

Conditiemeting : onderhoudsindicator nu en in de toekomst. Deel 1

Citation for published version (APA):

Toersen, H., & Gorter, J. (1991). Conditiemeting : onderhoudsindicator nu en in de toekomst. Deel 1. *Constructeur*, (4), 40-48.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

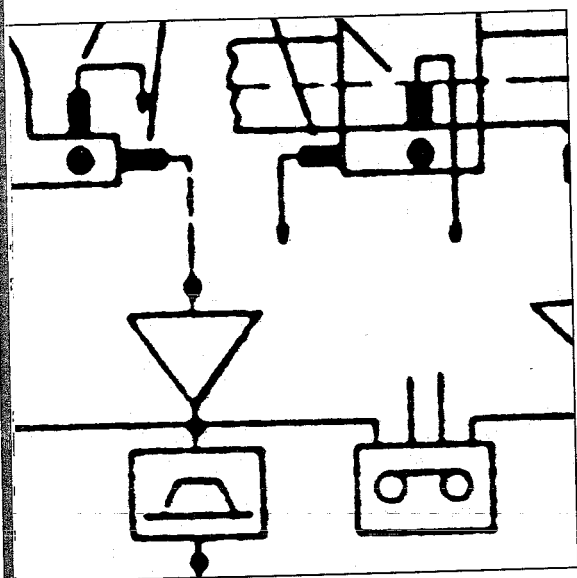
openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Conditiemeting; onderhouds-indicator nu en in de toekomst

(deel I)

Ir J. Gorter, N.V. Nederlandse Gasunie Groningen; Ir H. Toersen, TU Eindhoven



Voor het beoordelen van de conditie van een werktuig, productie-eenheid of technisch systeem is nodig een adequate definitie van het begrip conditie en zijn metingen onontbeerlijk. De beoordeling van de conditie en de daaruit voortvloeiende onderhoudsactiviteiten zijn afhankelijk van de plaats en de prioriteit die het systeem in het totale productieproces inneemt. Voor het uitvoeren van de daartoe benodigde metingen staat momenteel een groot aantal technieken ter beschikking, waarvan een aantal in dit artikel zal worden behandeld.

De keuze van de toe te passen meetmethode vereist kennis van het systeem en om te kunnen meten dient het systeem toegankelijk te zijn. Een essentieel onderdeel van het meten is het interpreteren van de meetresultaten en het leggen van verbanden daar tussen die inherent zijn aan de fysica van het systeem en een uitspraak mogelijk maken over de actuele toestand van het technisch systeem. Een en ander zal geïllustreerd worden met praktijkvoorbeelden uit het Gasunie bedrijf.

Van een productie-eenheid, technisch systeem of werktuig zal men op één of andere manier de conditie willen weten teneinde een gekozen onderhoudsstrategie te kunnen realiseren. De keuze van die strategie wordt, naast financieel-economische en bedrijfsorganisatorische factoren, bepaald door de ter beschikking staande meetmiddelen en meetmethoden. Anderzijds kan gesteld worden dat de ontwikkelingen op het gebied van meetmiddelen en meetmethoden gestimuleerd worden door de behoefte aan meer kennis t.a.v. de conditie.

Relevante vragen die bij het overdenken van conditiemeting een rol spelen zijn: Wat wordt verstaan onder conditie en welke parameters zijn daarvoor maatgevend? Welke parameters kunnen gemeten worden en welke daarvan moeten gemeten worden? Is het technisch systeem toegankelijk voor de uitvoering van die metingen? Hoe moet er gemeten worden en hoe dienen de meetgegevens vastgelegd te worden? Tenslotte: hoe interpreteren we de meetgegevens en hoe dienen ze te worden beoordeeld m.b.t. onderhoudsactiviteiten?

Onder conditie zou men kunnen verstaan de mate waarin het technisch systeem aan de daaraan gestelde eisen voldoet en de verwachting inzake de tijdsduur waarin aan die eisen door het systeem zal worden voldaan. Voor zowel een kwalitatieve als een kwantitatieve beoordeling van de conditie dient men te beschikken over een referentiekader in de vorm van b.v. normen en ervaringen met gelijksoortige systemen; in veel gevallen is bovendien een grondige kennis van de fysica van het systeem nodig.

Conditiebepalende parameters

Aan elk systeem kunnen een aantal conditiebepalende parameters toegekend worden, zoals: druk, temperatuur; massastroom; kracht; spanning; beweging; vervuiling; toerental; geluid; rookgassamenstelling; trilling; slijtage; enz.

Het doel zal steeds zijn zodanige parameters te kiezen dat op eenduidige wijze een toestandsgraad kan worden

bepaald. De waarde van deze grootheid is representatief voor de conditie. In principe zijn voor de meeste parameters meetmiddelen beschikbaar; of een systeem een adequate meting toestaat is echter nog de vraag. Belangrijk is op te merken dat tussen de parameters een fundamentele samenhang kan bestaan. Zo zullen bijvoorbeeld vermogen en rendement afgeleid kunnen worden van een aantal parameters en een beter inzicht geven in de conditie dan de individuele parameters. met andere woorden: 'redundantie' van meetwaarden is, waar mogelijk, aan te bevelen.

Meetmiddelen en meetmethoden

Het zou te ver voeren in dit bestek alle momenteel ter beschikking staande meetmiddelen en meetmethoden te behandelen. Volstaan zal worden met een opsomming van de meest voorkomende middelen en methoden, die in het kader van conditiemeting worden toegepast.

1. Druk

Voor het meten van de druk van het medium in een systeem staan een aantal middelen ter beschikking. Meestal is de druksensor via een korte of lange leiding verbonden met het systeem, hetgeen tot meetfouten aanleiding kan geven, met name wanneer de stroming instationair is. Voor bijvoorbeeld het meten van de cilinderdruk van een zuigercompressor dient de sensor in de cilinderwand gemonteerd te zijn.

Er zijn diverse werkingsprincipes: deformatie (Bourdon-veer, drukdoos, membraan, rekstrook); piëzo-elektrisch; piëzo-resistief. Het frequentiebereik is sterk afhankelijk van het werkingsprincipe en loopt van statisch tot enkele kHz.

2. Temperatuur

Ook hiervoor bestaan een aantal middelen. Principes zijn: uitzetting; elektrische weerstand; thermo-elektrische; infrarood straling.

In het algemeen verlopen temperatuurveranderingen langzaam, zodat de frequentierespons van de temperatuursensor niet groot hoeft te zijn. Meetfouten kunnen ontstaan wanneer onvoldoende aandacht geschonken wordt aan de thermische isolatie tussen sensor en omgeving.

Ten aanzien van infraroodmeting kan opgemerkt worden dat deze in de praktijk relatief weinig toegepast wordt. Een infraroodcamera, geplaatst in een zuigercompressor-gasmotor hal, zou op een kleurenmonitor, voorzien van een referentie kleurenbalk, een absolute temperatuurmeting van het systeem mogelijk maken, maar vooral direct ongewenste of abnormale temperatuurverschillen tussen bijvoorbeeld de diverse cilinders kunnen aangeven.

3. Flowmeting (snelheid, volume- en massastroom)

De volgende principes worden veelal toegepast: Verschildruk (meetschijf; bocht; venturibuis, Pitot-buis).

