

**Kalle Fagerman**

**Laakerien jatkuvatoiminen kunnonvalvonta  
värinäanalyysillä**

Insinöörityö

25.5.2010

Ohjaaja:

palvelupäällikkö Sami Nyman

Ohjaavat opettajat:

lehtori Jari Olli

lehtori Raisa Vartia

Tekijä Otsikko	Kalle Fagerman Laakerien jatkuvatoiminen kunnonvalvonta värinäanalyysillä
Sivumäärä Aika	77 sivua 25.5.2010
Koulutusohjelma	automaatiotekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaavat opettajat	palvelupäällikkö Sami Nyman lehtori Jari Olli lehtori Raisa Vartia
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää laakerien jatkuvatoimisen kunnonvalvonnan toiminnan ja hyödyntämisen perusteet prosessiteollisuuslaitoksen paineilmatuotannossa, jossa kunnossapidosta vastaa Sarlin Oy Ab. Laitoksen neljässä ruuvikompressorissa oli sähkömoottoreiden laakereille asennettu mikromekaaniseen kiihtyvyyssmittaukseen perustuva diagnostiikkajärjestelmä. Tarkastelun pohjalta oli tarkoitus laatia ehdotuksia kunnonvalvonnan tehostamiseksi.</p> <p>Suurin osa tehdystä selvitystyöstä toteutettiin tutustumalla aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen. Työssä perehdyttiin luotettavuuskeskeisen ja kokonaistuottavan kunnossapidon periaatteisiin sekä teollisuuden kunnonvalonnassa käytettäviin mittausten menetelmiin, laakerien kulumiseen vaikuttaviin tekijöihin, spektrianalyysiin ja siihen liittyvään matemaattiseen taustaan, konevärähtelyjen fysiikkaan, mittaustekniikkaan, analyysimenetelmiin ja standardeihin. Erityisesti käytiin läpi PSK Standardisointi ry:n aiheeseen liittyviä standardeja. Myös prosessiteollisuuslaitoksen kunnonvalvontahenkilöstöä haastateltiin.</p> <p>Kirjallisuuslähteissä ollutta tietoutta sovellettiin kompressorien laakerien kunnonvalvontajärjestelmän diagnostiikkayksikön valvonta-asetusten suunnitteluun. Valvontajärjestelmään tehtiin uusi diagnostiikkakonfigurointi, jossa mitataan tärinän yleistason lisäksi myös huippuarvojen ja tehollisarvojen amplitudeja laakerien eri osien ominaistajuuksilla, kaistanpäästösuodatetun ja demoduloitun signaalin amplitudeja laakerien ominaistajuuksilla, aikataason signaalin huippuarvoja, epätasapainoa, väljyyttä ja linjausvirhettä.</p> <p>Jatkokehitysehdotuksina esitettiin anturien määrän lisäämistä diagnostiikkayksikköihin, niiden yhdistämistä laitoksen Ethernet-verkkoon ja valvonnan parempaa huomioon ottamista valvomossa.</p>	
Hakusanat	värinäanalyysi, diagnostiikka, kunnonvalvonta, verhoikäyrä, laakerit, FFT

## Helsinki Metropolia University of Applied Sciences    Abstract

Author Title	Kalle Fagerman Continuous bearing condition monitoring with vibration analysis
Number of Pages Date	77 25 May 2010
Degree Programme	Automation Technology
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisors	Sami Nyman, Service Manager Jari Olli, Lecturer Raisa Vartia, Lecturer
<p>The aim of this thesis was to find out methods to improve the continuous bearing condition monitoring system installed in an industrial process plant where Sarlin Oy Ab had a service contract on the compressed air production system. There were four air screw compressors where Sarlin had commercial electronic vibration diagnostic units installed.</p> <p>The total number of the diagnostic units installed was eight. The problem was that there was so little knowledge about that system and its usage that it was practically useless. Sarlin hoped that the system could be integrated to their control and human-machine interface system much better than it was at the beginning of this thesis project.</p> <p>Literary research was made to build the theoretical and practical foundations to solve the research problem. Information was searched for in various sources since the subject involved quite an interdisciplinary approach.</p> <p>After finding enough information about the subject, some suggestions were made to improve the condition monitoring system. These included making a new configuration to the system to improve fault detection, connecting the diagnostic system to the Ethernet network, extending the vibration monitoring system from electric motors to cover compressors also by adding some more accelerometers and some improvements to the human-machine interface related to condition monitoring.</p>	
Keywords	vibration, diagnostics, maintenance, bearing, envelope, FFT

# Sisällys

## Tiivistelmä

## Abstract

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Teollisuuden kunnossapito</b>	<b>8</b>
2.1.	Kunnossapidon kehittymisen sukupolvet	8
2.2.	Nykyaikainen kunnossapitoajattelu	10
<b>3</b>	<b>Koneiden kunnonvalvonnan mittausmenetelmät</b>	<b>12</b>
3.1.	Värähtelymittaukset	12
3.2.	Lämpötilamittaukset	17
3.3.	Kulumishiukkasanalyysi	18
3.4.	Hyötysuhdemittaukset	19
3.5.	Epätahtimoottereiden virta-analyysi	19
<b>4</b>	<b>Laakerit ja laakerivauriot</b>	<b>21</b>
4.1.	Laakerityypit	21
4.2.	Vierintälaakerien kulumisen tekijät	21
4.2.1.	Laakerivaurioiden yleiset syyt	21
4.2.2.	Laakerien nimelliset kestoiät	22
4.2.3.	Laakerien voitelu	24
4.2.4.	Laakerivirrat	26
4.3.	Vierintälaakerien ominaistajuudet ja viat spektritarkastelussa	26
<b>5</b>	<b>Fourierin menetelmät ja FFT-algoritmi</b>	<b>29</b>
5.1.	Fourierin sarja	29
5.2.	Fourierin muunnos	30
5.3.	Diskreetti Fourierin muunnos ja FFT-algoritmi	31
<b>6</b>	<b>Värinäanalyysi</b>	<b>33</b>
6.1.	Koneiden ja rakenteiden värähtelyt	33

6.2.	Värinän mittaaminen	35
6.2.1.	Värinämittausten anturityypit, suureet ja yksiköt	35
6.2.2.	Kiihtyvyyden kapasitiivinen massa-jousimittaus	37
6.2.3.	Värinämittauksen mittauspisteet ja anturin kiinnitys	39
6.2.4.	Mittaustiedon digitalisointi	41
6.3.	Värinän aikataason analyysi	42
6.3.1.	Yleistä aikataason valvonnasta	42
6.3.2.	PeakVue-analyysi	43
6.3.3.	Standardin mukaiset tunnusluvut	43
6.3.4.	Käyryysluku, kurtosis-arvo ja huippukerroin	45
6.4.	Värinän spektrianalyysi	46
6.4.1.	Yleistä spektrivalvonnasta	46
6.4.2.	Painotusikkunat ja spektrin keskiarvoistus	48
6.4.3.	Kepstrivalvonta	49
6.4.4.	Vektorivalvonta	49
6.4.5.	Verhokäyräanalyysi	49
6.4.6.	Haystack-ilmiö	51
<b>7</b>	<b>Kompressorien laakerivärinämittaukset</b>	<b>52</b>
7.1.	Mittauksen tarpeellisuuden määrittäminen	52
7.2.	Prosessiteollisuuslaitoksen paineilmakompressorit	54
7.3.	Sarlin Balance -ohjausjärjestelmä	56
7.4.	Laakerien kunnonvalvonnan instrumentoinnin toteutus	57
7.4.1.	Toteutuksen lähtökohdat	57
7.4.2.	VSE002-diagnostiikkayksikkö	57
7.4.3.	VSA001-kiihtyvyyssanturit	59
7.4.4.	Diagnostiikkayksikön analyysit ja parametointi	60
<b>8</b>	<b>Kunnonvalvontajärjestelmän parannusehdotukset</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>68</b>
	<b>Lähdeviitteet</b>	<b>69</b>
	<b>Liitteet</b>	<b>72</b>

## 1 Johdanto

Tietotekniikan laaja soveltaminen on muuttanut teollisuutta viimeisinä vuosikymmeninä. Tämä on näkynyt muun muassa teollisen tuotannon automaatioasteen lisääntymisenä. Tuotanto ja tuotantolaadun tasaisuus on yleisesti ottaen lisääntynyt tuotantotyöntekijöihin verrattuna. Tätä kutsutaan tuotannon tehostumiseksi ja laadun parantumiseksi. Toisena tekijänä teollisen tuotannon kehittymisessä voidaan pitää liiketalousajattelun muutosta kohti arvoketjuajattelua, mikä on vaikuttanut suuresti tuotannonohjauksen ja logistiikan kehittymiseen. Tuotantokoneiden seisokit ja suuret varastot koetaan kielteisinä tekijöinä tuotantotaloudellisessa ajattelussa, jossa tähdätään tehokkaaseen lisäarvon tuottamiseen ja sitä kautta investointien mahdollisimman suureen tuottoon.

