشی کل شامل هر گونه نوفه الکتریکی یا مکانیکی که ممکن است وجود داشته باشد را شناسایی می‌کند. این تحلیل می‌تواند به کمک رایانه و نرم افزار پردازش سیگنال بوسیله دستگاه‌های خاص (که معمولاً تحلیل‌گر فوریه نامیده می‌شوند)، یا بوسیله ریزتراشه‌های سخت افزاری (DSPs[1]) انجام شود. روش رایجی که در تحلیل‌گرها ربیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، یک روش روتین ریاضی موثرتر به نام تبدیل فوریه‌ی سریع[2] است.

شکل موج زمانی یک سیگنال ارتعاشی، چنانکه در شکل ۱۶ نشان داده شده است، به وسیله FFT به مولفه-های سینوسی مجزا به عنوان تابعی از زمان تبدیل می‌شوند. چند فاکتور مهم مبنا وجود دارد که در هنگام تنظیم یک تحلیل‌گر FFT برای تبدیل یک شکل موج زمانی به یک طیف بسامدی معنادار، باید در نظر گرفته شود. رابطه‌ای بین پهنای باند خطوط بسامدی (بلوک ها[3])، پهنه بسامد و طول نمودار زمانی وجود دارد. در شکل ۱۶، پهنای باند 2Hz است که ۱۰۰ خط بسامدی بین ۰ و ۲۰۰ وجود دارد. برای بهینه سازی گستره بسامدی مورد نظر، توصیه می‌شود این پارامترها انتخاب شوند.

به خاطر اثرات الایزینگ (به ۴-۳-۷ مراجعه کنید)، ممکن است مولفه‌هایی با بسامد-بالاتر به عنوان بسامد-های پایین‌تر شناخته شوند. برای پرهیز از این احتمال، توصیه می‌شود از فیلترهای ضدالایزینگ استفاده نمود.

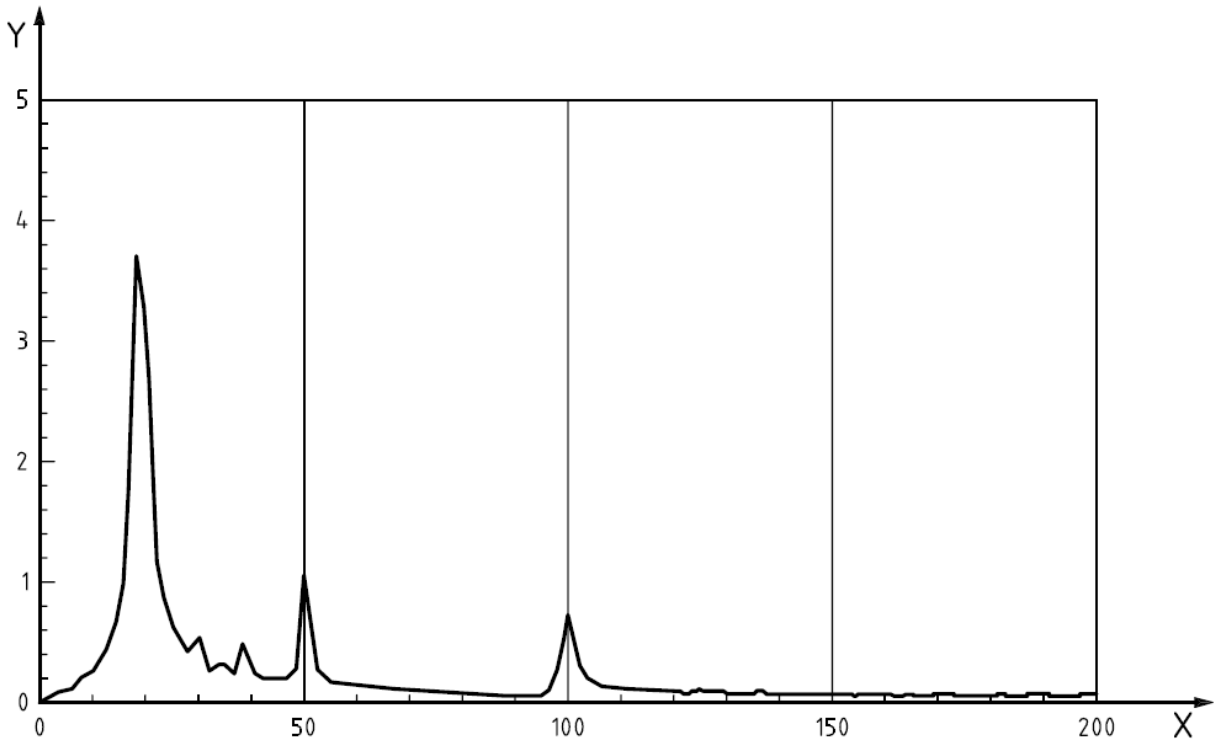
نتیجه‌ی تبدیل فوریه، طیفی پیچیده است که می‌تواند بصورت

- دامنه و فاز، یا
- بخش موهومی یا حقیقی.

از هر مولفه بسامدی نمایش داده شود.

از نقطه نظر عملی، طیف بزرگی، اطلاعات بیشتری دارد؛ بنابراین، اغلب از طیف فازی صرف نظر می‌شود.

1- Hardware microchips
2- Fast Fourier transform
3- Bins



راهنما:

X بسامد،Hz

Y دامنه

شکل ۱۶ –طیف بسامد بزرگی

۴-۳-۳ نشت و ایجاد پنجره[1]

در هنگام نمونه برداری از یک شکل موج، اگر نمونه شامل تعداد غیرصحیحی[2] از چرخه‌ها باشد، نشت اتفاق میافتد. نتیجه آلوده کردن[3] قله‌های حوزه بسامد است. چون نمونه، شکل موجی را که از آن برگرفته شده است به صورت نادرست نمایش می‌دهد. یک تابع پنجره با تصحیح این نشت، خطاها را کاهش می‌دهد. پنجره هنینگ[4]، برای موج‌های سینوسی که نسبت به زمان متناوب و غیرمتناوب هستند، کار قابل قبولی را انجام می‌دهد. هرچند پنجره هنینگ، بیشترین مورد استفاده را دارد، انواع دیگر پنجره‌ها نیز وجود دارند و برای بهبود سیگنال می‌توان از آنها بهره برد.

برای رویدادهای گذرا، یک پنجره یکنواخت (مستطیلی)، نتایج بهتری را به دست می‌دهد. پنجره هنینگ در سطوح بالا و در تبادل برای دامنه‌هایی که سریعاً رو به پایین می‌روند، نسبت به پنجره هنینگ، قله‌های طیفی باریکتری به دست می‌دهد. پنجره بلک من[5] و مشتقات آن بلک من اکزکت [6] و بلک من هریس[7]،

1- Leakage and windowing
2- Non-integral
3- Smearing
4- The Hanning window
5- Blackman window
6- Blackman Exact
7- Blackman Harris

نسبت به هنینگ، قله‌های پهن تر، اما با دامنه‌های کمتری ارائه می‌دهند. پنجره فلت تاپ[1] می‌تواند درستی دامنه بر روی پنجره هنینگ را به قیمت توانایی انحلال سیگنال‌های کوچکی که با فاصله نزدیک یا سیگنال-های بزرگ‌تر در حوزه بسامد قرار گرفته اند، بهبود بخشد. این پنجره، پهن ترین قله را می‌دهد، دامنه‌ها برابر با پنجره هنینگ هستند اما بالای قله‌ها برای قرائت‌های دارای صحیح ترین سطح در بسامدهای متغیر، مسطح‌تر هستند. با تصحیح اریبی[2] نمونه برداری، پنجره ها، نمودارهای شکل موج غیرسنکرون، مثل طیف، کاسکاد و آبشاری را بهبود می‌بخشند. از پنجره فلت تاپ، همچنین می‌توان برای کالیبراسیون استفاده کرد.

یادآوری – پنجره‌های حوزه برای تحلیل تبدیل فوریه در ISO 18431-2 توصیف شده اند.

۴-۳-۴ تفکیک‌پذیری بسامد

ریاضیاتِ FFT به این موضوع نیاز دارد که پهنه بسامد مورد نظر به تعداد محدودی از بخش‌ها تقسیم شود و دامنه ارتعاش در هر بخش با یک خط عمودی نشان داده شود که گاهی به آن طیف "باند مبنا" می‌گویند. تعداد بخش‌ها را تعداد خطوط تفکیک‌پذیری (LOR[3]) ، N_{LOR}[4] می‌نامند. ممکن است بیش از یک مولفه بسامدی در بسامدهای درون یک بلوک LOR تکی وجود داشته باشد و تحلیل‌گر این انرژی کل را در بر گرفته و آن را به عنوان یک خط تک در بسامد مرکزی بلوک نشان می‌دهد.