Impulsoverdracht (turbine meter).

Geluidsgolven (ultrasone flowmeter).

Wervelvorming (vortex meter).

Elektromagnetisme (elektromagnetische flowmeter).

Looptijd van tracer (gassamples; akoestische pulsen; warmte pulsen).

Laser-Doppler anemometrie en convectieve warmteoverdracht (hittedraad) worden niet of weinig toegepast.

De betrouwbaarheid van een flow meting kan sterk beïnvloed worden door stromingsprofielen en instabiliteit.

4. Kracht en spanning

Meestal wordt het rekstrook-principe toegepast. Zowel statische als dynamische belastingen kunnen goed gemeten worden.

5. Koppel

Voor vermogensmetingen aan roterende werktuigen is een koppelmeter noodzakelijk. Hierna zal worden ingegaan op een door Gasunie ontwikkeld meetsysteem voor een gasmotor-zuigercompressor installatie.

Principes berusten op torsiespanningsmeting met behulp van rekstroken in de as en op hoekverdraaiingsmeting tussen twee punten langs de as als gevolg van torsie. Overdracht van signalen van de op de as gemonteerde sensoren vormt meestal een probleem.

6. Toerental

Toerentalmeting is noodzakelijk voor meting van vermogen, onbalans en toerentalfluctuaties. Het meest toegepaste principe berust op meting van de pulshalingsfrequentie, gegenereerd door een oneffenheid op de as die gedetecteerd wordt door een wervelstroomsensor.

7. Beweging, verplaatsing

Beweging of verplaatsing van een systeem of onderdelen daarvan kan gemeten worden met eenvoudige verplaatsingsopnemers. Wanneer het gaat om snelle, pulsformige verplaatsingen wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van contactloze opnemers, bijvoorbeeld wervelstroomopnemers. Ook wordt momenteel gebruik gemaakt van lasertechnieken.

Beweging van kleppen van zuigermachines bijvoorbeeld kan, vanwege de relatief geringe verplaatsingsamplitude, met wervelstroomopnemers goed gemeten worden. Meting van de verplaatsing met grote amplitude van bijvoorbeeld de zuigerstang van een zuiger-machine, is momenteel in de praktijk moeilijk uitvoerbaar, maar wel wenselijk.

8. Vervuiling

In het algemeen is vervuiling wel waar te nemen maar de mate van vervuiling is moeilijk te meten. Men beperkt zich tot visuele inspectie, waarbij voor moeilijk toegankelijke plaatsen een boroscoop kan worden toegepast.

9. Scheurvorming

Toegepaste methoden zijn visuele inspectie, ultrasoon- en röntgenonderzoek.

10. Slijtage

Slijtage kan direct gemeten worden met micrometers, paspennen, voelermaten, enz.

De deeltjes die door slijtage vrijkomen in oliegesmeerde systemen kunnen gevangen worden met de zogenaamde magnetische plug of door de olie te analyseren (b.v. Spectral Oil Analysis Procedure). Olie-analyse kan tevens uitsluitsel geven over te hoge temperaturen.

11. Geluid

In veel gevallen is geluid een uiting van de conditie waarin het systeem zich bevindt. Niet alleen het geluidniveau, maar vooral de frequentie-inhoud ervan verschaft veel informatie over de conditie. Eenvoudige tot geavanceerde geluidmeters met bijbehorende frequentie-analyse apparatuur zijn op de markt verkrijgbaar.

12. Trillingen

Evenals geluid verschaften trillingen een schat aan informatie over de conditie van een systeem. Trillingsmetingen worden bijgevolg op uitgebreide schaal uitgevoerd; daarom zal hieraan een apart hoofdstuk gewijd worden.

Conditiemeting; onderhoudsindicator nu en in de toekomst

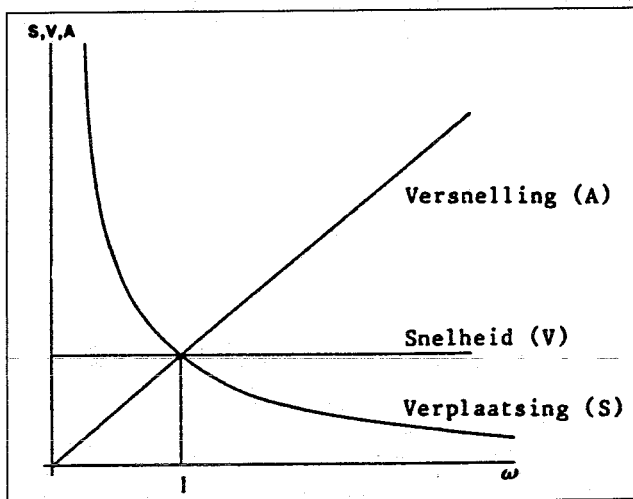
Een aantal van de hierboven genoemde meetmiddelen en -methoden kunnen in de praktijk moeilijk toegepast worden aan een in bedrijf verkerend systeem en worden dus gebruikt bij periodieke inspecties. Een indeling in periodieke en continue metingen zou dus gemaakt kunnen worden.

Trillingsmetingen

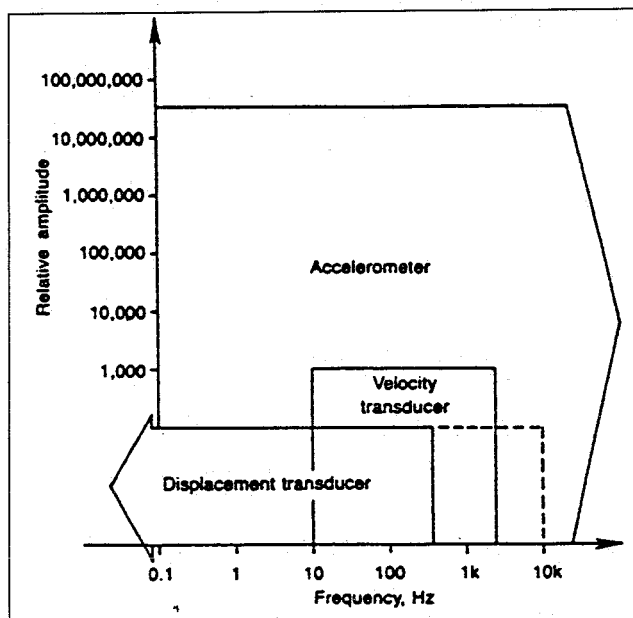
Verplaatsing, snelheid en versnelling

Trillingen worden gepresenteerd in de vorm van verplaatsing (s), snelheid (v) en versnelling (a) en worden gekenmerkt door een amplitude en frequentie. Tussen de amplitudes van een frequentie component (w) bestaat de relatie:

$$A = w \cdot V = w^2 \cdot S \quad (1)$$



Figuur 1. Verband tussen trillingsgrootheden bij constante energie, [1]



Figuur 2. Frequentierespons van trillingsopnemers, [2]

De energie van een trillend voorwerp is evenredig met V^2 . Bij constante energie, dus bij constante V , is de relatie tussen A , V en S zoals gegeven in figuur 1.