Yhdeksi kilpailutekijäksi teollisuuden kehittymisessä on muodostunut teollisuuden kunnossapito ja sen kehittäminen kokonaistaloudellisen optimoinnin kautta. Tuotantokoneiden kunnossapito on siirtynyt ”palokuntamallista”, jossa keskityttiin vikojen korjaamiseen niiden ilmetessä, kohti ennakoivaa kunnossapitoa, jossa yhtenä isona osana on kunnonvalvonta. Nykyaikaisessa kunnonvalvonnassa voidaan hyödyntää kehittyneitä mittaus- ja analysointimenetelmiä.

Kunnonvalvontaa voidaan toteuttaa aikataulutettuina kunnonvalvontahenkilöstön kiertomittauksina tai jatkuvatoimisilla mittauksilla, jotka eivät vaadi henkilöstön kiertoa kohteessa. Jatkuvatoimisessa mittauksessa voidaan alkava vika havaita todennäköisesti nopeammin. Ohjauksen valvomo- ja hälytysjärjestelmään yhdistettynä voidaan alkavista vioista saada jatkuvatoimisen mittauksen diagnostiikkajärjestelmiltä tietoa etukäteen ennen vian etenemistä siihen vaiheeseen, jossa seurauksena olisi mahdollisesti koneen pysähtyminen ja jopa alkuperäistä vikaa merkittävästi isommat vahingot.

Ongelmana mittauksiin perustuvan kunnonvalvonnan käyttöönotossa on usein niiden vaatima erikoisosaaminen. Mittauksista saatavan tiedon tulkinta edellyttää tavallisesti tuntemusta vikaantumismekanismeista ja vian kehittymisestä vaurioksi. Mittauksista voidaan ajatella olevan erityisesti hyötyä silloin, kun niiden pohjalta voidaan suorittaa

huoltotoimenpiteitä laitevahingot minimoiden ja aiheuttamatta suunnittelematonta seisokkia.

Eräänä merkittävänä kunnonvalvontakohteena voidaan pitää laakerien kunnonvalvontaa. Teollisuudessa laakereita on hyvin monessa kohteessa. Usein laakerin vikaantumisen johtaa tuotantotappioihin seisokista aiheutuneen tuotannon menetyksen vuoksi, mitä voi tulla seisokkiaikana tekemättä jääneen tuotannon vuoksi ja prosessissa seisokin vuoksi pilalle menevän raaka-aineen vuoksi. Ennakoimaton laakerivaurio voi johtaa myös lisävahinkoihin tuotantokoneessa, mistä seuraa helposti isommat varaosakustannukset ja pidempi korjausaika. Ennakoimattoman vian pidempi korjaus- ja seisokkiaika voi johtua esimerkiksi pitkälle kehittyneen vian aiheuttamista lisävaurioista, pysähtyneen koneen vikojen paikantamiseen kuluvasta lisäajasta ja omasta varastosta puuttuvien varaosien toimitusajoista.

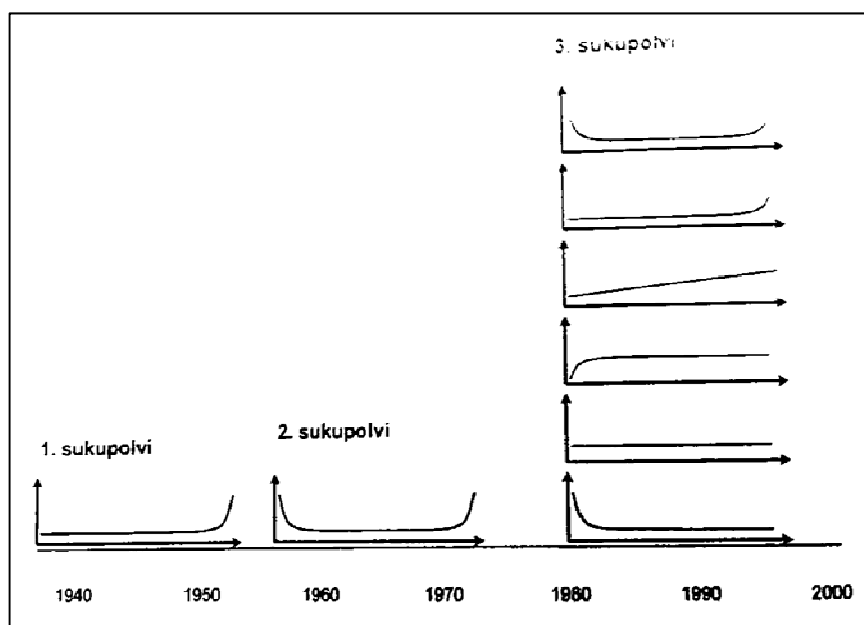
Tässä insinööriyössä selvitettiin laakerien jatkuvatoimisen kunnonvalvonnan toiminnan ja hyödyntämisen perusteet prosessiteollisuuden laitoksen paineilmatuotannossa, jossa kunnossapidosta vastaa Sarlin Oy Ab. Paineilmatuotannon ohjausjärjestelmän on toimittanut ja kehittänyt Sarlin, joten toiveena oli integroida aiemmin hankittu kunnonvalvontajärjestelmä mahdollisimman hyvin käytössä olevaan Sarlin Balance - ohjausjärjestelmään. Tavoitteena oli saada laakerien jatkuvatoimisesta kunnonvalvonnasta kunnossapidon työtä tehostava ominaisuus.

Yrityksen ongelmana oli heikko tietämys laakerien kunnonvalvonnasta. Tästä johtuen mittausten hyödyntäminen käytännössä oli heikkoa. Tässä työssä oli siten tarkoituksena käydä läpi aiheeseen liittyvä teoriatausta sekä soveltaa sitä kunnonvalvonnan kehittämiseen. Värähtelyanalyysin toiminnan ja sen tulosten tulkitsemisen perusteita oli tarkoitus selvittää sovellettavuuden tehostamiseksi. Samoin oli tarkoitus selvittää värinäanalyysin yleistä hyödyllisyyttä kompressorien kunnossapidon kannalta. Tarkastelun pohjalta oli tarkoitus laatia ehdotuksia kunnonvalvonnan tehostamiseksi.

## 2 Teollisuuden kunnossapito

### 2.1. Kunnossapidon kehittymisen sukupolvet

Kunnossapidon kehittämisessä voidaan katsoa olevan neljä sukupolvea. Ensimmäisen sukupolven kunnossapidossa laitteita voitiin pitää seisokissa pienen integraatioasteen ansiosta. Koneiden hallitseva vikaantumismekanismi oli ajasta riippuva vikaantuminen ilman niin sanottuja lastentauteja. Koneet olivat usein reilusti ylimitoitettuja ja niiden korjaaminen ja huoltaminen oli melko helppoa. Toisen sukupolven katsotaan alkaneen toisesta maailmansodasta, jolloin entistä suuremmat tuotantomäärät jouduttiin toteuttamaan kokemattomien koneenkäyttäjien avulla kokeneiden käyttäjien ollessa rintamalla. Kolmas sukupolvi taas katsotaan alkaneeksi 1970-luvulla avaruusprojektien myötä. Tällöin tuotantokoneiden mekanismien määrä kasvoi, automaatio lisääntyi ja näin liiketoiminta tuli entistä riippuvaisemmaksi koneista. Tuotannon JIT (just-in-time) -mallit yleistyivät globaalissa kilpailussa ja varastot pienenivät. [1, s. 12-13.]



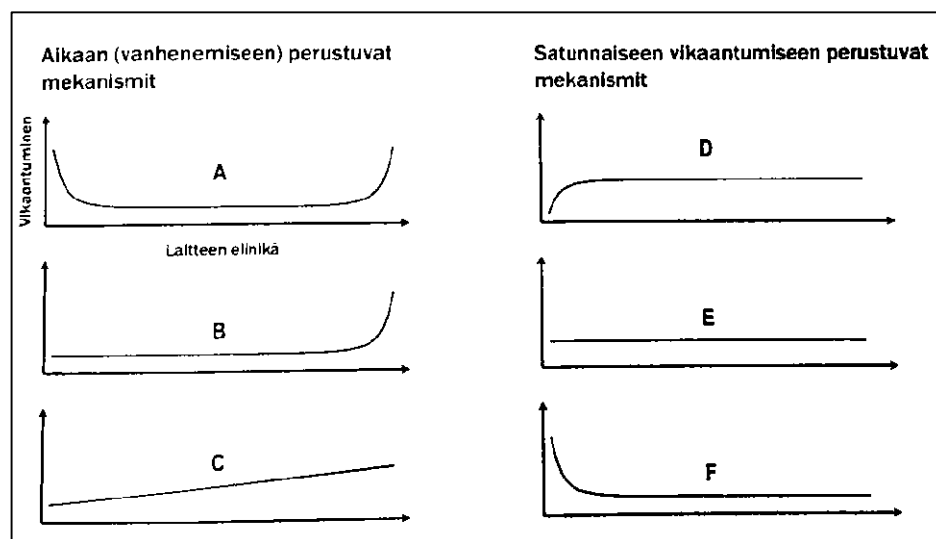
Kuva 1. Kunnossapidon vikaantumismekanismit sukupolvittain [1, s. 14].