این امر دارای اهمیت است که تعداد کافی از LOR وجود داشته باشد تا بتوان بین مولفه‌های بسامدی با فاصله نزدیک، تمایز قائل شد و یک پهته بسامدی که شامل همه بسامدهای موردنظر باشد را مورد استفاده قرار داد. به طور معمول، 400 LOR مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما بسیاری از ماشین ها، به تفکیک‌پذیری دقیق تری نسبت به آن نیاز دارند. رابطه زیر به کار می‌رود:

(۱۱)

$$N_{LOR} = f_{\max} / B$$

که در آن:

N_{LOR} تعداد خطوط تفکیک‌پذیری است؛

$f_{\max}$ ماکزیمم بسامد مورد نظر است؛

B پهنای باند (فاصله‌ی بین خطوط) است.

چنانکه رابطه نشان می‌دهد، برای گستره یکسان بسامدی مورد نظر، هرچه تفکیک‌پذیری دقیق‌تر باشد، پهنای باند کوچکتر است.

۴-۳-۵ طول ثبت[5]

تحقق یک تبدیل فوریه تک، نیاز به یک طول ثبت کوتاه، T داشته و طول ثبت مورد نیاز برای یک FFT، به پهنای باند B، به صورت زیر بستگی دارد:

1- Flat Top
2- Bias
3- Lines of resolution
4- Number of lines of resolution
5 - Record

$$T = 1/B \qquad (۱۲)$$

طول ثبت موجود ممکن است تفکیک‌پذیری را محدود سازد. به عنوان مثال، اگر یک طیف، پهنه‌ای برابر با ۱۰۰ هرتز و تفکیک‌پذیری برابر ۴۰۰ خط داشته باشد، پهنای باند، باید برابر ۱/۴ هرتز و طول ثبت باید حداقل ۴ ثانیه باشد. برای همان تفکیک‌پذیری، اگر پهنه با فاکتور مشخصی افزایش یابد، طول ثبت با همان فاکتور کاهش یافته و پهنای باند با همان فاکتور پهن‌تر می‌شود.

اگر یک ماشین در طول یک آزمون، به آرامی تغییر کند، این امر مهم است که بلوک‌ها به اندازه کافی وسیع در نظر گرفته شوند به گونه‌ای که شامل هر مولفه بسامدی مورد نظر در یک بلوک تک باشند. در خصوص یک تغییر بزرگ در سرعت ماشین، لازم است تا از سیگنال در بازه‌های زاویه‌ای ثابت نمونه برداری شده و طیف ترتیبی متوالی مورد پردازش قرار گیرد (به ۴-۲-۱۱ و ۴-۳-۸ مراجعه کنید).

۴-۳-۶ مدولاسیون دامنه (باندهای جانبی)

مدولاسیون دامنه به شکلی که در حوزه زمان دیده می‌شود، در شکل ۴-۲-۳ نشان داده شده است. یک FFT برای یک موج سینوسی مدوله شونده، بسامد موج سینوسی و باندهای جانبی بر روی هر دوطرف بسامد را در فاصله‌ای از آن که برابر با بسامد مدوله شوندگی است، نشان می‌دهد. اگر مدولاسیون، خود یک موج سینوسی باشد، باندهای جانبی مجزا خواهند بود و در هر دو طرف بسامد اصلی فقط یکی ظاهر می-شود. این موضوع می‌تواند زمانی در بسامد یک شبکه دنده‌ها رخ دهد که یکی از دنده‌ها به خارج از مرکز باشد یا ساییده شده باشد. اگر مدولاسیون، متناوب باشد، مثلاً به صورت یک بار بر هر دور، اما سینوسی نباشد، چندین باند جانبی مجزا وجود خواهند داشت، اگر مدولاسیون، متناوب نباشد، باندهای بسامدی، در هم آمیخته [1] و غیرمجزا خواهند بود.

حضور باندهای جانبی در آشکارسازی میله‌های شکسته شده روتور در موتورهای القایی بزرگ و با اندازه گیری مقادیر دسی بل رو به پایین، بسیار سودمند است. دسی بل رو به پایین، L_D، مساوی با ۲۰ برابر لگاریتم نسبت مقدار قله خرابی میله روتور به مقدار بسامد خط است. از نظر ریاضی، این رابطه به صورت زیر است:

$$L_D = 20\lg(l_1 / l_{ref})dB \qquad (۱۳)$$

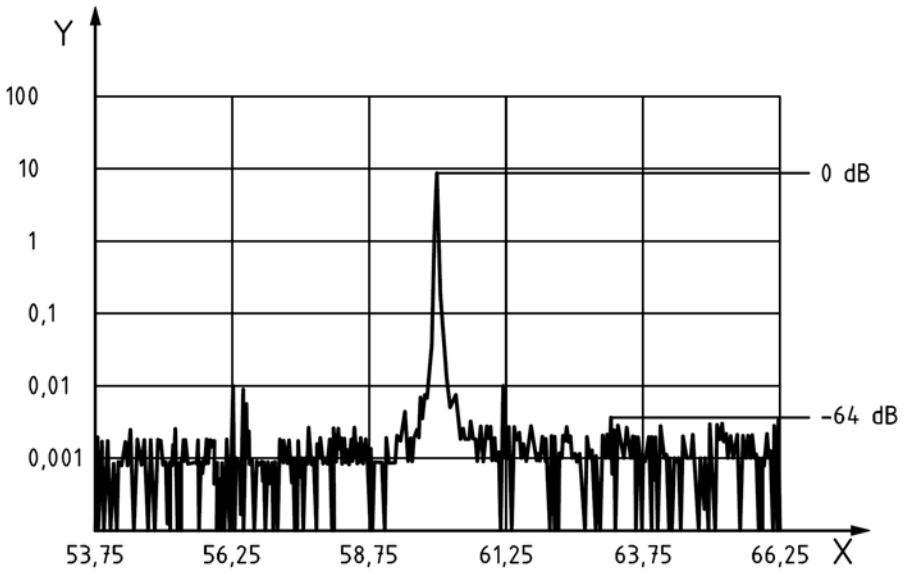
که در آن:

l_1 دامنه باند جانبی است؛

l_{ref} دامنه در بسامد خط است (۵۰Hz یا ۶۰Hz).

همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، طیف یک موتور بدون مشکل، از یک قله مشخص در بسامد خط و باندهای جانبی دارای فواصل مساوی در هر دو طرف تشکیل شده است. بزرگی باندهای جانبی ممکن است بیش از ۶۰ دسی بل پایین‌تر از بزرگی بسامد خط (که در این مورد ۶۰ هرتز است) باشد.

1- Smeared



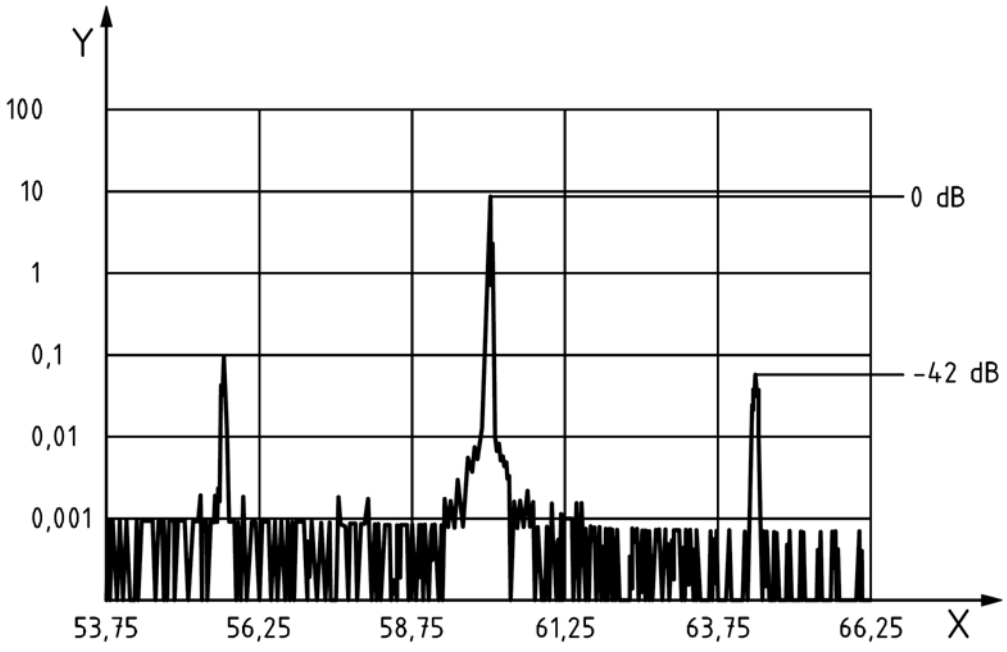
راهنما:

X بسامد، Hz

Y بزرگی

شکل ۱۷- موتور بدون مشکل

شکل ۱۸ یک طیف برای موتوری است که خرابی دارد. در این مورد، یک قله مجزا در بسامد خط و باندهای جانبی بالا آمده در بسامدهای خرابی میله روتور وجود دارد.