Dit betekent dat bij voorkeur voor hoge frequenties de versnelling gemeten zal worden en voor lage frequenties de verplaatsing. Voor de drie genoemde trillingsgrootheden bestaan specifieke opnemers. De frequentierespons van deze opnemers is zeer verschillend, zie figuur 2.

In de praktijk komt het nogal eens voor dat een versnellingsopnemer gebruikt wordt voor de meting van de verplaatsing. Het versnellings signaal wordt dan elektronisch geïntegreerd (d.w.z. gedeeld door w) resp. twee maal geïntegreerd (d.w.z. gedeeld door w^2). Zeer laag-frequente ruiscomponenten zullen derhalve ook deze mathematische bewerking ondergaan en resulteren in hoge signaalsterkte. Oversturing van andere elektronische componenten kan daarvan het gevolg zijn. Door frequentiebandfiltering (high-pass, in dit geval) kan dit probleem voorkomen worden.

Anderszins is het zo, dat hoogfrequente trillingen vaak hoge amplitudes hebben (fig. 1). De gevoeligheid van de versnellingsopnemer moet daarop afgesteld worden, hetgeen weer ten koste kan gaan van de meetbaarheid van de middenfrequente trillingen. Oversturing van de verwerkingselektronica kan vermeden worden door low-pass frequentiebandfiltering toe te passen.

Bij toepassing van piezo-elektrische versnellingsopnemers dient men rekening te houden met de Temperature Transient Sensitivity; dat wil zeggen dat een schijnbaar trillingssignaal ontstaat wanneer de opnemer gemonteerd is op een oppervlak met snel fluctuerende temperatuur (b.v. gasturbines).

Van groot belang tenslotte is de bevestiging van de opnemer. Het komt vaak voor dat de aanwijzing van de opnemer geheel of in sterke mate bepaald wordt door de mechanische resonantie van de bevestigingsstrip of bevestigingsplaat.

Wegens het groot dynamisch bereik en het groot frequentiebereik (fig. 2) worden bij voorkeur versnellingsopnemers toegepast. Frequentiebandfiltering, gevolgd door integratie, geeft dan het gewenste frequentiemeetbereik en de gewenste trillingsgrootheid. Een schema van een vibratiemeetsysteem wordt gegeven in figuur 3.

Naast versnellingsopnemers bestaan ook snelheidsopnemers, waarvan de werking berust op het principe van een massa-veer-dempersysteem. De snelheid van een verend opgehangen spoelkerntje, dat als massa fungeert, wordt omgezet in een inductiespanning, die, voor frequenties, die veel kleiner zijn dan de resonantiefrequentie van het massa-veer systeem, evenredig is met de trilsnelheid.

Verplaatsingsopnemers worden meestal toegepast om de beweging van roterende assen t.o.v. hun lagers te meten. Het principe van deze opnemers berust op wervelstroom-inductie. Het frequentiebereik loopt vanaf 0 Hz (statisch) tot ca 10 kHz.

Voor 'orbit'-analyse, d.w.z. het bepalen van de baan die een roterende as in een lager doorloopt, zijn twee opnemers nodig, geplaatst onder een hoek van 90 graden.

Voor onbalansmeting is verder nodig een z.g.n. keyphazor, dit is een sensor (b.v. van het wervelstroomtype) die een goed gedefinieerde oneffenheid op de as kan detecteren. Uit fasemeting tussen het keyphasorsignaal en de andere verplaatsingsopnemers kan men dan de plaats van de onbalansmassa bepalen.

De signalen van een wervelstroomopnemer kunnen gestoord worden door inhomogeniteiten in de as en bewer-

kingsoneffenheden op de as. Men spreekt dan van elektrische resp. mechanische 'run-out'.

Signaalanalyse

De signalen van trillingsopnemers kunnen op verschillende manieren geanalyseerd worden. De meest voorkomende zullen hierna behandeld worden.

Piek- en Piek-Piek-Detectie

Bij Piek-detectie wordt de maximale positieve of negatieve amplitude en bij Piek-Piek-detectie het verschil tussen de positieve en negatieve amplitude van het signaal gemeten. Deze methode kan goed werken voor signalen die een puls- of naaldvormig karakter hebben (bijvoorbeeld defecte kogellagers of tandwielkasten).

In bepaalde gevallen kan deze methode geen defecten signaleren, zoals in figuur 4 wordt toegelicht. Het gaat hier om een superpositie van bijvoorbeeld een onbalanssignaal (harmonische trilling) en een pulsvormig signaal die een onderlinge vaste fase hebben.

Effectieve waarde (RMS) meting

De effectieve of 'root mean square'-waarde van een signaal $f(t)$ is:

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \{f(t)\}^2 \cdot dt} \quad (2)$$

Stel dat $f(t)$ een samengestelde trilling voorstelt met $f(t) = A_1 \cdot \sin(w_1 \cdot t) + A_2 \cdot \sin(w_2 \cdot t) + \dots$ dan is:
 $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (A_1^2 + A_2^2 + \dots)}$ (3)

Dit betekent dat de relatieve verandering in E altijd kleiner is dan de relatieve verandering in de amplitude van één van de componenten. Een juiste bepaling van de RMS-waarde ('true RMS') is niet altijd eenvoudig. In de vorm van een chip biedt de huidige elektronica daarvoor een oplossing.

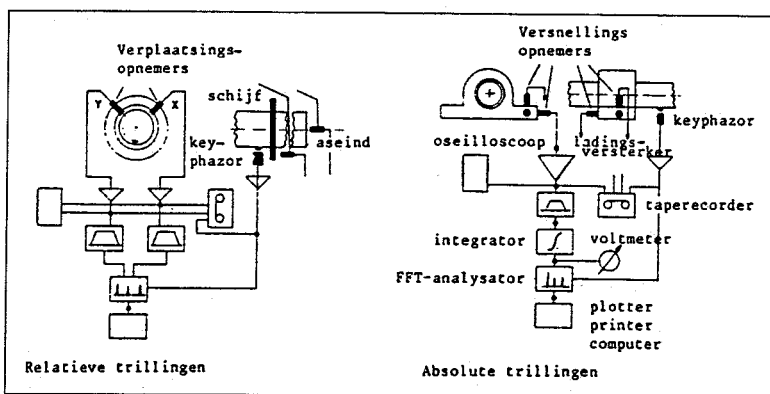
Frequentie- of spectraalanalyse

Met name de frequentie-inhoud van een signaal geeft informatie over de conditie van een systeem en kan gebruikt worden voor een betrouwbare diagnose van de oorzaak van een eventueel defect of een afwijkend gedrag. Frequentiebandfiltering is een klassieke methode om de frequentie-componenten te bestuderen. De ontwikkelingen op het gebied van computertechnieken hebben er toe geleid dat Fourier-analyse van het signaal een veel meer gedetailleerde signaalstudie mogelijk maakt. Is $f(t)$ de te analyseren tijdfunctie van een trilling, dan is de Fourier-getransformeerde daarvan:

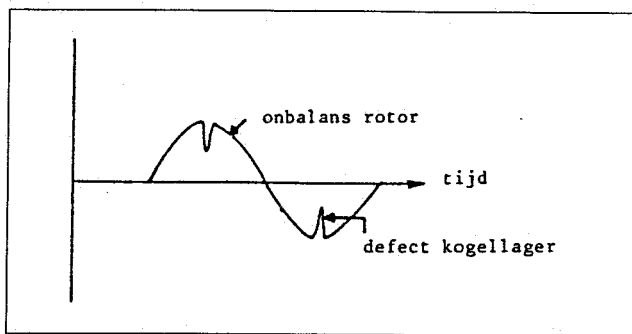
$$F(w) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \cdot \int_{-T}^T f(t) \cdot e^{-j \cdot w \cdot t} \cdot dt \right\} \quad (4)$$

Omdat in de praktijk $f(t)$ gedefinieerd is in een eindig tijd-interval $(0, T)$ is:

$$F(w) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot e^{-j \cdot w \cdot t} \cdot dt \quad (5)$$



Figuur 3. Schema van vibratiemeetsystemen, [1]



Figuur 4. Piek-detectie signaleert geen defect

In discrete vorm ziet de Fouriertransformatie er als volgt uit:

$$F(w) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \{f_n \cdot e^{-j \cdot w \cdot n \cdot \delta t}\} \right] \quad (6)$$

Hierin is f_n de n -de bemonstering van $f(t)$ en δt de tijdsafstand tussen de bemonsteringen.

In de praktijk wordt vaak gesproken over de „Fast Fourier Transform” (FFT), welke berust op een efficiënte manier om de Fouriertermen in (6) te berekenen. Volgens het theorema van Shannon is een frequentiecomponent nog voldoende herkenbaar te bemonsteren wanneer de bemonsteringsfrequentie $2x$ de component-frequentie is. Hogere frequentiecomponenten worden dan herkend als laagfrequente componenten, hetgeen te vergelijken is met een stroboscopisch effect; dit wordt 'Aliasing' genoemd. De consequentie hiervan is dat het signaal gefilterd moet worden met een laagdoorlatend filter met afsnijfrequentie hoogstens gelijk aan de helft van de bemonsteringsfrequentie.

Een digitale frequentie-analyser bemonstert het signaal over een eindige constante tijdlengthe T (record). Aan het begin en het eind van een record treedt dan een discontinuïteit op, die door de analyser getransformeerd wordt in frequentiecomponenten die oorspronkelijk niet aanwezig waren. Dit effect kan voorkomen worden door $f(t)$ te vermenigvuldigen met een zogenaamd tijdvenster met lengthe T en waarvan aan het begin en aan het eind de functiewaarde en de helling gelijk aan nul zijn. Veel toegepast worden het Hanning-venster:

$H(t) = \{1 - \cos(2 \cdot \pi \cdot t/T)\}^2$ en het rechthoekig venster: $R(t) = 1$ voor $0 < t < T$, elders = 0.

Het toepassen van vensters beïnvloedt de frequentie- en amplitude-nauwkeurigheid.

Tenslotte kan nog het zogenaamde „Picket Fence” effect genoemd worden. Als gevolg van de eindige recordlengthe, eventueel vermenigvuldigd met een tijdvenster, wordt een frequentiecomponent als het ware uitgesmeerd over

Condiëtiemeting; onderhoudsindicator nu en in de toekomst

een aantal punten van de frequentie-as. De werkelijke frequentie is gelegen tussen twee frequentiepunten nabij het maximum. In figuur 5 wordt de Fouriergetransformeerde gegeven van de functie $f(t) = A \cdot \sin(w_1 \cdot t)$ vermenigvuldigd

meerkanals uitvoering, zodat twee of meer signalen gelijktijdig gemeten kunnen worden. Dit vergemakkelijkt het opsporen van verbanden tussen de diverse signalen, d.m.v. kruiscorrelatiefuncties.

Verwerking van de meetwaarden

De meetwaarden (piek, piek-piek, rms, FFT) kunnen continu en periodiek verzameld worden. Bij periodieke metingen behoeft uiteraard de meetapparatuur niet permanent op het werktuig aanwezig te zijn. Wel is het belangrijk dat steeds op dezelfde wijze (in sommige gevallen door dezelfde waarnemer) gemeten wordt.

Administratie en archivering van de meetresultaten dient zorgvuldig te gebeuren; vergelijking met vroegere meetwaarden kan veel discussie voorkomen. Bovendien kunnen aldus object-relevante beoordelingscriteria opgesteld worden.

Die criteria kunnen betrekking hebben op alarm- en trip- of shutdown waarden. In vrijwel alle gevallen is het aan te bevelen de meetresultaten te gebruiken voor trend-analyse.

Interpretatie

Interpretatie van de meetresultaten vereist kennis van de fysica van het werktuig of proces. Met name wanneer men gekozen heeft voor frequentieanalyse van de trillingsignalen is de aanwezigheid van kennis voorondersteld.

Uit de frequentiespectra kunnen o.a. de volgende aspecten gediagnostiseerd worden:

- Glijlagerinstabiliteiten (oilwhirl, oilship): frequenties gelegen in de buurt van $0.5 \times N$ (N = toerental frequentie)
- Onbalans: frequentie = N
- Uitlijning: frequenties $1 \times N$, $2 \times N$, $3 \times N$; afhankelijk van het soort uitlijningsfout
- Kogel- en rollager defecten: frequenties afhankelijk van geometrie, aantal kogels of rollen, N en soort defect
- Aerodynamische fouten: frequentie = b.v. schoeppassa-gefrequentie = $N \times$ aantal schoepen
- Mechanische resonantie
- Drukpulsaties
- Kleppedrag
- Torsieresonanties.

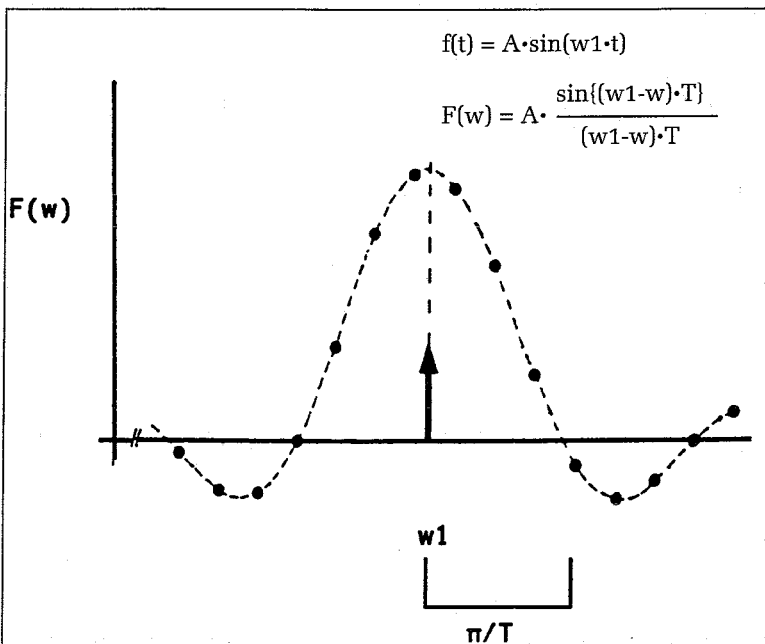
Kennis van het dynamisch gedrag kan verkregen worden uit testbankproeven. De huidige computerfaciliteiten staan bovendien toe m.b.v. „finite element” methoden het dynamisch gedrag tot op zekere hoogte te voorspellen.