Kolmas sukupolvi toi mukaan myös laajemman määrän vikaantumismalleja. Kuvassa 1 on esitetty 1., 2. ja 3. sukupolven vikaantumismalleja. Ensimmäisen sukupolven aikana koneiden vauriot lisääntyivät käyttöajan lopulla. Toisessa sukupolvessa on koneiden



käytön alussa mukana tulleita uudesta, aikasemmassa käytössä koettelemattomasta suunnittelusta johtuvia vikoja, jolloin vikaantumista muodostui ns. kylpyammekäyrä. Kolmas sukupolvi toi mukanaan joukon uusia vikaantumismekanismeja johtuen muun muassa mekanismien monimutkaistumisesta ja lisääntyneestä elektroniikan määrästä. [1, s. 12-15]

Vikaantumismallit voidaan jakaa ajasta ja käytöstä riippuviin mekanismeihin sekä satunnaiseen vikaantumiseen perustuviin mekanismeihin (kuva 2). Jopa 80 % vikaantumista teollisuudessa noudattaa kuvassa esitettyjen mallien D, E ja F mukaisia satunnaisia vikaantumismalleja [2, s. 140]. Perinteisellä ennakoivalla kunnossapidolla voidaan ehkäistä vain noin 10 % vioista [1, s. 47-48].



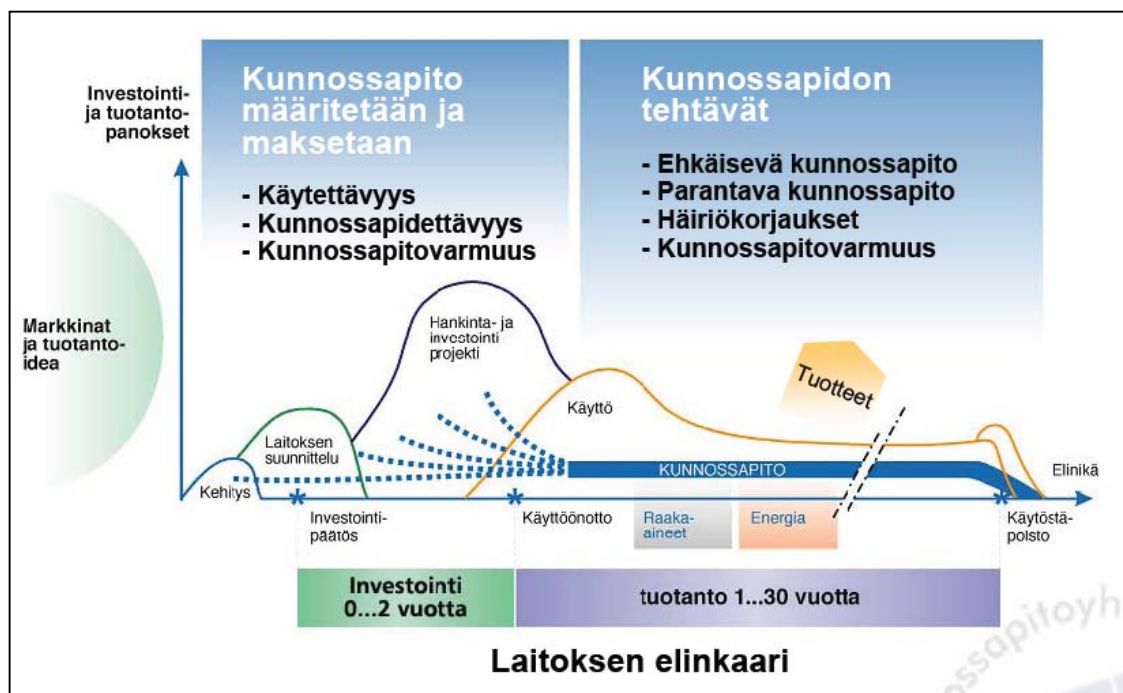
Kuva 2. Vikaantumismekanismien jako aikariippuvaisiin ja satunnaisiin [1, s. 47].

Kunnossapidon neljäs sukupolvi käynnistyi 1990-luvulla, ja sen taustalla on tietotekniikan kehittyminen. Teollisen tuotannon ohjaus- ja tietojärjestelmien integroitumis- ja kompleksisuusasteen lisääntyessä kunnossapidolta vaaditaan laajempaa ja syvempää osaamista. Lisääntynyt integraatioaste on tehnyt koko konetta koskevista vikamalleista enemmän satunnaisia. [1, s. 14-15.] Tietoverkot ovat mahdollistaneet koneiden etänä toimivan kunnonvalvonnan yhdessä mittaus- ja analyysimenetelmien sekä näitä tukevien tiedonkeruujärjestelmien kehittymisen kanssa. Varastojen ja henkilöstön pienentämisen tarve sekä järjestelmien monimutkaistuminen sekä niiden toiminnan analysointiin vaadittava erikoisosaaminen ja -laitteisto ovat

tehneet asiantuntijaorganisaatioille ulkoistetusta kunnossapidosta tarpeellisen neljännen sukupolven kunnossapidossa.

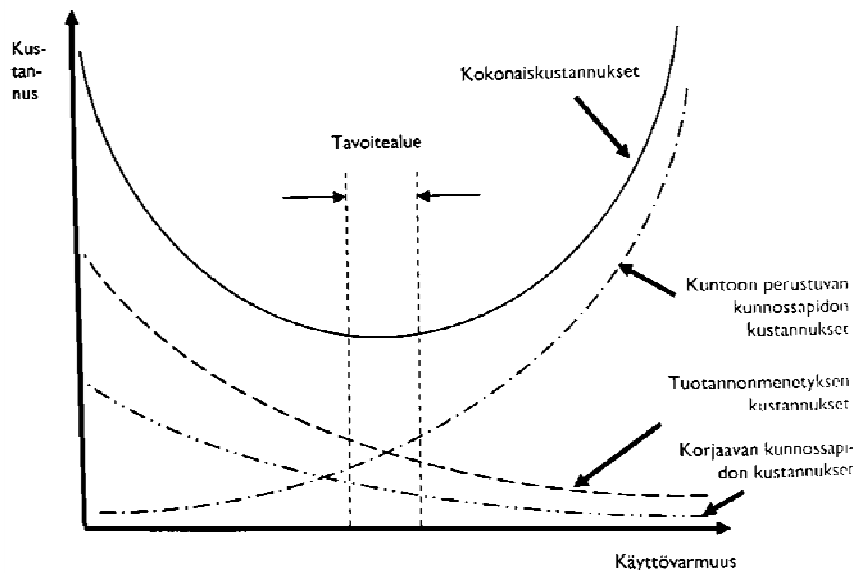
## 2.2. Nykyaikainen kunnossapitoajattelu

Laitoksen kunnossapidon kustannukset jakaantuvat koko sen elinkaarelle, ja kunnossapito alkaa laajasti ajateltuna jo laitoksen suunnittelusta (kuva 3). Viime vuosien kunnossapitoajattelussa on suosittu kokonaistuottavia (Total Productive Maintenance, TPM) ja luotettavuuskeskeisiä (Reliability-centered Maintenance, RCM) kunnossapitoperiaatteita. RCM pyrkii karsimaan tuotantokoneiden tarpeettomat kunnossapitotoimet. Ajatuksena on päästä eroon huolloista, joille ei ole erityistä tarvetta ja jotka eivät näin ollen ole varsinaisesti tuottavia. Tällaista tarpeetonta huoltoa voivat olla esimerkiksi jaksotetut huollot ja jaksotettu kunnonvalvonta niiden koneiden ja osien kohdalla, joiden vikaantumismalli ei ole ajasta riippuva. RCM painottaa osien ja koneiden todelliseen elinikään pohjautuvaa kunnossapitoa, joiden selvittämiseksi usein tarvitaan mittauksia. Lisäksi RCM:ssä hyödynnetään erilaisia riskianalyyskejä, joilla voidaan pyrkiä haluttuun luotettavuustasoon. [1, s. 109-120.]



Kuva 3. Kunnossapito laitoksen elinkaaren aikana [3, s. 3].

Kokonaistuottavan kunnossapidon perustarkoituksena on tarkastella kunnossapitoa sen kokonaisvaltaisen tuottavuuden näkökulmasta, ja pyrkiä sitä kautta optimoimaan kunnossapidon kustannukset yrityksen tuloksenteon kannalta parhaalle tasolle (kuva 4). TPM-ohjelmassa yritetään vaikuttaa kunnossapito- ja käyttöhenkilökunnan toimintatapojen ja asenteiden muokkaamisen kautta koneiden käyttöikään ja keston. Se pohjautuu laatuohjelmiin, joilla pyritään kokonaistuottavuuden kasvuun käyttäen hyväksi muun muassa tuotannon KNL (käytettävyys, nopeus ja laatu) -mittareita ja tuotantokoneiden kriittisyysanalyysijä. [1, s. 92-108.]