راهنما:

X بسامد، Hz

Y بزرگی

شکل ۱۸- موتور دارای خرابی

می توان گفت که ساختار باندهای بسامدی در حوزه بسامد، همان اطلاعات طیف پوش در حوزه زمان را داراست.

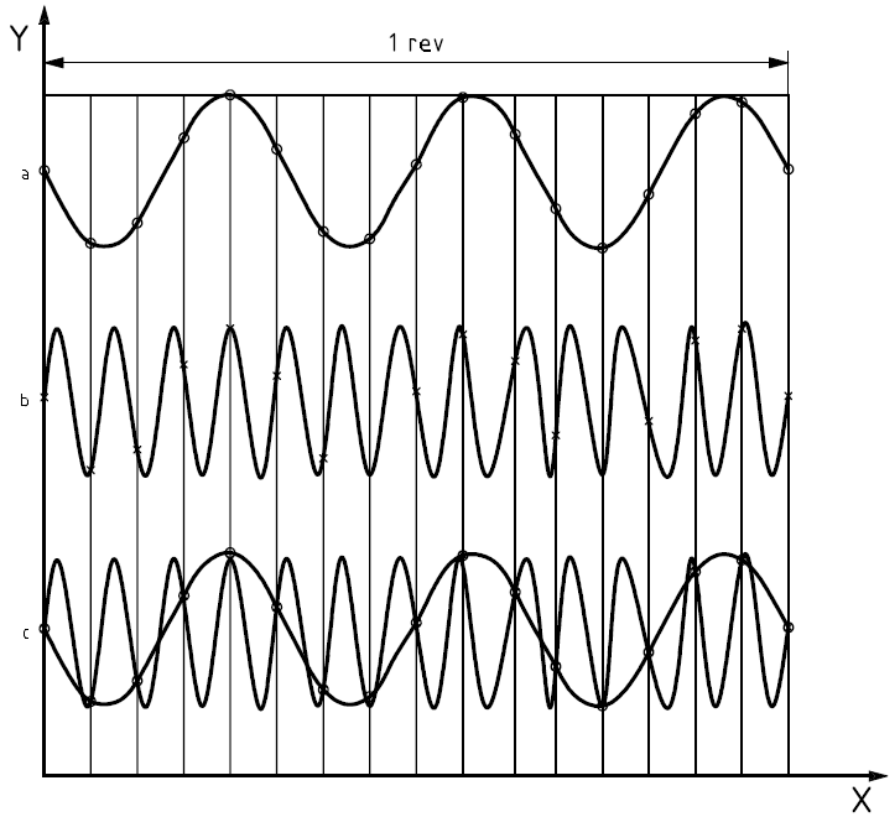
۴-۳-۷ الایزینگ[1]

الایزینگ، نمایش نادرست یک بسامد است که زمانی حاصل می‌شود که نرخ نمونه برداری تحلیل‌گر دیجیتال، برای توصیف آن بسامد به طور مناسب، بیش از اندازه پایین است. این امر بسیار شبیه وقتی است که یک نقطه بر روی یک دیسک، زمانی که بسامد نمونه برداری از یک سیگنال لحظه‌ای [2] دقیقاً مطابق با بسامد دورانی دیسک است، ثابت به نظر برسد. به طور مشابه، اگر یک موج سینوسی، بسیار آهسته نمونه برداری شود، به نظر می‌رسد که بسامد-پایین‌تر است. این موضوع را می‌توان با فیلتر نمودن سیگنال به وسیله فیلتر پایین گذر قبل از نمونه برداری حذف نمود تا تضمین شود که شامل هیچ مولفه بسامدی بالاتر از نصف بسامد نمونه برداری نیست. این موضوع به صورت مشخص در شکل ۱۹ نشان داده شده است. با مقایسه بسامد موج سینوسی بسامد-بالا و بازه نمونه برداری می‌توان نشان داد که بسامد نمونه برداری، پایین‌تر از نصف بسامد سیگنال است. بنابراین سیگنال نقطه چین بسامد-پایین به عنوان یک سیگنال دارای الایزینگ به جای سیگنال اندازه گیری شده واقعی تحلیل می‌شود. به همین دلیل، دامنه‌های نمونه برداری شده (نقاط اتصال علامت زده شده در هر دو منحنی) متناظر با سیگنال اندازه گیری شده بسامد-بالا و همچنین سیگنال الایزینگ بسامد-پایین هستند.

هنگامی که نرخ نمونه برداری، دقیقاً دو برابر حداکثر بسامد مورد انتظار است، آن را به عنوان بسامد نایکوئیست می‌شناسند. در عمل، اغلب نرخ‌های نمونه برداری بیش از دو برابر حداکثر بسامد (حدود ۲٫۵۶ برابر) قرار داده می‌شوند تا فیلتر پایین گذر بدون یک قطع تیز امکان پذیر شود.

امروزه تحلیل‌گرهای دیجیتال، فیلترهای ضد الایزینگ را به کار می‌برند که تمامی بسامدهای بالاتر از ۴۰ درصد نرخ نمونه برداری را قبل از آنکه داده‌های زمانی جمع آوری و به داده‌های دیجیتال تبدیل بشوند، حذف می‌کنند. بنابراین، در بیشتر تحلیل‌گرهای دیجیتال، دیگر الایزینگ یک مشکل نیست. به هر حال توصیه می‌شود تحلیل‌گر قبل از تحلیل داده ها، این امر را تایید نماید.

1-Aliasing
2- Strobe



راهنما:

X	زمان
Y	تحریک
a	تحریک ۳ بر دور
b	تحریک ۱۳ بر دور
c	تحریک ۳ و ۱۳.

شکل ۱۹- الایزینگ

۴-۳-۸ نمونه برداری همزمان

علاوه بر نمونه برداری با یک نرخ ثابت نسبت به زمان، در بسیاری از تحلیل‌گرها، ممکن است برای کنترل نرخ نمونه برداری از یک سیگنال خارجی استفاده شود. به طور معمول، نرخ نمونه برداری، مضربی از بسامد سیگنال خارجی خواهد بود. این امر بیشتر در ماشین‌های دوار مورد استفاده قرار می‌گیرد، جایی که از یک نشانگر دور برای تعیین نرخ نمونه استفاده می‌شود. نرخ نمونه، بیشتر از دو برابر ارتعاش با بالاترین مرتبه مورد نظر خواهد بود. چهار مزیت عمده این روش عبارتست از:

الف) اگر سرعت ماشین تغییر نماید، بیشتر مولفه‌های بسامدی که مربوط به بسامد دورانی (پره، تیغه، شبکه دنده و غیره) هستند، بیش از آنکه انرژی را در بیش از یک بلوک پخش کنند، در همان بلوک بسامدی باقی می‌مانند.

ب) تمام مرتبه‌های ارتعاش، در مرکز بلوک بسامد یعنی جایی که دامنه آن دقیق‌تر اندازه گیری می‌شود، قرار دارند.

پ) میانگین گیری از یک سری مقادیر اندازه گیری دیجیتالی شده بدون در نظر گرفتن تغییرات در سرعت دورانی، امکان پذیر است.

ت) تمامی مرتبه‌های ارتعاش، زاویه فاز برابری نسبت به سیگنال خارجی خواهند داشت. این بدان معناست که می‌توان از طیف به صورت عمودی میانگین گیری کرده و مراتب مقتضی ارتعاش را تقویت نمود، اما این کار باعث می‌شود که میانگین گیری دیگر سیگنال‌های غیرمرتبط با سرعت دورانی، که بیشتر شامل سیگنال‌های نوفه است، به سمت صفر میل نماید.

نتیجه تبدیل فوریه یک سیگنال که به صورت همزمان نمونه برداری شده، طیف ترتیبی X(n) است. مرتبه n=1، مربوط به یک دوره ارتعاش بر هر دور موتور است.

شایان ذکر است که پیگیری مرتبه دیجیتال رویکردی است که در عمل به کار می‌رود (به ۴-۶ مراجعه کنید).

در هنگام میانگین گیری همزمان، توصیه می‌شود دقت شود تا از میانگین گیری خارج از هر گونه سیگنال غیرهارمونیک دارای اهمیت (مثل عدم پایداری یاتاقان) خودداری شود.

۴-۳-۹ میانگین گیری از طیف

بسته به بسامدهای مولفه سیگنال، یک FFT تک، فقط به کسری از یک ثانیه یا چند ثانیه ثبت، نیاز دارد. به هرحال یک سیگنال مدوله شونده ممکن است نیاز به دوره زمانی طولانی تری داشته باشد تا یک دامنه میانگین پایدار به وجود آید.

بنابراین، میانگین گیری از FFTهای پی در پی، یک وظیفه بسیار مهم تحلیل‌گرها است. اگر تنها یک کانال موجود باشد، دامنه‌های مطلق در هر بلوک بدون توجه به فاز، میانگین گیری می‌شوند. میانگین گیری طیف کامل (بخش حقیق و موهومی) نیاز به همزمان سازی هر طیف متوالی به وسیله یک سیگنال محرک وابسته به فرآیند دارد.