Voorbeelden

In het Gasunie-aardgastransportsysteem staan door gasturbines aangedreven centrifugaalcompressoren en door gasmotoren aangedreven zuigercompressoren opgesteld. De gasturbines en centrifugaalcompressoren zijn uitgerust met permanente vibratiebewakingssystemen. Daar de meeste units alleen in de winterperioden behoeven te worden ingezet, er voldoende capaciteit is en veiligheid een hoge prioriteit heeft, heeft men gekozen voor een totaalniveau bewaking met alarm- en shutdownfunctie. Toestandsafhankelijk onderhoud op basis van vibratiemeting is hier vrijwel niet aan de orde. Onderhoud wordt uitgevoerd op basis van het aantal draaiuren. De kwaliteit van het bedienend personeel is van dien aard dat bij proefdraaiën en ook tijdens bedrijf het totaal niveau voor hen een indicatie is voor de conditie van de unit en in twijfel gevallen het laboratorium van Gasunie te hulp geroepen wordt voor het uitvoeren van FFT-analyses en het stellen van een diagnose.

Absolute lagertrillingen vermogensturbine

Van het lager van de power turbine van een 4 MW



Figuur 5. Discrete Fouriertransformatie van een sinusfunctie $f(t)$ en tijdrecordlengte T , [3]

met $R(t)$. De punten zijn de discrete functiewaarden van $F(w)$ berekend door de digitale analyser. Het maximum is niet exact gelijk aan A en de bijbehorende frequentie is niet exact gelijk aan w_1 .

Een FFT-analyser, voorzien van een redelijk groot geheugen, kan een aantal frequentiespectra van een signaal met recordlengte T opslaan. De volgende bewerkingen kunnen nu uitgevoerd worden:

a. Middeling (spectral averaging).

Veelal zijn de vibratiesignalen niet stationair. Om een statistisch verantwoorde uitspraak te doen over amplitude en frequentie is middeling van een aantal spectra gewenst.

b. Waterval (Campbell diagram).

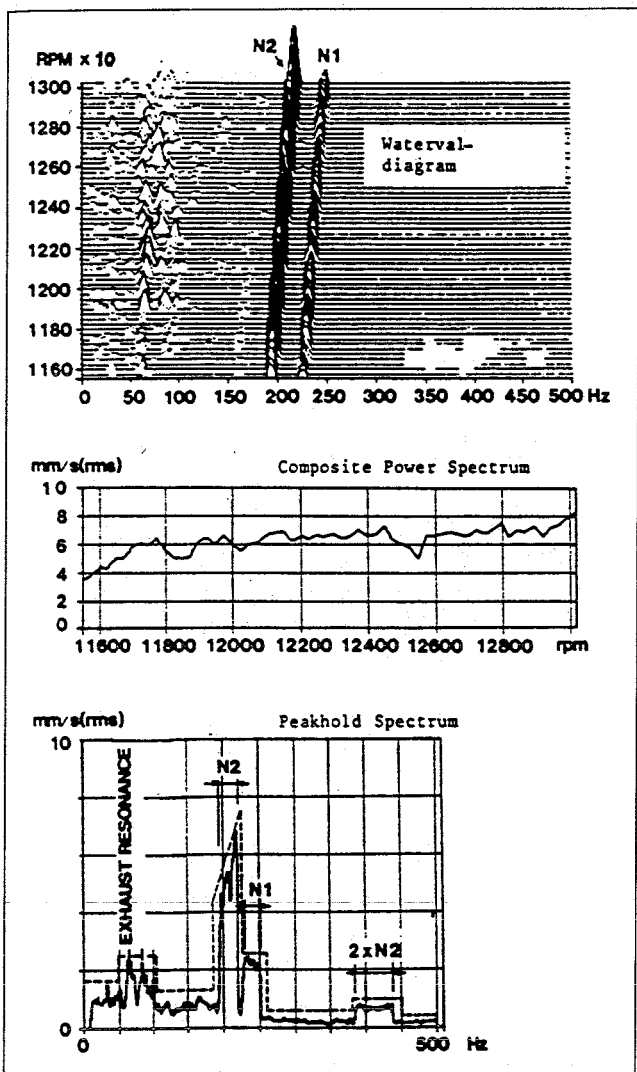
Een aantal achtereenvolgens bepaalde spectra (al of niet gemiddeld) worden achterelkaar gezet als in een kaartenbak op gelijke intervallen van een variabele, waarvoor in de praktijk de tijd of het toerental genomen wordt. Men spreekt dan van 'time map' resp. 'rpm map'. Voor het realiseren van een 'rpm map' moet de analyser voorzien zijn van een triggeringang waarop het signaal van b.v. een keyphazor kan worden aangesloten.

c. Peakhold spectrum.

Bij het maken van een peakhold spectrum wordt het voorgaande spectrum overschreven door het volgende spectrum, met dien verstande dat de hoogste spectraalwaarden onthouden worden.

Veel van de huidige FFT analysers hebben een twee- of

gasturbine werden de absolute lagertrillingen gemeten met een versnellingsopnemer. Na integratie werd het snelheidssignaal met een FFT analyser geanalyseerd. De resultaten worden gegeven in figuur 6. De waterval plot toont het verloop van de frequentiecomponenten als functie van het toerental van de power turbine. Het peakhold spectrum laat zien dat het niveau van de trilling met frequentie gelijk aan N2 (= toerental van de power turbine) significant toeneemt bij toename van N2, hetgeen



Figuur 6. Frequentie-analyses van absolute lagerhuistrillingen van vermogensturbine, [1]

duidt op onbalans. Verder wordt een trilling met frequentie gelijk aan het toerental (N1) van de luchtcompressor/turbine waargenomen en een trilling met frequentie gelijk aan $2 \times N2$ (geringe uitlijningsfout van de power turbine).

Tenslotte zijn er laagfrequente trillingen, waarvan zeker is dat daartoe de mechanische resonantie van de uitlaat behoort. Het Peakhold spectrum geeft een goed inzicht in het vibratiegedrag over het gehele toerentalgebied, en is dus geschikt voor de presentatie van een Base Line, d.w.z. een referentie waarmee latere metingen vergeleken kunnen worden. Men zou nu een profiel of omhullende over het spectrum kunnen leggen, zoals in figuur 6 met de streeplijn is aangegeven. Dit profiel kan men invoeren in een op de FFT-analyser aangesloten computersysteem. Overschrijdt het spectrum voor een bepaalde frequentie het profiel dan wordt dit gemeld door de computer met vermelding van bijvoorbeeld. „Alarm op frequentie;

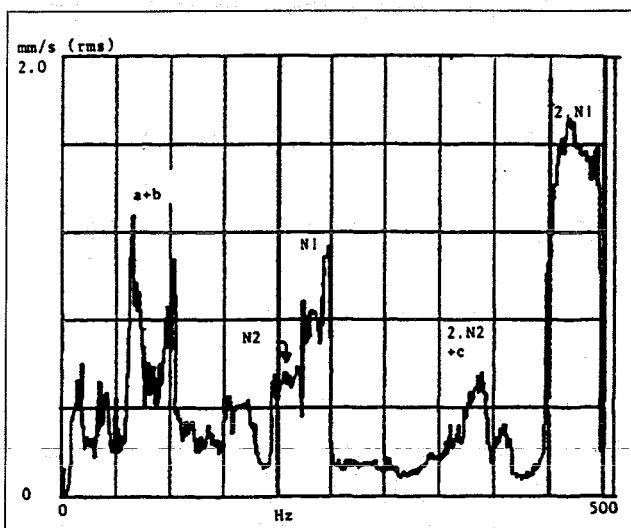
Onbalans”. Het „Composite Power Spectrum” is het totaal niveau als functie van het toerental. Dit is het niveau dat ook zou worden aangewezen door een op het meetsysteem aangesloten RMS-voltmeter.