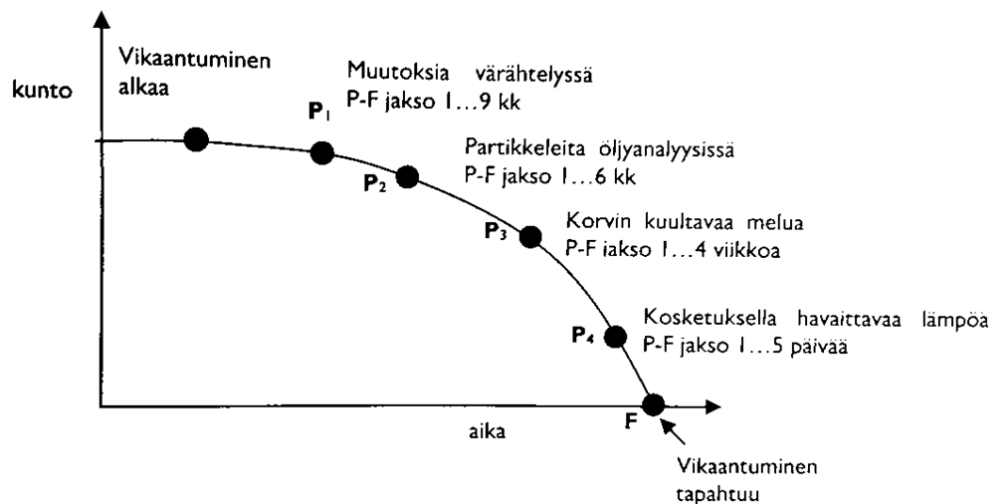


Kuva 4. Kunnossapidon kokonaiskustannusten riippuvuus kuntoon perustuvan kunnossapidon osuudesta [2, s. 498].

### 3 Koneiden kunnonvalvonnan mittausmenetelmät

#### 3.1. Värähtelymittaukset

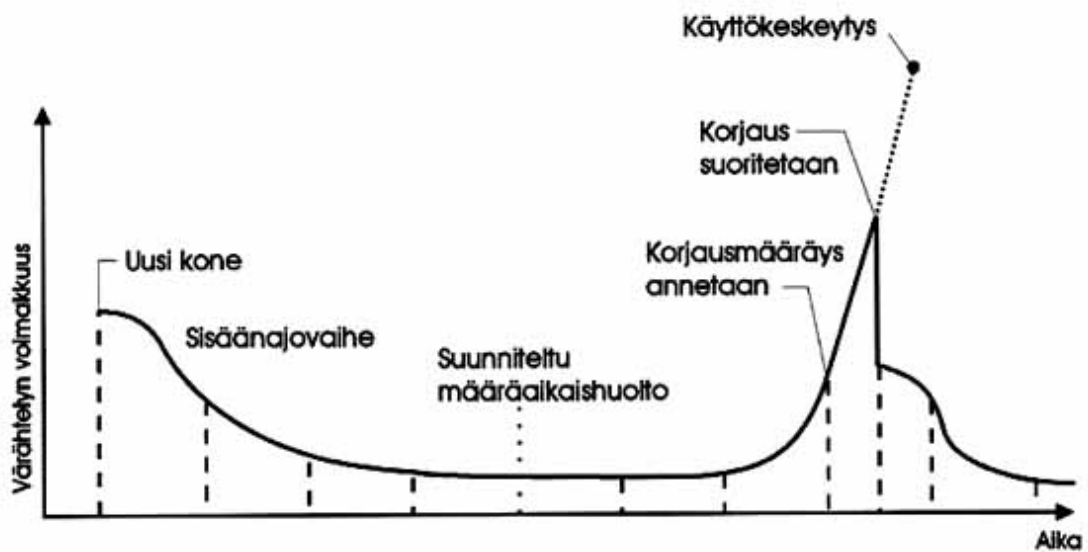
Koneiden kuntoa valvotaan teollisuudessa monilla eri menetelmillä. Tärkeimpiä kunnon mittaamiseen käytettyjä menetelmiä ovat värähtelymittaukset, lämpötilamittaukset, virta-analyysit epätahtimoottoreille, kulumishiekkasanalyysit ja hyötysuhdemittaukset. Näistä värähtelymittaukset ovat eniten käytettyjä. Niitä voidaan yleisesti pitää useimmiten parhaana ennakoivan kunnossapidon mittausmenetelmänä oikein toteutetuissa sovelluksissa. [4, s. 17-22.] Kuvassa 5 on esitetty vierintälaakerin vikaantumisesta havaittavia oireita P-F-käyrällä, jossa värähtelymittauksella on pisin P-F-jakso eli sillä voidaan havaita vika varhaisemmin kuin muilla menetelmillä. Noin 90 % laakerivaurioista kyetään värähtelymittauksilla havaitsemaan kuukausia ennen laakereiden lopullista tuhoutumista [2, s. 311]. Kuvassa 6 on esitetty, miten värähtelyn voimakkuuden perusteella voidaan laakerivaurio ennakoida, ja suorittaa laakerinvaihto mahdollisimman pienen häiriön tuotannolle tuottaen.



Kuva 5. Eräitä vierintälaakerien vikaantumisesta havaittavia oireita sisältävä P-F-käyrä [2, s. 141].

Värähtelymittauksia tehdään kunnonvalvonnessa pääasiassa kahdesta syystä. Ensinnäkin niillä voidaan saada tietoa koneen osien kunnosta. Toiseksi värähtelyjen vaikutukset koneisiin, rakenteisiin ja tuotantoprosesseihin ovat pääsääntöisesti

haitallisia. Haitallisuus ilmenee muun muassa lisääntyneinä jännityksinä, rakenteiden väsymismurtumina, liitosten löystymisenä, käyttöiän alentumisena, lopputuotteen laadun heikkenemisenä, käynnin epävarmuutena, energiahäviöinä, meluna ja muuna ergonomisena häirtana ja häiriöinä muille koneille lähistöllä. Tärinää käytetään myös hyväksi joissakin erikoisissa koneissa, kuten tiivistimissä, seuloissa ja kuljettimissa. [4, s. 40.]



Kuva 6. Laakerin värähtelymittauksen hyödyntäminen ennakoivassa kunnossapidossa [5].

Kunnonvalvonnan värähtelymittausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan. Niistä ensimmäiseen kuuluvat yksinkertaiset menetelmät koneiden yleistärinän valvontaan ja koneiden vierintälaakereiden kunnonvalvontaan. Toiseen taas kuuluvat monimutkaisemmat menetelmät koneiden tärinän yksityiskohtaiseen valvontaan ja laakereiden kunnonvalvontaan.

Ensimmäisen luokan valvonnassa tarvitaan tavallisesti yksi tai kaksi mittalaitetta. Yleistärinää mitataan taajuusalueella 10 Hz – 1 kHz. Mittaus kertoo karkeasti koneen akselin pyörimiseen liittyvien vikojen olemassaolosta, kuten epätasapainosta, linjausvirheestä ja liitosten löysyydestä. Ensimmäisen kategorian mukainen vierintälaakerien kunnonvalvonta tapahtuu tyypillisesti mittaamalla yli 2 kHz:n värähtelyn kokonaistasoa. Korkeataajuisen värähtelyn on havaittu kasvavan selvästi,