فنون میانگیری دیگری نیز وجود دارند، مثل میانگین گیری حوزه بسامد، اما این فن، سریعاً بسیار پیچیده می‌شود و لذا فقط برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به هر حال، بسیاری از تحلیل‌گرها، میانگین گیری نمایی را انجام می‌دهند که در آن FFTها با توابع افزایشی نمایی وزن دهی می‌شوند. و بنابرآن، سیگنال بر حسب جدید ترین داده‌های ثبت شده وزن دهی می‌شود. این فن اغلب در مطالعات ارتعاشات گذرا به کار می‌رود که در آنها دامنه‌ها به صورت نمایی نزولی هستند.

نوع دیگری از میانگین گیری که در تحلیل‌گرها وجود دارد، میانگین گیری قله است. این نوع، حداکثر دامنه در طول یک دوره زمانی از تمام FFTها در بلوک FFT را یافته و آن قله‌ها را نمایش می‌دهد. توجه کنید که هر قله، دامنه میانگین درون ثبت زمانی خود آن است.

۴-۳-۱۰ نمودارهای لگاریتمی (با مراجع dB)

در داده‌های ثبت شده‌ی ارتعاش، معمولاً مولفه‌های بسامدی بسیار، با دامنه‌های بسیار متغیر وجود دارند. بسیاری از این مولفه‌ها دارای دامنه‌هایی کوچک مهم هستند اما هنگامی که با مقیاس خطی رسم می‌شوند، به سختی دیده می‌شوند. یک نمودار لگاریتمی که مولفه‌های بزرگ را فشرده می‌کند و مولفه‌های کوچک را بزرگ می‌سازد، تمام مولفه‌های مهم و همچنین سطح نوفه موجود را نشان می‌دهد. دامنه X، به صورت سطح L بر حسب دسی بل رسم می‌شود:

(۱۴)

$$L = 20\lg(X / X_{ref})dB$$

که در آن X_{ref}، یک مقدار مرجع است.

گاهی اوقات برای شناسایی بهتر یا برای جداسازی مولفه‌های بسامد-پایین، محور بسامد هم با مقیاس لگاریتمی نشان داده می‌شود. واحد دسی بل بر روی محور افقی به کار گرفته نمی‌شود. تفاوت‌ها در دسی بل ها، معادل با نسبت‌ها هستند و مثال‌هایی از آن در جدول ۱ نشان داده شده اند.

جدول ۱- اختلاف‌ها بر حسب دسی بل و برابر نسبت ها

نسبت	اختلاف dB
۱	۰
۲	۶
۱۰	۲۰
۲۰	۲۶
۱۰۰	۴۰
۱۰۰۰	۶۰

نسبت‌های کمتر از یک، با مقادیر منفی دسی بل نشان داده می‌شوند. مثلاً نسبت ۱٫۲، برابر با ۶- دسی بل است.

به جز برای جابجایی، مقادیر مرجع برای سطوح لگاریتمی در ISO1683 مشخص شده اند. برای تحلیل ارتعاش، می‌توان از مقادیر داده شده در جدول ۲ استفاده کرد.

جدول ۲- مقادیر مرجع برای سطوح لگاریتمی

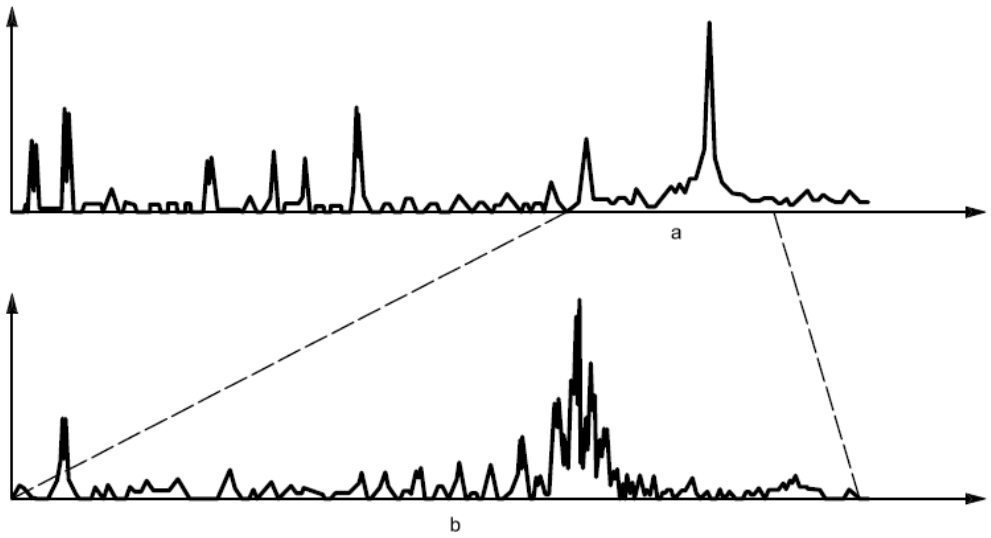
کیفیت	مقدار مرجع
شتاب	$۱۰^{-۶}$ m/s^2
سرعت	$۱۰^{-۹}$ m/s
جابجایی	$۱۰^{-۱۲}$ m
توان	$۱۰^{-۱۲}$ W

۴-۳-۱۱ تحلیل بزرگنمایی[1]

اغلب، مولفه‌های بسامدی بیش از اندازه به هم نزدیک هستند به گونه‌ای که نمی‌توان بر روی یک FFT معمولی که عمدتاً از ۴۰۰ خط (باند پایه) تشکیل شده است، بین آنها تمایز قائل شد. به هر حال موارد دیگری وجود دارد. برخی تحلیل‌گرها، تفکیک‌پذیری بالاتری دارند، اما اغلب طیف بزرگ نمایی شده، برای دستیابی به تفکیک‌پذیری بهتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک تحلیل بزرگنمایی با یک مقیاس بسامدی که از صفر شروع نمی‌شود و شروع آن از بسامد واجد شرایط آزاد دیگری است به صورتی که تعداد انتخابی خطوط برای افزایش گستره بسامدی مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرند. پهنای باند، متناظراً باریک‌تر است. به هر حال، طول ثبت همچنان مرتبط با پهنای باند باقی می‌ماند. یک شکل در استفاده از طیف بزرگنمایی، آن است که بسامدهای به خاطر پهنای باند باریک تر، باید پایدارتر باشند.

یک مثال استفاده از طیف بزرگنمایی، در تحلیل خرابی دنده است. هنگامی که به کار گرفته می‌شود. یک خرابی منجر به باندهای جانبی بسامد شبکه دنده می‌شود و فاصله بین باندهای جانبی، چرخ معیوب را نشان می‌دهد. رویکرد بزرگنمایی مشابهی می‌تواند در شناسایی خرابی‌های موجود در یاتاقان‌های با عناصر غلتنده نیز سودمند باشد. شکل ۲۰، مزایای انجام تحلیل بزرگنمایی را نشان می‌دهد. توجه کنید که مولفه‌های بسامدی که در طیف بزرگ شده اصلی قابل مشاهده نیستند، اکنون قابل دیدن هستند.

1- Zoom analysis



راهنما:

a بخش طیف اصلی

b طیف منتقل شده با تفکیک‌پذیری بیشتر

شکل ۲۰- تحلیل بزرگنمایی

۴-۳-۱۲ دیفرانسیل و انتگرال گیری

دیفرانسیل گیری و انتگرال گیری در تحلیل ارتعاش هنگامی که سیگنال‌ها بین جابجایی، سرعت و شتاب تبدیل می‌شوند، دارای اهمیت است. برای ماشین‌های دوار، سیگنال ارتعاش اغلب تحت تاثیر مولفه همزمان قرار می‌گیرد و لذا می‌تواند حرکت هارمونیک باشد. پس، فرمول زیر در حوزه زمان به شکل زیر خواهد بود:

(۱۵)

جابجایی: $x = \hat{x}.\sin\omega t$

$$v = \omega\hat{x}.\cos\omega t = \hat{v}.\cos\omega t \qquad (۱۶)$$

سرعت:

(۱۷)

شتاب: $a = -\omega^2\hat{x}.\sin\omega t = -\omega\hat{v}.\sin\omega t = -\hat{a}.\sin\omega t$

و

(۱۸)

شتاب: $a = \hat{a}.\sin\omega t$

(۱۹)

جابجایی: $x = -\frac{\hat{a}}{\omega}.\cos\omega t = -\hat{v}.\cos\omega t$

(۲۰)

جابجایی: $x = -\frac{\hat{a}}{\omega^2}.\sin\omega t = -\frac{\hat{v}}{\omega}.\sin\omega t = -\hat{x}.\sin\omega t$

فاز جابجایی ۹۰° عقب‌تر از سرعت و فاز سرعت۹۰° عقب‌تر از شتاب است. برای تبدیل بین کمیت‌ها در حوزه‌ی بسامد، هر دو دیفرانسیل گیری و انتگرال گیری، را می‌توان به ترتیب با تقسیم و ضرب هر مولفه در بسامد زاویه آن انجام داد. بیشتر تحلیل‌گرها، این توابع را برای حوزه بسامد دارند.