Defect kogellager

Op 8 juni 1983 werd van een 4 MW gasturbine-centrifugaalcompressor unit de Baseline vastgelegd, d.w.z. dat over het gehele toerental gebied de trillingen van:

- de inlaatluchtcompressor (= gasproducer);
 - de vermogensturbine;
 - de centrifugaalcompressor voor aardgastransport;
- werden gemeten. Hierbij werd de volgende procedure gevolgd:

- * Naast de door de fabrikant geïnstalleerde vibratie-opnemers (in dit geval snelheidsopnemers) werden door ons versnellingsopnemers met een speciale lijmtechniek gemonteerd.
- * Van beide typen opnemers werden de signalen naar hun frequentie-inhoud geanalyseerd en met elkaar vergeleken, teneinde eventuele fouten in het permanente bewakingssysteem te ontdekken.
- * De analyses werden vastgelegd in de vorm van 'RPM-plot', Peakhold spectrum en Composite Power Spectrum.



Figuur 7. Peakhold spectrum van gasproducertrillingen voor N1 = 90% tot 100% en N2 = 74% tot 85%, volgens Baseline d.d. 8 juni 1983

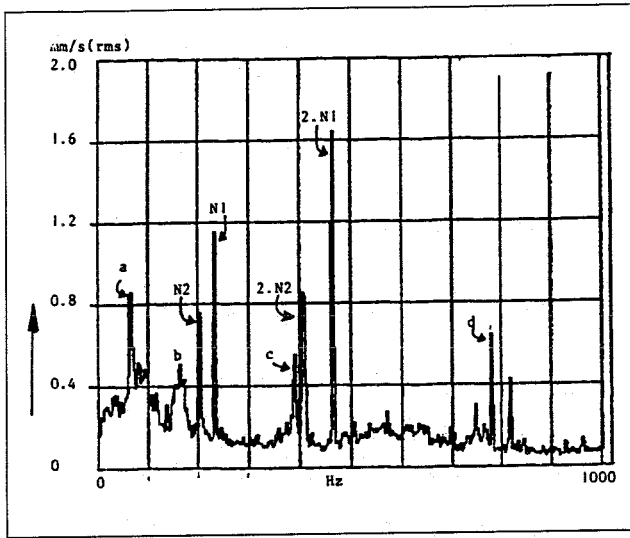
Figuur 7 geeft het Peakhold spectrum over het gehele toerentalgebied van de gasproducer in het frequentiegebied 0 - 500 Hz en figuur 8 geeft een gemiddeld spectrum tussen 0 en 1000 Hz behorend bij een bepaald toerental.

Het toerental wordt gegeven in procenten van het maximum toerental; voor de gasproducer is het maximum toerental $N1(\max) = 15000$ rpm en voor de powerturbine-centrifugaalcompressor is het maximum toerental $N2(\max) = 15730$ rpm.

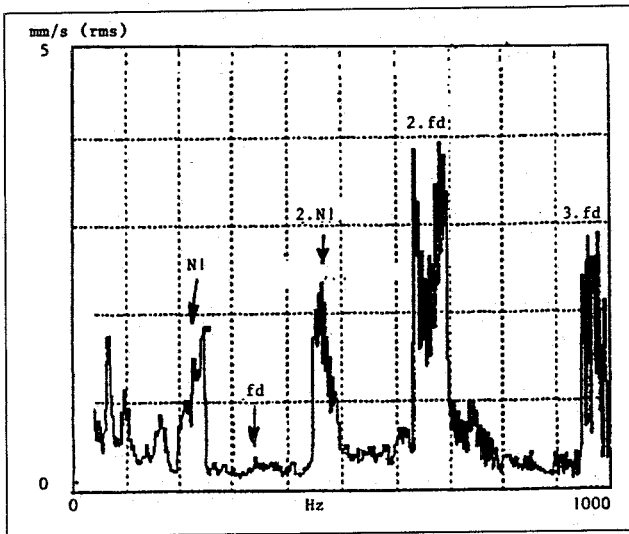
Zoals uit figuur 8 blijkt, is van de meeste frequentiecomponenten de herkomst (bron) bekend.

In oktober 1986 werd door het bedienend personeel een abnormaal geluid waargenomen, dat, op het gehoor afgaand, bij de powerturbine afgestraald werd. Het bewakingssysteem registreerde geen verhoogd totaal trillingsniveau. Naast de permanente vibratie-opnemers werden weer op dezelfde wijze versnellingsopnemers gemonteerd. Figuur 9 geeft het Peakhold spectrum in het frequentiegebied 0 tot 1000 Hz van de gasproducertrillingen.

Condiëmeting; onderhoudsindicator nu en in de toekomst

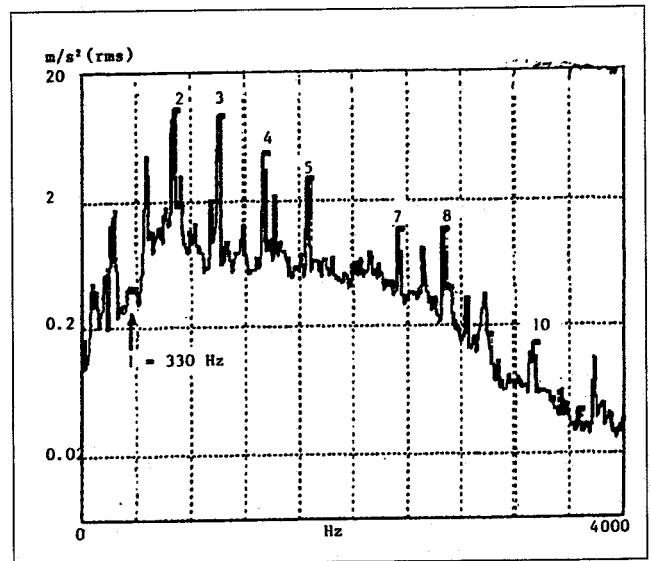


Figuur 8. Frequentiespectrum gasproducervibraties bij $N1 = 94\%$ en $N2 = 78\%$, volgens Baseline d.d. 8 juni 1983.
 $1xN1$ = vibratie op toerental frequentie $N1$ van gasproducer, t.g.v. onbalans rotor.
 $2xN1$ = vibratie op $2x$ toerental frequentie $N1$, t.g.v. uitlijningsfout rotor.
 $1xN2$ = vibratie op toerental frequentie $N2$ van power turbine t.g.v. onbalans.
 $2xN2$ = vibratie op $2x$ toerental frequentie $N2$ t.g.v. uitlijningsfout.
 a = vibratie t.g.v. resonantie uitlaat power turbine.
 b = vibratie t.g.v. luchtinlaat.
 c = vibratie t.g.v. „gear meshing” smeeroliepomp.
 d = harmonische van c.