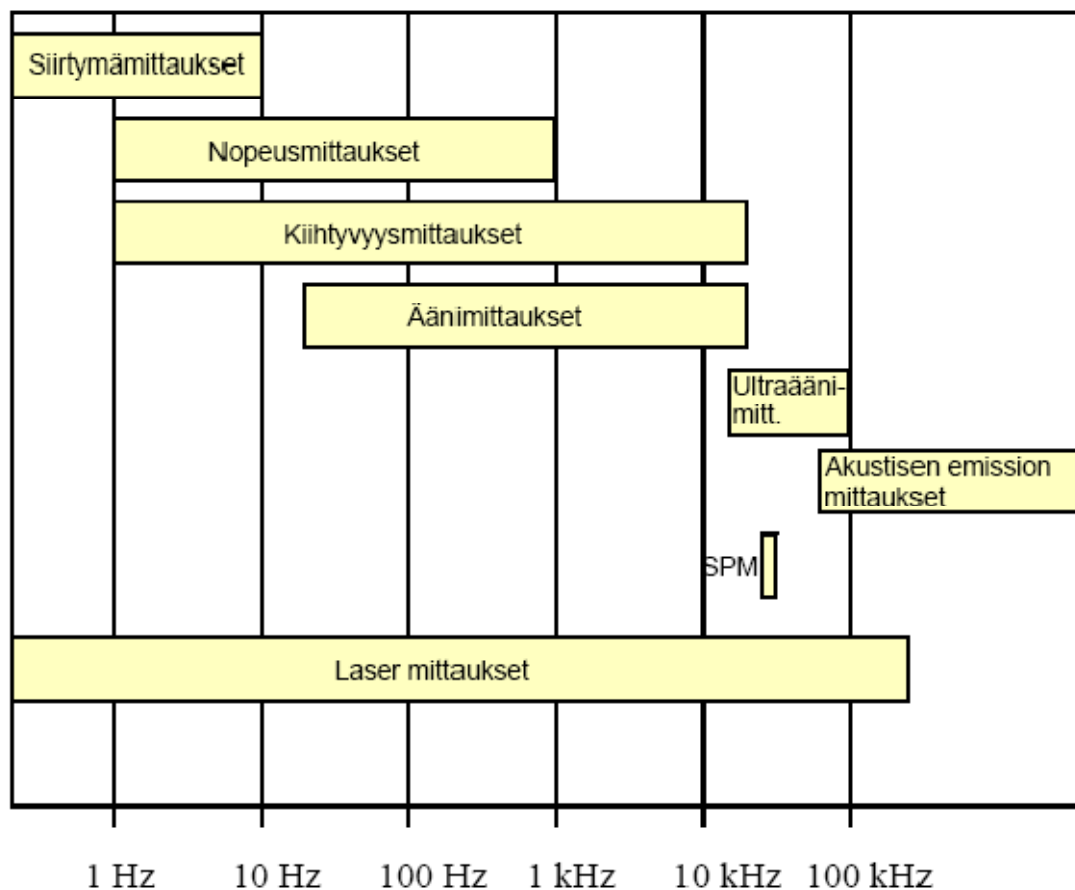
kun voitelukalvo häviää vierintälaakerista tai jokin laakerivika pääsee syntymään. Samaan luokkaan kuuluvat myös ultraäänimittaukset, joilla voidaan mitata laakereiden kunnan lisäksi samalla myös nesteiden ja kaasujen vuotoja. Yhdessä ensimmäiseen luokkaan kuuluvat menetelmät voivat olla kohtuullisen riittäviä sellaisten koneiden kunnanvalvontaan, missä ei ole useita erillisiä akseleita pyörimässä eri nopeuksilla. Ne ovat kuitenkin aivan liian epäherkkiä valvomaan mutkikkaampia koneita, koska jo normaali kuormitustärinä voi helposti peittää jonkin koneen osan orastavan vian aiheuttaman tärinän alleen. [4, s. 18.]

Toisen luokan värähtelyvalvonnassa mittauksissa käytetään yksi- tai useampikanavaisia spektrianalysointilaitteita, joiden avulla voidaan erotella toisistaan eri koneen osien aiheuttama tärinä niille ominaisten osataajuuksien perusteella. Seuraamalla osataajuuksien amplitudien suuruutta voidaan seurata yksittäisten koneenosien kuntoa. Spektri lasketaan nykyisin yleensä FFT-algoritmeilla, jolloin saadaan selville signaalin osataajuudet ja niiden vaiheet. Toisen luokan värähtelymittauksiin voi kuulua muutakin signaalinkäsittelyä, kuten esimerkiksi PeakVue-menetelmä, keskiarvostettu aikatasoanalyysi, verhoikäyräanalyysi, vaihekulma-analyysi ja kepstrianalyysi. Myös aallokkemuunnoksen käyttöä värähtelyvalvonnassa on kokeiltu. [4, s. 18 – 19; 2, s. 217 - 218, 252.]

Standardi PSK 5710 jakaa värähtelyn mittalaitteet neljään eri tyyppiin. Tyypin 1 mittalaitteita ovat kokonaistasoa ilmaisevat laitteet, joissa mitattua värähtelyä kuvaa yksi tunnusluku. Tyypin 2 mittalaitteet mittaavat korkeataajuisia, tyypillisesti yli 5 kHz:n värähtelyä, ja mitattua värähtelyä kuvaa korkeintaan kaksi tunnuslukua. Tyypin 3 mittalaitteissa on valittavissa oleva taajuusalue, ja mitattu värähtely voidaan esittää sekä aika että taajuustasossa. Tyypin 4 mittalaitteet on laitteet ja ohjelmat sisältävä mittausjärjestelmä, joka tekee vianmäärityksen ja mahdollisesti jopa ennusteen koneen jäljellä olevasta käyttöajasta. [6, s. 2.]

Värähtelyn mittausmenetelmät voidaan jakaa myös karkeasti matala- ja korkeataajuisiin menetelmiin. Korkeataajuiset menetelmät sijoittuvat tyypillisesti taajuusalueelle 20 kHz – 1 GHz [2, s. 247]. Kuvassa 7 on esitetty eri mittaustapojen tyypillisiä

mittausalueita. Mittaukset on siinä jaettu siirtymä-, nopeus-, kiihtyvyy-, ääni-, ultraääni-, laser-, SPM- ja akustisen emission mittauksiin. Osa näistä voidaan toteuttaa mahdollisesti jopa samalla mittauslaitteistolla. Siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyydmittauksia varten on omia antureitaan, mutta niitä voidaan muuntaa myös toisikseen laskennallisesti.



Kuva 7. Eri värinämittaustapojen tyypilliset mittausalueet [7, s. 11].

Lasermittauksilla, jotka perustuvat laserinterferometriaan, laservalopulssin kuluaikaan, vaihe-eron mittaukseen tai Doppler-ilmiöön, mitataan nopeutta tai siirtymää. Ne ovat kuitenkin kuvassa 7 esitetty omana mittaustapanaan, sillä niiden mittausalue on tyypillisesti muita siirtymä- tai nopeusmittauksia suurempi. [2, s. 242; 7, s. 13.] Lasermittausten käyttöönottoa rajoittavat pääasiassa korkea hinta ja mittauksen asentamisen vaatima suurehko tila.

Akustinen emissio esiintyy korkeataajuisena materiaalin pinnan aaltoiluna eli Rayleigh'n tai Lambin aaltolina toisin kuin värinä mekaanisen värähtelyn ja ultraäänen taajuuksilla, jossa värinä vaikuttaa koko rakenteessa. Akustisen emission mittaaminen on kiihtyvyyssanturilla tehtävä mittaaminen. Mittauksessa käytetään tavallisesti lisämassatonta pietsosähköistä anturia, jolloin mittauksen taajuusalue saadaan korkeille taajuuksille. Tyypillisesti mittauksen taajuusalue on noin 40 kHz – 1 MHz. Mittauksen taajuusvaste on tyypillisesti kuitenkin hyvin epälineaarinen, minkä vuoksi sitä ei kalibroida mittaussuureiksi, vaan sitä käytetään suhteellisena mittauksena. Akustista emissiota aiheuttavat erilaiset pintojen väliset kosketukset sekä materiaaleissa esiintyvät dislokaatiot, faasimuutokset ja plastiset muutokset. [2, s. 247 – 252] Laakerivaurion alkuvaiheessa vauriokohdan pinta väsyä, ja siihen alkaa muodostua pieniä säröjä. Ne alkavat lähettää akustista emissiota, jolloin mittauksen avulla voidaan havaita vaurion alkaminen varhaisessa vaiheessa. [7, s. 12.]

Akustisen emission tyypillisen taajuusalueen sisälle jää kaupallinen SEE (Spectral Emitted Energy) -menetelmä, joka toimii taajuusalueella 250 – 350 kHz. Siinä värähtelystä lasketaan SEE-tunnusluku. Menetelmällä havaittavat vikaantumistavat ovat luonteeltaan enemmän jaksollisia kuin akustisen emission menetelmässä. [2, s. 252]

Äänimittaukset tehdään mikrofonilla tai sähköisellä stetoskoopilla, jolloin ääntä voi kuunnella suoraan tai nauhoitettuna. Ääntä voidaan käsitellä kunnonvalvonnassa myös kuten värimittauksiakin. Ultraäänimittaukset perustuvat ilman värähtelyn mittaamiseen ihmisten kuultavissa olevaa ääntä korkeammilla taajuuksilla eli yli 20 kHz:n taajuuksilla. Tavallisesti taajuusalue on 20 – 60 kHz [2, s. 250]. Muokkaamalla ultraäänimittauksen signaali korvankuultaville taajuuksille voidaan sillä paikantaa esimerkiksi laakerivikoja. Ultraäänialueella ei yleensä ole paljon muita häiriötaajuuksia, mikä helpottaa vianetsintää. Toisaalta esimerkiksi pienen vuodon seurauksena kaasun tai nesteen virtaus pienestä aukosta synnyttää pyörteilyä, joka voi siirtyä mekaaniseen rakenteeseen ja edetä korkeataajuisena runkoääninä pitkienkin matkojen päähän, jolloin se voi häiritä ultraääneen ja akustiseen emissioon perustuvia mittauksia vaikeasti jäljitettävällä tavalla. [7, s. 12; 2, s. 248.]