تأکید می‌شود که برای استفاده صحیح از فرمول‌های انتگرال گیری و دیفرانسیل گیری، باید به صورت برجسته‌ای (کاملاً) همزمان (سنکرون) باشد. ضروری است تا تعیین این موضوع بررسی شود که مولفه ۱ × ، بزرگتر از ۹۰٪ مولفه فیلتر نشده یا مستقیم باشد. در غیر اینصورت، هر بسامد طیف باید به صورت مجزا تبدیل شود.

۴-۴ نمایش نتایج در حین تغییرات عملیاتی

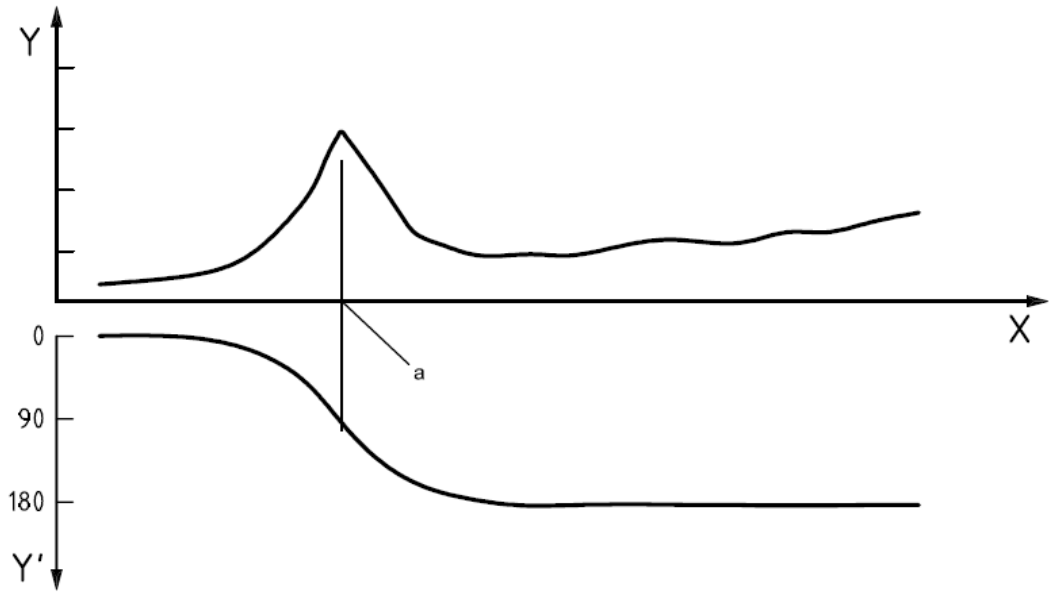
۴-۴-۱ دامنه و فاز (نمودار بود)

هنگامی که یک سیگنال ارتعاش هارمونیک، برحسب دامنه و فاز بیان می‌شود، به سیگنال دومی بعنوان مرجع فاز نیاز است. آن می‌توان یک علامت زننده دور شفت، یک ارتعاش در مقعیت یا جهتی متفاوت، یک نیروی اندازه گیری شده یا برخی مراجع مناسب دیگر باشد. بسامد (های) سیگنال دوم، در ارتباط با بسامد-های مورد نظر باید در نظر گرفته شوند. به عنوان مثال، یک علامت دور زننده شفت را می‌توان به عنوان مرجع فاز برای بسامد دورانی یا هر گونه بسامدهای بالاتر دورانی مورد استفاده قرار داد.

این فاز ممکن است بین ۰ تا ۳۶۰°، یا ۱۸۰°±، نشان داده شود.

هنگامی که دو سیگنال، کمیت‌های مختلفی را نمایش می‌دهند (برای مثال، نیرو، سرعت، شتاب)، باید دقت شود که اهمیت فیزیکی به درستی تفسیر شود. توج داشته باشید که برای هر موج سینوسی، جابجایی ۹۰° از سرعت عقب‌تر و سرعت از شتاب ۹۰° عقب‌تر است. بیشتر اوقات، تجهیزات شکل دهنده سیگنال، فاز سیگنال‌ها را تغییر می‌دهند و بدین صورت تفاوت‌های بین کانال‌ها جبران می‌شود.

دامنه و فاز یک موج سینوسی را می‌توان به عنوان تابعی از زمان رسم کرد. به هر حال، هر گاه دامنه و فاز ارتعاش یک ماشین به ازای سرعت ماشین رسم شود، چنانکه در شکل ۲۱ نشان داده شده است، یک نمودار بود به دست می‌آید.



راهنما:

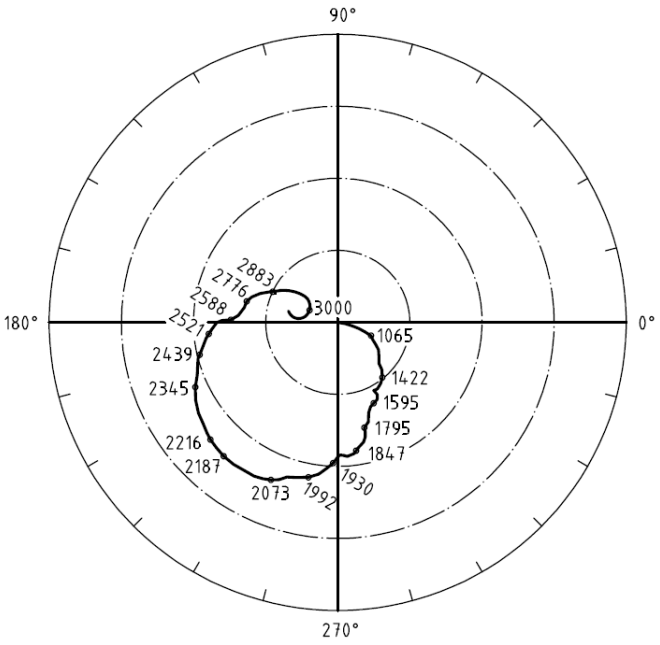
X	سرعت
Y	دامنه
Y′	فاز، درجه
a	تشدید.

شکل ۲۱- دامنه و فاز (نمودار بود)

۴-۴-۲ نمودار قطبی (نمودار نایکوئیست)

در یک نمودار قطبی، هر نقطه، یک بردار دامنه/فاز برای یک بسامد مجزا را به صورتی که در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مشخص می‌نماید. اگر نمودار دارای چندین بردار برای سرعت‌های دورانی مختلف یا دیگر پارامترها باشد، با وصل نمودن خطوطی که نوک‌های آنها را به هم متصل می‌نماید، نموداری موسوم به نمودار نایکوئیست حاصل می‌شود.

یک نمودار قطبی، باید مرجع فاز داشته باشد مثل یک علامت زننده دور شفت که هر ۳۶۰ درجه دوران شفت را نشان می‌دهد. نمودار قطبی (و یا نمودارهای بود)، برای شناسایی دقیق محل (سرعت) هر گونه تشدید سیستم روتور/یاتاقان/پشتیبان مورد استفاده قرار می‌گیرند.



یادآوری – پارامتر سرعت روتور (r/min) است.

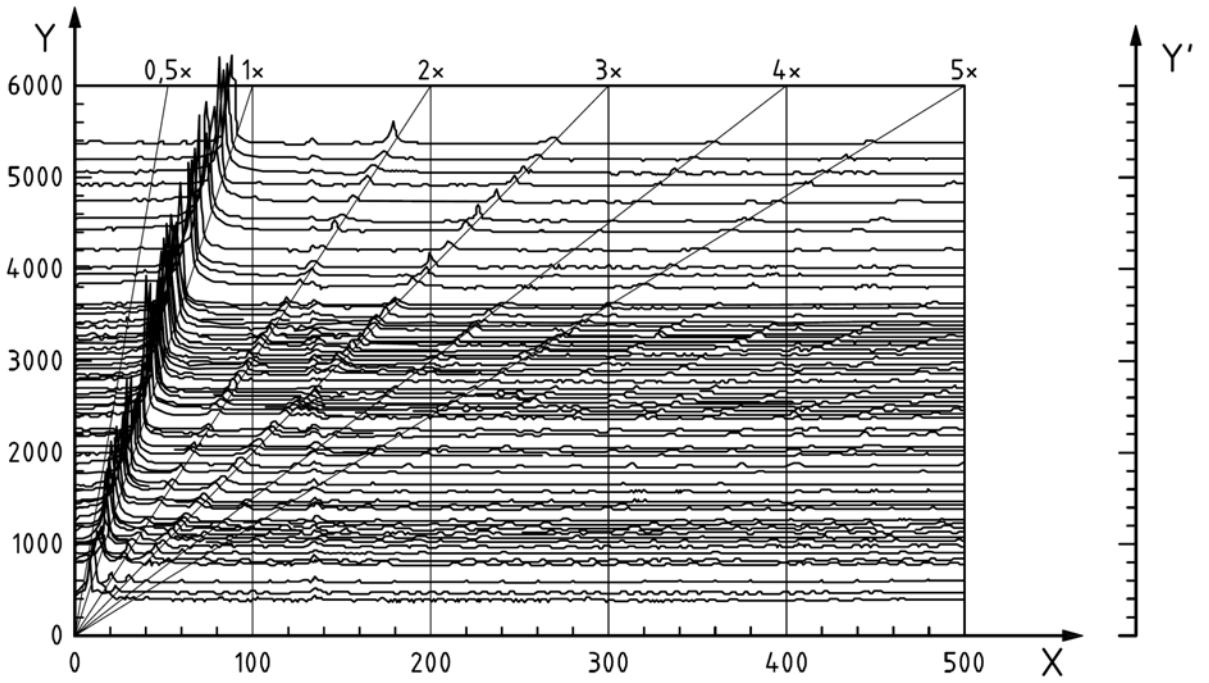
شکل ۲۲- نمودار قطبی (نمودار نایکوئیست)