Figuur 9. Peakhold spectrum van gasproducertrillingen d.d. 6 okt. 1986 bij $N1 = 90\%$ tot 99% . Componenten $2.f.d.$ en $3.f.d.$ niet aanwezig in figuur 8. Oorzaak: defect Duplex kogellager.

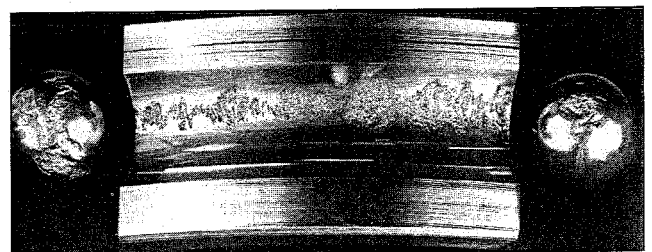
Een vergelijking met figuur 7 is nu niet goed mogelijk omdat figuur 7 het frequentiegebied 0 tot 500 Hz omvat. Gelukkig stond de analyse volgens figuur 8 ter beschikking.



Figuur 10. Frequentiespectrum gasproducervibraties bij $N1 = 95\%$. Vertikale schaal is logarithmisch en in versnellingswaarden. Componenten 2 t/m 10 zijn harmonischen van $fd = 330$ Hz.

Vergelijking van figuur 9 met figuur 8 laat zien dat er trillingen in de frequentiegebieden rond 650 Hz en 970 Hz zijn bijgekomen (in figuur 9 aangegeven met $2.f.d.$ en $3.f.d.$). De oorzaak hiervan diende nu opgespoord te worden. Van het versnellingsopnemersignaal werd bij een bepaald toerental een frequentieanalyse gemaakt in een groot frequentiegebied teneinde na te gaan of er harmonische in het signaal aanwezig waren. Tevens werd daarbij een logarithmische schaalverdeling voor de amplitude gekozen om eventueel zwakke harmonischen beter van de signaalruis te kunnen onderscheiden. Figuur 10 geeft het resultaat. Er bleken veel harmonische aanwezig te zijn met een onderling frequentieverschil van ca. 330 Hz. Dit duidde op een defect van een kogel- of rollager.

Uit onderzoek van de aanwezige lagers bleek de „Duplex Ball Bearing” van de „accessory drive” (voor de aandrijving van oliepompen) de oorzaak te kunnen zijn. Figuur 11 geeft een overzicht van de verschillende lagerfouten met bijbehorende frequenties. Lagerfout nr 5 geeft een grondfrequentie rond 330 Hz.



Figuur 12. Foto van beschadigde binnenring en kogels van Duplex kogellager.

Het vermoeden bestond daarom dat minstens het binnenloopvlak van de Duplex Ball Bearing beschadigd moest zijn. Geadviseerd werd het lager te inspecteren; het resultaat wordt gegeven in figuur 12 en behoeft hier verder geen commentaar.

Gevolgen van signaalintegratie.

Het komt vaak voor dat het signaal van een vibratie-opnemer door het signaalverwerkingssysteem wordt gefilterd en vervolgens geïntegreerd, d.w.z. gedeeld door $w = 2 \cdot \pi \cdot f$. Dit kan leiden tot een niet-adequate bewaking van machintrillingen.

Duplex Ball Bearing

Diameter of inner race (d_1) - 104.78 mm
 Diameter of outer race (d_2) - 133.33 mm
 Diameter of ball (d_3) - 14.28 mm
 Number of balls (n) - 22 balls
 Gear Speed (f_g) - 0.1135 N (N = NGP)
 Number of gear teeth - 106 teeth

Bearing frequencies Calculations

$$D_1 = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \quad D_2 = \frac{d_2}{d_1 + d_2}$$

ALL FREQUENCIES IN HERTZ

FREQUENCY ORIGIN/NGP	100%	99%	98%	97%	96%	95%	94%	93%	92%	91%
1. Rotational frequency (Fr)	28	28	28	28	27	27	27	26	26	26
2. Element spin frequency fr = fr D ₁ (d ₂ /d ₃)	117	115	114	113	112	111	110	108	108	106
3. Element train passage frequency = fr D ₁	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11
4. Rough spot on element frequency = 2 fs	223	231	229	226	224	222	219	217	215	212
5. Rough spot on inner race = fr nD ₂	350	346	343	339	336	332	329	325	322	318
6. Rough spot on outer race = fr nD ₁	275	272	269	267	264	261	258	256	253	250

Figuur 11. Foutenoverzicht met bijbehorende frequentiecomponenten van Duplex kogellager

Als voorbeeld kan genomen worden de hiervoor behandelde trillingsmeting.

Het signaal van snelheidsopnemer voor de permanente vibratiebewaking wordt in het verwerkingssysteem eerst door een 80 Hz hoogdoorlatend filter gefilterd en vervolgens geïntegreerd naar verplaatsingswaarden. Het totaalniveau wordt afgelezen op een voltmeter.

Volgens figuur 8 zijn de frequentie-componenten na filtering: b, N2, N1, c, 2·N2, 2·N1, 2·fd, d, 3·fd. Neem aan dat alleen N1, 2·N1, 2·fd en 3·fd aanwezig waren. We willen nu nagaan in welke mate de kogellagerbeschadiging heeft bijgedragen in het totale niveau voor en na het optreden van de beschadiging.

Is V de snelheidsamplitude in mm/s(rms) van een frequentie-component f, dan is de bijbehorende verplaatsingsamplitude: $S = 1000 \cdot V / (2 \cdot \pi \cdot f) \mu\text{m(rms)}$.

Aan de hand van figuur 9 kan nu het volgende overzicht gemaakt worden:

- 1·N1 f = 240 Hz V = 1.8 mm/s(rms) S = 1.20 μm(rms)
- 2·N1 f = 480 Hz V = 2.3 mm/s(rms) S = 0.76 μm(rms)
- 2·fd f = 650 Hz V = 3.5 mm/s(rms) S = 0.86 μm(rms)
- 3·fd f = 950 Hz V = 3.0 mm/s(rms) S = 0.50 μm(rms)

Zonder beschadiging zijn de totaalniveaus:

$$V1 = \sqrt{1.8^2 + 2.3^2} = 2.92 \text{ mm/s(rms)}$$

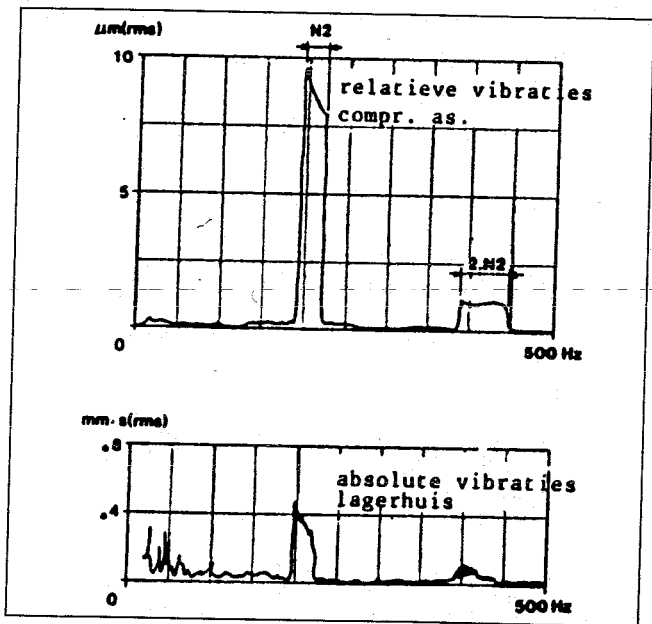
$$S1 = \sqrt{1.2^2 + 0.76^2} = 1.42 \mu\text{m(rms)}$$