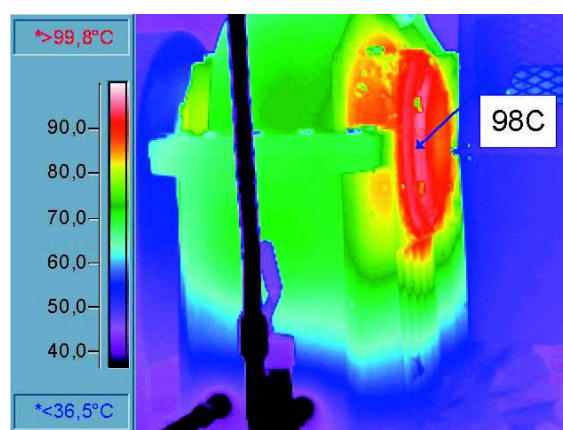


Iskusyäsämittaus eli SPM (Shock Pulse Method) -mittaus on SPM Instrumentsin patentoima laakerien kunnonvalvontamenetelmä. Se perustuu kiihtyvyyksmittauksessa käytettävän pietsoanturin resonanssitaajuuden hyödyntämiseen. SPM-mittauksessa anturin resonanssitaajuus on 32 kHz, ja sillä mitataan vain kapeata kaistaa resonanssitaajuuden alueella. Laakerit alkavat tuottaa runsaasti korkeataajuisia värähtelyä laajalla kaistalla ennen hajoamistaan, joten SPM-mittauksen kokonaistasosta voidaan periaatteessa havaita alkanut vikaantumisen. [7, s. 13.]

Työn kohteena olleen prosessiteollisuuden laitoksen kunnonvalvonta-asentajat eivät kuitenkaan pitäneet kesällä 2009 tehdyssä haastattelussa SPM:ää luotettavana menetelmänä. Syynä tähän esitettiin esimerkki aktiivisessa käytössä olevasta paineilmakompressorista, jossa kompressorivalmistajan huoltomiehen tekemän SPM-mittauksen perusteella tehdyn arvion perusteella koneeseen olisi pitänyt tulla laakerivaurio muutaman kuukauden sisällä. Laitoksen kunnonvalvonnan omien säännöllisinä kiertomittauksina toteutettujen kiihtyvyyksmittauksien spektrianalyysit eivät kuitenkaan havainneet vikaa, joten laakerit päätettiin jättää vaihtamatta. Niitä ei vaihdettu useisiin vuosiin, ja samat laakerit olivat käytössä vielä haastatteluhetkellä. [8.]

### 3.2. Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittausten käyttö kunnonvalvonnassa perustuu siihen, että lähes kaikissa vikakohteissa lämmöntuotto kasvaa huomattavasti vian muuttuessa vaurioksi. Menetelmä oli aiemmin melko suosittu laakereiden kunnonvalvonnassa. Lämpötilamittausten ongelmana on kykenemättömyys havaita laakerivikoja varhaisessa vaiheessa, jolloin värähtelymittaukset voivat olla parempia alkavan laakerivian ennustamisessa. Lämpötilamittaukset ovat kuitenkin mahdollisesti käyttökelpoisia täydentävänä



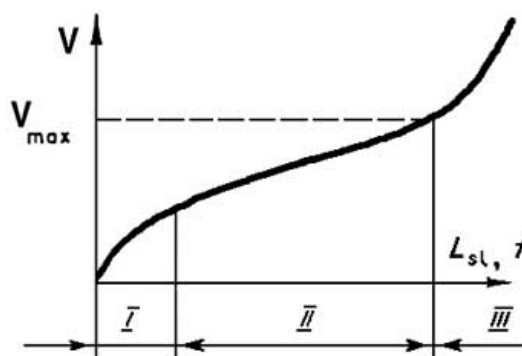
Kuva 8. Viallinen laakeri lämpökameralla kuvattuna [9, s. 3].

Lämpötilamittaukset ovat kuitenkin mahdollisesti käyttökelpoisia täydentävänä

menetelmänä yleisessä kunnonvalvonnassa sekä erityisesti sähköisten komponenttien kunnonvalvonnassa, joiden vikoja ei voi värähtelymittauksin havaita. Tavallisesti lämpötilamittaukset suoritetaan kosketuksellisilla mittareilla, pistoolityyppisillä infrapunamittalaitteilla tai infrapunakameroilla (kuva 8). Kosketuksellisen menetelmän käyttöä rajoittaa kohteen luoksepäästävyys etenkin käytön aikana sekä antureiden pitkät asetusajat. Kosketuksettomien infrapunamittausten käyttö taas vaatii enemmän tietoa mitattavasta kohteesta, kuten esimerkiksi pintojen heijastuksien vaikutus ja eri materiaalien emissiokertoimet. [4, s. 20-21.]

### 3.3. Kulumishiukkasanalyysi

Kulumishiukkasanalyysia eli ferrografiaa kutsutaan toisinaan myös öljyanalyysiksi. Viimeksi mainittu menetelmän nimitys tulee koneen voiteluöljyn näytteestä, josta kulumishiukkasanalyysi yleensä tehdään. Menetelmä perustuu kulumishiukkasten nopeutuneeseen koon kasvuun ja määrän lisääntymiseen koneen kulumisen edetessä kohti koneen vikaantumista. Kuvassa 9 näkyy koneen kuluminen toiminta-ajan funktiona. Tasaisen kulumisen jälkeen seuraa voimakas kuluminen, joka ilmenee kulumishiukkasten määrän lisääntymisenä ja kokojakauman muutoksena. Normaalissa kulumisessa liikkuvista pinnoista irtoavien kulumishiukkasten halkaisija on noin  $10\ \mu\text{m}$ , mutta kulumisen kasvaessa voimakkaasti hiukkasten koko kasvaa 10–100-kertaiseksi. Samalla muuttuu myös hiukkasten muoto, jolloin hiukkasia mikroskoopin avulla tutkimalla voidaan yrittää selvittää myös kuluva komponentti ja sen vikaantumismekanismit. Menetelmä on usein hyvä öljyvoidellun koneen yleisessä kunnonvalvonnassa, mutta tarkemman vikatiedon selvittäminen sen avulla voi olla usein mahdotonta tai ainakin hankalaa, työlästä ja erityistä asiantuntemusta vaativaa. [4, s. 22 – 23; 11, s. 3 – 10.]



Kuva 9. Kuluminen ( $V$ ) toiminta-ajan funktiona. Vaiheet: I. Sisäänajokuluminen II. Tasainen kuluminen III. Voimakas (tuhoava) kuluminen. [10.]

### **3.4. Hyötysuhdemittaukset**

Hyötysuhdemittaukset ovat laitteiden ja prosessin toimintakyvyn selvittämiseksi suoritettavia mittauksia. Ne antavat kunnonvalvonnassa viitteitä vikojen muodostumisesta koneen tai prosessin toiminnan heikkenemisen kautta. Hyötysuhteen heikkeneminen kertoo yleisesti kulumisesta ja vioista laitteessa tai prosessissa, mutta näissä olevien vikojen tarkemmassa paikantamisessa se ei tavallisesti ole erityisen käytännöllinen tieto itsessään. Hyötysuhdemittausten kohteita voivat olla esimerkiksi kompressorit, turpiinit, lämmönsiirtimet, venttiilit, pumput ja kokonaiset prosessikokonaisuudet. [4, s. 23.]

Mittauksiin voi kuulua esimerkiksi koneiden sähkövirran, virtausmäärien, lämpötilojen ja paineiden mittaukset tietyissä prosessikohdissa, jolloin mittausdataa voidaan jatkuvasti verrata toimivien laitteiden tai prosessin laskennallisiin tai mitattuihin arvoihin. Joissain mittauksissa käytetään radioaktiivista merkkiainetta, jolloin saadaan selville useampia seikkoja prosessin toiminnasta. Usein hyötysuhdemittauksissa voidaan hyödyntää jo olemassa olevia prosessimittauksia ja automaatiojärjestelmää, mikä helpottaa niiden käyttöönottoa. Hyötysuhdemittausta hyödynnettäessä paineilmakompressoreissa voidaan mitata ja verrata sähkömoottorin ottaman sähkövirran määrää koneen tuottamaan paineeseen, jolloin näistä laskettu alentunut hyötysuhde indikoi jotain vikaa yleensä ottaen. [4, s. 23; 7, s. 6.]

### **3.5. Epätahtimoottoreiden virta-analyysi**

Epätahtimoottoreiden sähkövirta-analyysi perustuu moottorille tulevan voimajohdon vaiheen virtamittauksesta tehtävään spektrianalyysiin. Menetelmällä voidaan luotettavasti havaita sähkömoottorin

- vaurioituneet roottorisauvat
- rikkoontuneet oikosulkurenkaat
- korkeavastuksiset liitokset

- valuhuokokset ja onkalot painevaletuissa roottoreissa
- vajaat ja murtuneet juotokset häkkikämeissä
- roottorin käämitysongelmat liukurengaskoneissa
- dynaaminen ja staattinen epäkeskeisyys
- taipunut akseli.