۴-۴-۳ نمودار کاسکاد (آبشار)

نمودار کاسکاد یا آبشاری، مقایسه‌ای ساده بین چندین تحلیل بسامد را ارائه می‌نماید. این نمودار، یک نمایش شکل سه بعدی از طیف است که به وضوح تغییرات سیگنال ارتعاش که مرتبط با پارامتر دیگری هستند (مثل سرعت، بار، دما، زمان) و برای مقادیر مشخص پارامتری مثل زمان گرفته شده اند را نشان می-دهد.

نمونه طیف کاسکاد که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، تصویر بسیار کلی از طیف‌های ارتعاشی برای یک ماشین در ناحیه راه اندازی/خاموش نمودن است. به طور معمول، نمایش طیف کاسکاد، بسامد (هرتز یا مراتب) را در برابر سرعت دورانی ماشین و دامنه ارتعاشی مولفه‌های بسامدی مجزا ارائه می‌دهد. هرچند در برخی موارد، سرعت ماشین ممکن است با متغیر دیگری (مثل زمان، بار) جایگزین شود که در این صورت، به نمودار آبشاری مشهور است. هنگامی که برای نمایش از سرعت ماشین استفاده می‌شود، ضروری است تا یک سیگنال مرجع دامنه/فاز روتور ثبت شود.

طیف کاسکاد شکل ۲۴، سرعت پایداری روتور (×۱) و هر گونه هارمونیک مهم دیگر را نشان می‌دهد. این شکل همچنین اگر در گستره سرعت گذرا قرار داشته باشیم، حضور سرعت‌های بحرانی روتور را نیز نشان می‌دهد.



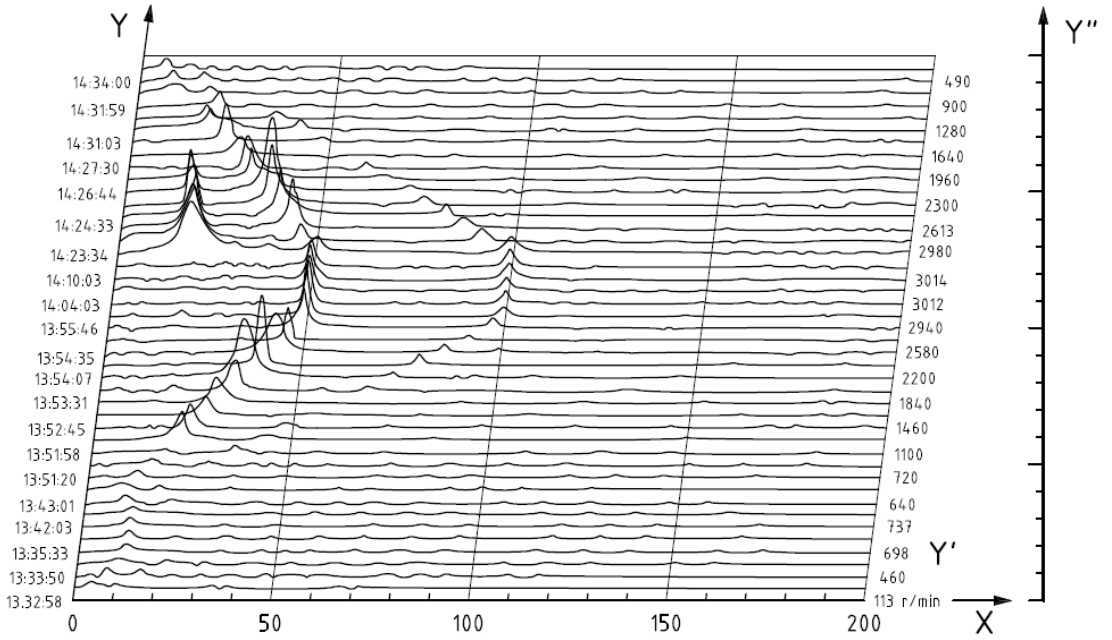
راهنما:

X بسامد، Hz

Y سرعت، r/min

Y′ دامنه

شکل ۲۳- نمودار آبشار (کاسکاد)



راهنما:

X بسامد، Hz

Y زمان تاخیر

Y′ سرعت، r/min

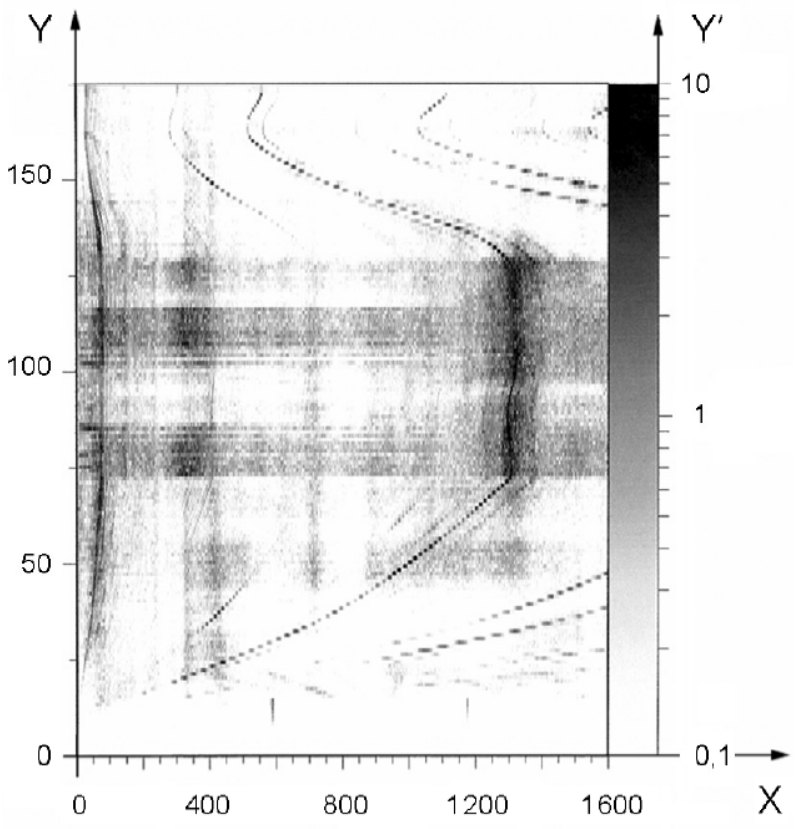
Y′′ دامنه

شکل ۲۳- نمودار کاسکاد توربین

شکل نمودار وابسته به نوع ماشین و عملیات آن تغییر می‌کند. به عنوان مثال، شکل ۲۴، یک نمودار کاسکاد مربوط به یک توربین بخار ۳۰۰۰r/min (۵۰Hz) در حین راه اندازی و خاموش شدن است

برای طیف وابسته به زمان، نمایش جایگزین، استفاده از یک طیف نگار است. این یک نمایش دوبعدی از یک نمودار کاسکاد است که تغییرات سرعت در طول زمان را نشان می‌دهد، اما ارتفاع دامنه را با رنگ‌های مختلف یا با شدت مختلف سایه‌های خاکستری، مشخص می‌نماید (به شکل ۲۵ مراجعه کنید).

یادآوری – مثال شکل ۲۵، ماشین دیگری را غیر از شکل‌های ۲۳ و ۲۴، نشان می‌دهد.