Met beschadiging zijn de totaalniveaus:

$$V2 = \sqrt{2.92^2 + 3.5^2 + 3.0^2} = 5.5 \text{ mm/s(rms)} = 1.9 \cdot V1$$

$$S2 = \sqrt{1.42^2 + 0.86^2 + 0.5^2} = 1.73 \mu\text{m(rms)} = 1.2 \cdot S1$$

Hieruit volgt dat de lagerbeschadiging vrijwel niet op basis van verplaatsingswaarden gedetecteerd kon worden maar wel op basis van snelheidswaarden.



Figuur 13. Verskil tussen relatieve asvibratie- en absolute lagerhuisvibratiemeting, [1].

Normen voor trillingsbeoordeling van roterende werktuigen

Voor de beoordeling van trillingsniveaus zijn normen opgesteld, die ontleend zijn aan ervaringsinventarisaties en fysisch inzicht. Tabel 1 geeft een overzicht van de veel toegepaste normen. Zoals reeds eerder werd opgemerkt is het aan te bevelen na te gaan of men beoordelingscriteria kan opstellen, gebaseerd op eigen ervaring. Voor de gebruiker kunnen normen van veel nut zijn bij het opstellen van specificaties.

Heeft men eenmaal gekozen voor een absolute lagerhuisvibratiemeting of voor een relatieve asvibratiemeting dan

wil dat nog niet zeggen dat een te hoog niveau gemeten door het ene type meting ook inhoudt dat het andere type meting een te hoog niveau zal aangeven. Dit wordt geïllustreerd in figuur 13, waar de frequentiespectra van simultaan gemeten absolute lagerhuistrillingen en relatieve as-trillingen van een aardgascompressor worden gegeven. Het maximale niveau van de absolute meting is 0.4 mm/s(rms) en valt volgens de VDI-2056 en de ISO-2372

OVERZICHT NORMEN.

I. VDI 2056, oktober 1964.

	Groep K	Groep M	Groep G	Groep T
0.7	goed	goed	goed	goed
1.12	bruikbaar	bruikbaar	bruikbaar	bruikbaar
1.8				
2.8	toelaatbaar	toelaatbaar	toelaatbaar	toelaatbaar
4.5	ontoelaatbaar	ontoelaatbaar	ontoelaatbaar	toelaatbaar
7.1				
11.2	ontoelaatbaar	ontoelaatbaar	ontoelaatbaar	toelaatbaar
18.0				
mm/s(rms)				ontoelaatbaar

- Opmerkingen:
- Betreft absolute lagerkap- of lagerstoel-vibraties.
 - Globale omschrijving van de groepen:
 Groep K: Machines tot 15 kW.
 Groep M: Middel grote machines (elektromotoren van 15 tot 17.5 kW). Degelijk gemonteerde machines (tot 300 kW) op speciale fundaties.
 Groep G: Krachtwerktuigen en grote machines met roterende massa, gemonteerd op stijve en zware fundatie. Stijf in de richting van vibratiemeting.
 Groep T: Als G, maar gemonteerd op fundaties die slap zijn in de richting van de vibratiemeting (b.v. gasturbines).
 - VDI 2056 komt overeen met ISO 2372-1974(E)

Tabel 1

norm onder de kwalificatie 'goed' (tabel 1). Echter het maximum van de relatieve meting is 10 µm(rms) bij f = 200 Hz, dus N = 12000 rpm.

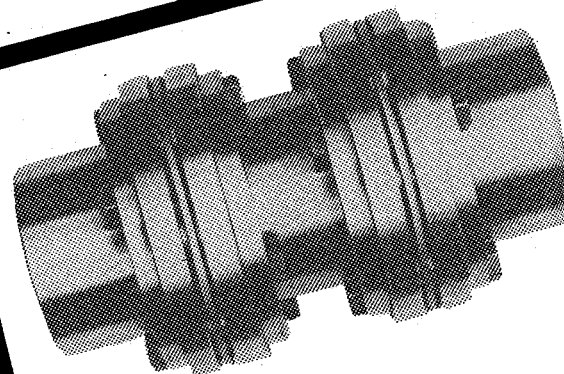
Volgens de API-617 is het maximaal toelaatbare niveau: $S(\max) = \sqrt{(12000/12000)} = 1 \text{ mil(pp)} = 25,4 \text{ µm(pp)} = 8.9 \text{ µm(rms)}$ en bijgevolg zou de compressor afgekeurd moeten worden.

Volgens VDI-2059 geldt voor de beoordeling 'goed': $S(\max) = 2400/\sqrt{12000} = 22 \text{ µm(p)} = 15.5 \text{ µm(rms)}$ en bijgevolg zou de compressor goedgekeurd worden.

Opgemerkt moet worden dat een absolute meting inzicht geeft in de wijze waarop de compressor is gefundeerd en in de massaverhouding van rotor en stator. Bij een relatieve asvibratiemeting wordt alleen gekeken naar de massa van de rotor. De VDI-2056 (=ISO-2372) en API-617 (VDI-2059) mogen in principe niet met elkaar vergeleken worden. Een vergelijking is mogelijk na een zorgvuldige analyse van de dynamica van rotor, lageringen, stator, en fundatie. *(wordt vervolgd)*

Bovenstaand artikel is gebaseerd op een voordracht die de auteur heeft gehouden tijdens het afscheids-symposium van prof. dr. ir. A.L. van der Mooren, getiteld „Twintig jaar vooruitgang in het onderhoud”, dat op 23 november 1990 werd gehouden onder auspiciën van de NVDO, Vereniging t.b.v. Technische en Onderhoudsdiensten.

Thomas in mini en maxi



THOMAS PLUS flexibele draaistarre koppelingen.
 Grotere koppels en hogere toerentallen bij gelijke afmetingen.

- in diverse naaf/flens uitvoeringen
- met iedere gewenste 'spacer' lengte
- geheel in roestvrij staal leverbaar
- ook in miniaturuitvoering met buitendiameters vanaf 12,7 mm.

BSD programma:
 Elektromagnetisch, hydraulisch en pneumatisch schakelbare koppelingen en remmen.
 Vrijloopkoppelingen en terugloop sperren.
 Hoogelastische en draaistarre koppelingen.
 Maximaal koppelingen.



handels- en ingenieursbureau
bakker & Co bv
 aandrijftechniek

Postbus 1235, 3330 CE Zwijndrecht.
 tel. 078 - 101666, fax 078 - 100462, telex 20504.

Vul in nr. A 0205 voor meer informatie