Sähkömoottoreiden laakereiden kunnonvalvontaan se ei kuitenkaan sovellu, vaikka sillä monia sähköisiä ja mekaanisia vikoja voidaankin havaita. [4, s. 21 – 22., 7, s. 5 – 6.]

## **4 Laakerit ja laakerivauriot**

### **4.1. Laakerityypit**

Laakereiden tehtävänä on kantaa niihin kohdistuva akselikuorma ja pienentää pyörimisestä johtuvia kitkahäviöitä. Laakerit jaetaan yleensä liuku- ja vierintälaakereihin. Liukulaakereissa ei ole vierintäelimiä toisin kuin vierintälaakereissa. Vierintälaakereissa vierintäeliminä toimivat tavallisesti kuulat tai rullat, jotka välittävät voimat laakerin kehältä toiselle. Vierintäelimiä tarkoitus on vähentää vierintäkitkaa suhteessa liukukitkaan. Hitaiden liikkeiden laakeroinnissa vierintäelimet eivät tarvitse pidintä, mutta muutoin ne ovat tarpeellisia, jotta vierintäelimet pysyisivät erillään, tasajaollisina ja oikeassa asennossa.

Usein laakerointi kannattaa toteuttaa isostaattisesti kahdella säteislaakerilla. Näistä toinen on ohjaava ja toisen vapaa. Ohjaava ottaa vastaan säteis- ja aksiaalivoimia, ja vapaa ottaa vastaan vain säteisvoimia. Tästäkin johtuen samalla akselilla käytetään keskenään erilaisia laakerityyppejä. Suuri osa valmistetuista laakereista on vakio-ohjelmaan kuuluvia, ja niiden mitat ovat ISO-standardoituja. [12, s. 121-123.] Tämä seikka helpottaa usein kunnossapidon toteutusta, koska se vähentää riippuvuutta yhdestä varaosavalmistajasta.

### **4.2. Vierintälaakerien kulumisen tekijät**

#### **4.2.1. Laakerivaurioiden yleiset syyt**

Vierintälaakerit väsyvät käytössä, sillä pintapaineiden aiheuttamat leikkausjännitykset liikkuvat kaiken aikaa, kun liikkuva kehä vierittää vierintäelimiä. Vierintäväsyminen alkaa paikallisesti pinnan alta ja leviää sitten pinnalle lohkaisten sitä, kun väsymisraja ylittyy liian monta kertaa. Väsymisikä eri kuormituksilla voidaan kuvata niin sanotulla Wöhler-käyrällä, jolloin väsymisikä lähenee ääretöntä kuorman keventyessä. [12, s. 124.]

Kuitenkin vain pieni osa laakereiden vikaantumisista johtuu normaalista väsymisestä. Ensinnäkin epäpuhtaudet voiteluraossa nopeuttavat pintojen vierintäväsymistä. Toisekseen laakerit voivat kulua nopeammin kuin ne väsyvät, jolloin laakerivälkyt kasvavat liian suuriksi. Laakerit voivat kulua tavallista nopeammin pyörimättömään laakeriin kohdistuvan värähtelevän kuormituksen, liian suuren tai liian vähäisen kuormituksen, laakerivirtojen, epäpuhtaan voiteluaineen tai tehottomien tiivisteiden seurauksena. Laakerien vikaantuminen jakautuu seuraavasti:

- 16 % asennusvirheet
- 36 % puutteellinen voitelu
- 14 % epäpuhtaudet
- 34 % muut syy (epätasapaino, huono linjaus, irronnut osa, tärinä, väsyminen)

Näistä syistä vain normaali väsyminen on aikariippuvainen, suoraan käytön määrään verrannollinen vika. Vioista yli puolet liittyy voiteluun, jolloin kyseessä on puutteellinen voitelu tai voiteluaineessa olevat epäpuhtaudet [2, s. 254]. Laakerien vikaantumisia voidaan pitää satunnaisina, sillä niiden vikaantuminen on lähestulkoon samansuuruista koko niiden eliniän ajan. Laakerit kuuluvat siten kuvassa 2 esitettyyn vikatyyppiin E. [1, s. 47 – 48; 12, s. 124; 13.]

#### **4.2.2. Laakerien nimelliset kestoajat**

Laakeria kohteeseen mitoitettaessa voidaan laskea laakerilta vaadittava väsymisvoimaluku  $C$  (newtonia) tai laakerin nimellinen kestoikä  $L_{10}$  (miljoonaa kierrosta) riippuen siitä, kumpi näistä on tunnettu. Näiden suhde toisiinsa ja teholliseen kuormitukseen  $P$  (newtonia) käy ilmi yleisesti tunnetuista mitoituskäyristä

$$C \geq L_{10}^{1/p} \cdot P \quad (1)$$

ja

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^p, \quad (2)$$

joissa  $p$  on 3 kuulalakerin tapauksessa ja  $10/3$  rullalaakerin tapauksessa.

*Taulukko 1. Laakerien nimelliskestoian  $L_{10}$  tyypillisiä vaatimuksia [12, s. 129].*

<b>Käyttöaikaan perustuva vaatimus</b>	<b><math>L_{10h}</math> [h]</b>	
Kotitaloukskoneet, maatalouskoneet, kojeet, lääketieteelliset laitteet	300 ... 3 000	
Lyhytaikaisesti tai ajoittain käyvät koneet, sähkökäyttöiset käsityökalut, konepajanosturit, rakennuskoneet	3 000 ... 8 000	
Lyhytaikaisesti tai ajoittain käyvät koneet, joilta vaaditaan suuri käyttövarmuus: hissit, kappaletavaranosturit	8 000 ... 12 000	
8 tunnin käytön koneet, joita ei aina käytetä täydellä teholla: yleiskäyttöiset hammasvaihteet, kiinteät sähkömoottorit, murskaimet	10 000 ... 25 000	
8 tunnin käytön koneet, joita käytetään täydellä teholla, työstökoneet, puuntyöstökoneet, konepajateollisuuden koneet, kappaletavaranosturit, ilmanvaihtopuhaltimet, hihnakuuljettimet, kirjanpainokoneet, separaattorit, lingot	20 000 ... 30 000	
24 tunnin jatkuvan käytön koneet: valssaimien vaihteet, keskikokoiset sähkökoneet, kompressorit, kaivohissit, pumput, tekstiilikoneet	40 000 ... 50 000	
Vesilaitosten koneet, pyörivät uunit, kaapelinkertauskoneet, valtamerialusten käyttökoneet	60 000 ... 100 000	
Isot sähkökoneet, voimaloiden koneet, kaivosten pumput ja ilmanvaihtopuhaltimet, valtamerialusten laakerit	100 000	
<b>Ajomatkaan perustuva vaatimus</b>	<b><math>L_{10km}</math> [km]</b>	<b>Suuntaviivoja:</b>
Henkilö- ja pakettiautot	300 000	Jatkuva käyttö: 1500 ... 2000 h/a. Vuoroa kohti ajoittainen käyttö: 100 ... 1000 h/a. Tyypillinen ikä: 10 ... 20 a.
Kevyet/keskiraskaat kuorma- ja linja-autot	500 000	
Raskaat kuorma- ja linja-autot	700 000	
Raitiovaunut	1 500 000	
Tavaravaunut	1 00 000	
Henkilövaunut (kaukoliikenne)	3 00 000	
Moottorivaunut (kaukoliikenne)	3 500 000	
Veturit	4 000 000	

Väsymisvoimaluku  $C$  ilmaisee kuormitusvoiman, jolla laakerin nimellinen kestoikä on  $10^6$  kierrosta. Nimellinen kestoikä  $L_{10}$  tarkoittaa vaurion 10 %:n todennäköisyyttä, kun laakereita on paljon. Tässä yhteydessä vaurioksi lasketaan alkava vähäinen kuoppaantuminen, jolloin laakeria voi tavallisesti vielä käyttää. Laakereiden

keskimääräinen kestoikä on noin  $5 \cdot L_{10}$ , joten hajonta on suurta johtuen osittain myös satunnaisista tekijöistä. [12, s. 125-126.]

Nimellinen kestoikävaatimus  $L_{10}$  annetaan tavallisesti joko käyttöaikana (tunteina) tai ajomatkana (kilometreinä), jolloin kestoikävaatimuksesta voidaan käyttää vastaavasti joko merkintää  $L_{10h}$  tai  $L_{10km}$  [12, s. 129-130]. Taulukossa 1 on esitetty laakerin nimelliskestoian tyypillisiä vaatimuksia. Taulukon perusteella voidaan kompressorissa käytettävien laakereiden kestävän nimellisesti 40 000 – 50 000 tuntia, mikäli oletetaan kompressorivalmistajien noudattavan tässä esitettyä ohjeistusta omassa mitoituksessaan. Se vastaa noin 5 – 6 vuotta jatkuvaa käyttöä.