راهنما:

X بسامد، Hz

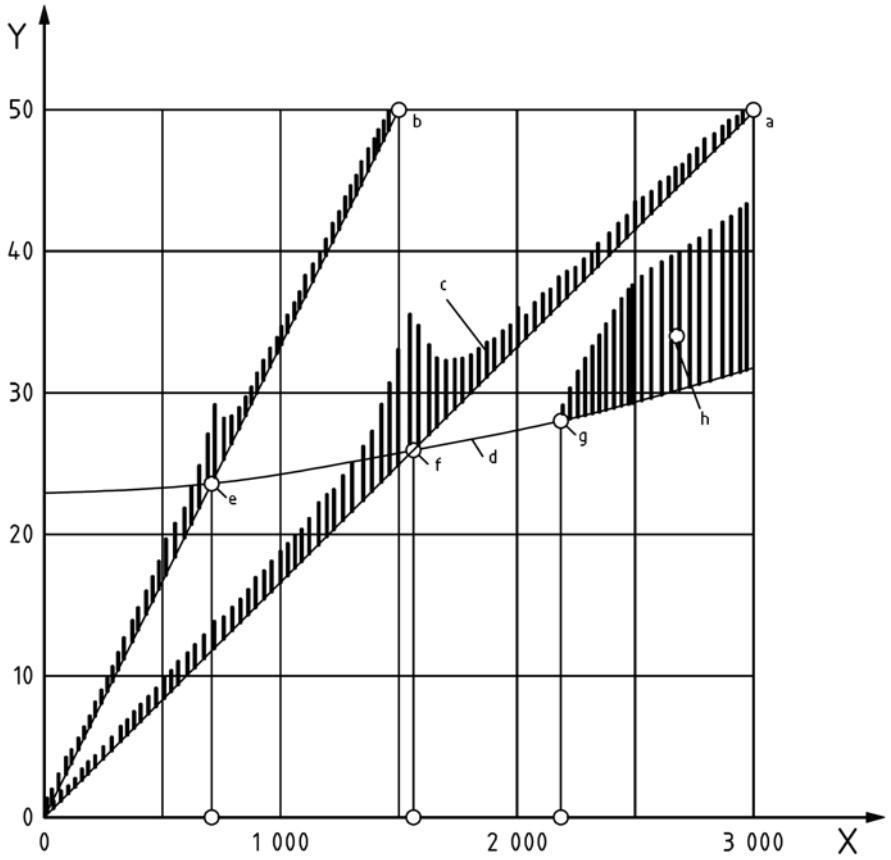
Y زمان، s

Y′ دامنه، m/s^2 (با سایه زنی خاکستری نشان داده شده است).

شکل ۲۵- طیف نگار دو بعدی

۴-۴-۴ نمودار کمپبل

نمودار کمپبل (به شکل ۲۶ مراجعه کنید)، نوع خاصی از نمودار آبشاری است. این نمودار بسامدهای واقعی مولفه‌های بسامدی منفرد، مثل تیغه، پره، شبکه دنده را به سرعت دورانی، مرتبط می‌سازد. دامنه ارتعاش را می‌توان در بعد سوم رسم نمود که بدین ترتیب، با ارتفاع میله‌های متناظر مشخص می‌شود. نمودار کمپبل، به ویژه برای شناسایی ارتعاش طبیعی خودتحریک سودمند هستند.



راهنما:

X	سرعت، r/min		
Y	بسامد، Hz		
a	اولین هارمونیک سرعت	e	سرعت تشدید
b	دومین هارمونیک سرعت	f	سرعت تشدید
c	دامنه.	g	سرعتِ حدی ناپایدار
d	بسامد طبیعی.	h	ارتعاش زیر سنکرون بوجود آمده از ناپایداری روتور

شکل ۲۶- نمودار کمپبل

۴-۵ تحلیل زمان واقعی و پهنای باند زمان واقعی

تحلیل زمان عمل به تحلیلی اشاره دارد که در آن نتایج، همزمان با موقعی که اندازه گیری صورت می‌گیرد، نمایش داده می‌شوند. به عبارت ساده‌تر بدین معناست که داده‌ها همچنان که برای مشاهده مهندس آزمون، ثبت می‌شوند، نمایش داده می‌شوند. اما در این زیربند، مربوط به زمانی است که در کسب داده‌هایی که مورد پردازش قرار می‌گیرند وجود دارد. اگر پردازش یک بلوک داده بیش از زمان کسب آن طول بکشد، نمی‌توان تمام داده‌ها را در همان زمانی که کسب می‌شوند، پردازش نمود و این یک تحلیل زمان عمل نخواهد بود. ممکن است ثبت یک سیگنال و سپس بازخوانی آن از رسانه ذخیره ساز و برخی اوقات به صورت مکرر برای تحلیل آن نیاز باشد. از طرف دیگر، ممکن است از داده‌هایی که بیشتر یا بالاتر از مقدار پردازش شده کسب شده اند، چشم پوشی شود (یعنی موردپردازش قرار نگیرند).

در سیستم‌های آنالوگ، یک نوع معمول تحلیل‌گر زمان عمل، شامل مجموعه‌ای (بانکی) از فیلترهایی است که می‌توانند خروجی‌ها را به طور همزمان نشان دهند. تحلیل‌گرها اکتاو و یا یک سوم اکتاو اولیه از این نوع بودند.

در سیستم‌های دیجیتال، از سیگنال ارتعاش نموده برداری می‌شود تا داده‌های زمان متوالی ثبت شوند و سپس هر داده پردازش می‌شود تا طیف یا دیگر ویژگی‌ها به دست آید. نمونه برداری از داده‌های زمانی، باید قبل از شروع پردازش آن داده کامل شود. اما به هر حال، نمونه برداری از یک داده و پردازش داده قبلی را می‌توان به صورت همزمان انجام داد. اگر نمونه برداری از یک داده زمانی بیش از پردازش داده زمان قبلی طول بکشد، کل سیگنال تحلیل می‌شود و تحلیل به عنوان زمان عمل شناخته می‌شود. اگر پردازش، بیشتر از نمونه برداری طول بکشد، بخش‌هایی از سیگنال از دست می‌روند و تحلیل، زمان عمل محسوب نمی‌شود. تحلیل‌گرهای مختلف، داده‌ها را با سرعت‌های مختلفی پردازش می‌نمایند و پهنه بسامدی ماکزیممی که در آن داده‌ها در زمان عمل پردازش می‌شوند، پهنای باند زمان عمل نام دارد.

برای بیشتر اندازه گیری‌ها ماشین‌های در یک سرعت ثابت، نیازی به تحلیل زمان عمل نیست. اما برای رویدادهای گذرا، شامل راه اندازی و خاموش شدن، پهنای باند زمان عملی که بیش از حد کوچک باشد، می‌تواند منجر به از دست دادن داده‌های مرتبط شود. معمولترین فن برای جلوگیری از این موضوع، ثبت کل رویداد و سپس بازخوانی آن با سرعتی پایین‌تر برای تحلیل است.

۴-۶ ردگیری مرتبه (آنالوگ و دیجیتال)

در هنگام به دست آوردن طیف بسامدی از ماشین ها، اگر سرعت ماشین تغییر کند، به دست آوردن میانگین‌های معنادار، ممکن است مشکل باشد چون انرژی حاصل از یک مرتبه خاص ممکن است در بیش از یک بلوک بسامدی و در سطوح پایین تری نسبت به موقعی که سرعت ثابت است نشان داده شود. با کنترل نرخ نمونه بداری مطابق با سرعت ماشین به وسیله نمونه برداری خارجی (به ۴-۳-۸ مراجعه کنید)، تمام انرژی در مرتبه خاص ارتعاشی، فقط در یک بلوک بسامدی خواهد بود. این کار معمولاً با استفاده از یک سیگنال یک بار بر دور به عنوان ورودی یک به یک تحلیل‌گر سیگنال پویا انجام می‌شود و ردگیری مرتبه نامیده می‌شود.

ردگیری مرتبه، ابتدا با یک فیلتر ردگیری برای حفاظت از الایزینگ و با یک ترکیب کننده نسبت برای تغییر سیگنال r/min به یک بسامد نمونه برداری (۲٫۵ برابر بالاترین مرتبه مورد نظر) انجام شده است. نگرانی نسبت به موضوعات نوفه و درستی، همراه با محدودیت‌های موجود و در نرخ تغییر بر حسب r/min ، منجر به ردگیری محاسبه شده مرتبه شده است که فرآیند را دیجیتالی می‌نماید.

در ردگیری محاسبه شده مرتبه، هر دوی سیگنال ارتعاش و سیگنال r/min، با نرخ نمونه برداری ثابتی دیجیتالی می‌شوند. سیگنال r/min، برای ایجاد نرخ نمونه برداری برای هر دور استفاده می‌شود و سیگنال ارتعاشی در بازه‌های مناسب برای تحلیل مرتبه دورن یابی و نمونه برداری مجدد می‌شود تا یک بسامد نمونه برداری منفرد که مرحله‌ای تغییر می‌کند برای هر دور ایجاد شود یا به وسیله درونیابی چندجمله‌ای یک بسامد نمونه برداری که پیوسته تغییر می‌کند نیز می‌توان ایجاد کرد.

بطوری که در ۴-۳-۸ نشان داده شده است، این فرایند دو مزیت اضافی نسبت به نمونه برداری با مبنای زمانی دارد. همه انرژی برای هر مرتبه، در وسط پنجره هر بلوک قرار داد و بدین ترتیب خطای ناشی از در وسط نبودن که می‌تواند بیش از ٪۱۵ باشد، حذف می‌شود.

مزیت دیگر این است که برای دستیابی به داده‌های میانگین گیری شده با زاویه دورانی یک محور زمانی، اکنون و همچنین در مورد بسامد دوراین غیرپایدار و سپس در پردازش طیف ترتیبی برای فقط ارتعاش در مرتبه‌های r/min امکان پذیر می‌شود. اگر میانگین‌های برداری مورد استفاده قرار گیرد، ارتعاش در بسامد-های دیگر نسبت به r/min فاز ثابتی نخواهد داشت و میانگین به صفر نزدیک می‌شود. طیف ترتیبی را می-توان بدون آمیخته شدن مولفه ها، میانگین گیری کرد

۴-۷ تحلیل اکتاو[1] و اکتاو کسری

یک اکتاو، یک اصطلاح مرتبط دیگر است که بسته به اینکه بسامد در حال افزایش یا در در حال کاهش است، به یک بسامد دوتایی شده یا نصف شده دلالت می‌کند. به عنوان مثال، یک اکتاو بالای ۱۰۰Hz، ۲۰۰Hz خواهد شد در حالی که یک اکتاو زیر ۱۰۰Hz، ۵۰Hz خواهد شد. بنابراین، در حالیکه دسی بل یک واحد خوب و مناسب برای بیان دامنه است، اکتاو روش مناسبی برای بیان نسبت‌های بسامد است. در تفکیک‌پذیری‌های بالا، می‌تواند اکتاوها را به صورت لگاریتمی به اکتاوهای سری تقسیم کرد (به عنوان مثال اکتاوهای یک سوم)

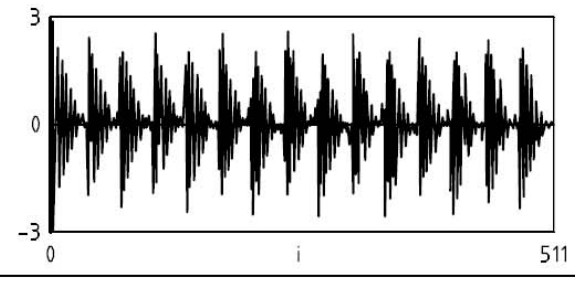
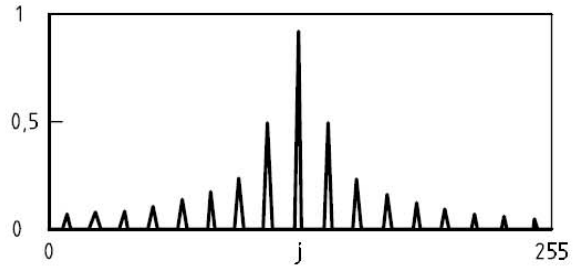
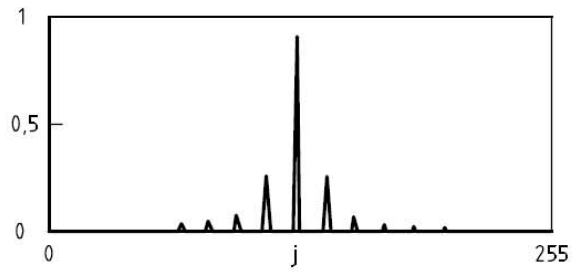
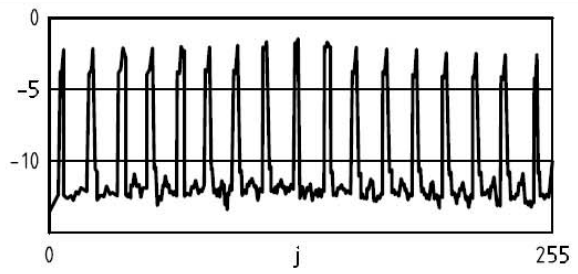
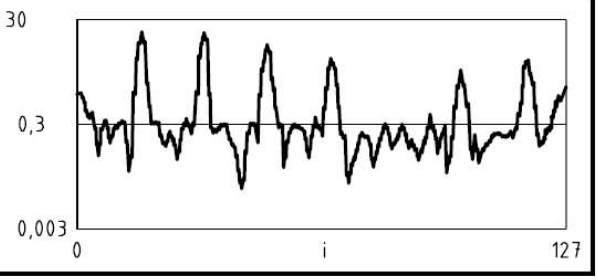
۴-۸ تحلیل سِپستروم[2]

فن تحلیل سِپستروم تبدیل معکوس طیف توانی حسابی- لگاریتمی از داده‌های ارتعاش اندازه گیری شده در حوزه‌ی زمان است. یک سِپستروم به شکل یک طیف نمایش داده می‌شود که دامنه روی محور عمودی قرار دارد و یک شبه‌زمان که کوفرکانس[3] نامیده می‌شود، روی محور افقی قرار دارد. یک سِپستروم طیف یک طیف است. بنابراین یک مولفه مبنا و سری هارمونیک‌های آن به یک مولفه تک کاهش پیدا می‌کند.

سِپستروم بطور ایده آل، برای تحلیل سیگنال‌های پیچیده شامل سری‌های چندگانه هارمونیک مثل سیگنال ایجاد شده بوسیله جعبه دنده‌ها یا یاتاقان‌های عنصر غلتان، مناسب است. توانایی برای جداسازی و بهبود توابع متناوب به گونه‌ای که روابط بین آنها شناسایی شوند، بزرگترین مزیت یک سِپستروم است. برای پیشرفت مرحله به مرحله در تکوین یک تحلیل سِپستروم، جدول ۳ را ببینید.

1- Octave
2- Cepstrum analysis
3- Quefrency

جدول ۳- پردازش سِپستروم

فعالیت	نتیجه	
اندازه گیری تاریخچه‌ی زمانی	سیگنال دیجیتالی شده $x(t)$	
FFT سیگنال دیجیتالی شده	طیف حوزه‌ی نوسان $x(f)$	
مربع بزرگی‌های اجزاء طیف حوزه‌ی نوسان	طیف توان $S_{XX}(f)=X^2(f)$	
محاسبه‌ی ۱۰ برابر لگاریتم طیف نیرو	$10 \lg S_{XX}(f)\ dB$	
معکوس FFT از $10 \lg S_{XX}(f)\ dB$	سِپستروم توان $C_{XX}(t)$	

۵ فنون دیگر

این استاندارد، معمولترین فنون مورد استفاده در انجام پایش وضعیت ارتعاشی با باند باریک و تشخیص‌های ارتعاشی را بیان می‌کند. به هر حال روش‌های دیگر نیز وجود دارند که هنگامی که در موارد خاص به کار روند، می‌توانند برای حل مسائل خاصی بسیار مفید باشند. برخی از این فنون پیشرفته برای اطلاع در زیر فهرست شده اند

- ضریب نوک[1]؛
- تاریخچه‌ی زمان؛
- تابع خود همبستگی؛
- تابع همبستگی متقاطع؛
- کشیدگی؛
- طیف کامل یا مرکب؛
- تبدیل فوریه‌ی معکوس؛
- آشکار سازی بسامد-بالا؛
- روش‌های شدت؛
- تحلیل چند روند (مقادیر r.m.s، اجزائ بسامد، ساعات، زمان تقویمی، سرعت بالا)،
- تحلیل دید قله؛
- اندازه گیری‌های پالس شوک؛
- موجک؛
- تحلیل بردار؛ و
- انرژی اسپایک[2]

1- Crest factor

2- Spike

کتابنامه

[1] ISO 2041, Vibration and shock — Vocabulary
[2] ISO 2954, Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery — Requirements for
instruments for measuring vibration severity
[3] ISO 5348, Mechanical vibration and shock — Mechanical mounting of accelerometers
[4] ISO 7919 (all parts), Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts
[5] ISO 10816 (all parts), Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non- rotating parts
[6] ISO 10817-1, Rotating shaft vibration measuring systems — Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration
[7] ISO 13372, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary
[8] ISO 13373-1, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures
[9] ISO 16063-21, Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer
[10] ISO 18431 (all parts), Mechanical vibration and shock — Signal processing
[11] VDI 3839 Blatt 1, Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen — Allgemeine Grundlagen (Instructions on measuring and interpreting the vibrations of machine — General principles) (Bilingual edition)
[12] VDI 3841, Schwingungsüberwachung von Maschinen — Erforderliche Messungen (Vibration monitoring of machinery — Necessary measurements) (Bilingual edition)
[13] MITCHELL, J. S. An introduction to machinery analysis and monitoring. Pennwell Publishing, 1993