### **4.2.3. Laakerien voitelu**

Oppia kitkasta, kulumisesta ja voitelusta kutsutaan tribologiaksi, ja sitä voidaan soveltaa laakereihin varsin luontevasti. Tavallisesti laakerit vaativat voitelua, jotta niiden kitka ja kuluminen saataisiin hallittua. Laakerien voitelua voidaan käsitellä tarkastelemalla kahta yleistä voitelun pääluokkaa, jotka ovat kosketusvoitelu ja nestevoitelu. Täydellisessä nestevoitelussa liikkuvat pinnat eivät osu lainkaan toisiinsa, vaan niiden välillä on jatkuvasti nestepatja. Kosketusvoitelua lähestyttäessä pintojen kosketuksellinen aika kasvaa suhteessa kosketuksettomaan. Laakerien voitelu voidaan jakaa myös hydrostaattiseen ja hydrodynaamiseen voiteluun. Hydrostaattisessa voitelussa liikkuvien pintojen välinen voiteluainekalvo pidetään jatkuvasti yllä paineella. Hydrodynaamisessa voitelussa kalvo muodostuu pintojen väliin pyörintänopeuden kasvaessa tarpeeksi suureksi. Hydrostaattinen voitelu saattaa olla oikea valinta silloin, kun käyttökohteen pyörintänopeus on matala, sillä hydrodynaaminen voitelu saattaa vaatia riittävän käyttönopeuden. [12, s. 161-163.]

Voiteluaineena voidaan käyttää periaatteessa mitä vain juoksevassa muodossa olevaa ainetta, mutta hydrodynaamisen voitelukalvon muodostuminen edellyttää niin suurta viskositeettia, että öljypohjaiset voiteluaineet ovat tulleet suosituimmiksi. Voiteluun käytetään mm. mineraaliöljyä, kasvisöljyä, synteettisiä voitelunesteitä ja voitelurasvoja.



Näillä kaikilla on omat etunsa ja haittansa, jotka on otettava voiteluainetta kohteeseen valittaessa huomioon. [12, s. 163-165.]

Vierintälaakerin rasvavoitelua on edullista käyttää esimerkiksi silloin, kun voidellaan pelkästään laakeria tai kun ei haluta käyttää muiden koneenelimien voiteluun käytettyä, mahdollisesti epäpuhdasta öljyä. Vierintälaakerin voitelu öljyllä on taas edullista suurilla kehänopeuksilla, jäähdytystä tarvittaessa tai silloin, kun samalla voidaan voidella muutakin. Se aiheuttaa kuitenkin enemmän vaatimuksia laakerin tiivistykselle. [12, s. 149-151.] Rasvavoitelu on kuitenkin yleisin voitelutapa vierintälaakereille. Yli 90 % niistä on rasvavoideltuja [2, s. 254].

Vierintälaakerien toiminta riippuu ratkaisevasti voiteluaineesta ja siihen joutuneista epäpuhtauksista. Kun voiteluaineen viskositeetti on sopiva eikä laakereissa ole juurikaan sinne kuulumattomia kovia tai suuria hiukkasia eikä vettä, voidaan saavuttaa nestevoitelu laajalla nopeusalueella, jolloin kalvon paksuus on vähintään noin 0,25 µm. Nestevoitelussa kehien ja vierintäelinten väliset voimat välittyvät kosketuksesta nestepaineina. Paineet kasvavat tällöin suuriksi, sillä niiden vaikutusalat ovat pieniä. Elastohydrodynaamisen (EHD) voitelun teorian mukaan voiteluraon geometria muuttuu kimmoisasti ja voiteluaineen viskositeetti kasvaa. Rajavoitelu tai tahmaantuminen toteutuu silloin, kun laakeri on levossa tai niin hitaassa liikkeessä, että nestepainetta ei muodostu riittävästi. Tällöin kehien ja vierintäelinten väliset voimat välittyvät kosketuspaineina. Rajavoitelussa voiteluaineen lisäaineet muodostavat pinnoille uusiutuvat tartuntakerrokset, ja kalvojen paksuudet ovat 0,005 µm:n kokoluokkaa. Tahmaantuminen eli metallisidosten muodostuminen tapahtuu rajavoitelun tartuntakerrosten pettäessä paikoittain. Vähäinen tahmaantuminen aiheuttaa kulumista ja enempi tahmaantuminen tuhoaa pinnat. [12, s. 123.]

Voitelurasvoja käytettäessä ei ole edellytyksiä täydelliseen nestevoiteluun, vaan oikeissa olosuhteissa kyseessä on sekavoitelu, joka on yhdistelmä rajavoitelua ja nestevoitelua. Voitelukalvon paksuuteen vaikuttaa laakerin nopeuden lisäksi laakerin lämpötila. Voitelukalvon paksuus pienenee, kun lämpötila on liian pieni tai liian suuri.

Silloin kun voiteluaineessa on epäpuhtauksia, niin ainakin osa pintojen kosketuksesta tapahtuu epäpuhtaushiukkasten välillä, mikä heikentää voitelun tehoa. [2, s. 254 – 258.]

#### 4.2.4. Laakerivirrat

Mikäli sähkömoottorin akselijännite kasvaa liian suureksi, se voi läpäistä laakerin öljy- tai rasvakalvon ja aiheuttaa akselilta laakerin läpi moottorin runkoon kulkevan sähkövirran. Laakerivirta aiheuttaa laakerin kehälle poikittaisista urista muodostuvan niin sanotun pyykkilautakuvion. Värähtelymittauksin voidaan havaita laakerivirtojen vioittama laakeri. Suorakäyttöisillä vaihtovirtamoottoreilla ja tahtimoottoreilla akselijännitteet ja laakerivirrat ovat harvinaisia ja johtuvat yleensä rakenteen epäsymmetriasta. Taajuusmuuttajakäytöllä laakerivirtoja aiheutuu, kun staattorikäimitykseen syötetään jännitepulsseja, joilla on suuri nousunopeus ja voimakkuus. Akselivirrat voivat olla tyypiltään induktiivisia tai kapasitiivisia. Akselivirta voi kulkeutua myös esimerkiksi vaihteiston tai kytkimen kautta maihin, vaikka laakerit olisivatkin eristettyjä. Käytön jännitteen suodattaminen voi estää akselijännitteen muodostumisen. [2, s. 381 – 383.]

#### 4.3. Vierintälaakerien ominaistajuuDET ja viat spektritarkastelussa

Ehjä vierintälaakeri toimii itsessään rakenteellisena elementtinä, jolla on tietyt värähtelyominaisuudet. Laakeri myös aiheuttaa pyöriessään herätteitä, jotka saavat systeemin värähtelemään. Laakerin vaurioituessa herätteiden voimakkuus kasvaa, mikä näkyy värähtelytason muutoksena. Laakerien ohitustajuuksille on olemassa laskentakaavat. Ulkokehän ohitustajuuden kaava on

$$f_u = \frac{N}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) n, \quad (3)$$

sisäkehän ohitustajuuden kaava on

$$f_s = \frac{N}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right) n, \quad (4)$$

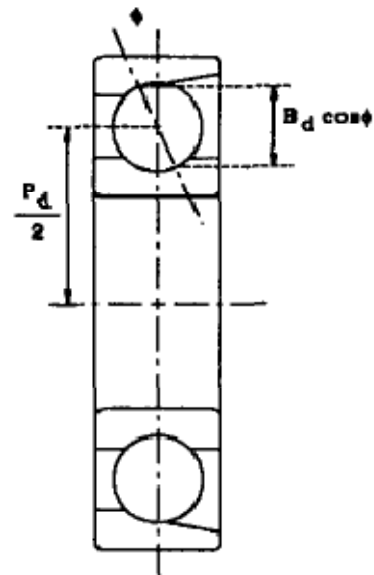
vierintäelimen vikataajuuden kaava on

$$f_v = \frac{D}{2d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right] n, \quad (5)$$

ja pitimen vikataajuuden kaava on

$$f_p = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) n. \quad (6)$$

Kaavoissa  $N$  on vierintäelinten lukumäärä,  $D$  on laakerin halkaisija vierintäelinten keskikohdista mitattuna,  $d$  on vierintäelimen halkaisija ja  $\beta$  on vierintäelimen kulma (kuva 10). Silloin kun ulkokehä ei pyöri ja sisäkehä pyörii,  $n$  on akselin pyörimisnopeus. Jos molemmat kehät pyörivät,  $n$  on sisä- ja ulkokehän välinen suhteellinen pyörimisnopeus. Silloin kun ulkokehä pyörii nopeammin,  $f_p$ :n kaavassa erotus muuttuu summaksi. Kaavat eivät välttämättä täysin päde, vaan niihin tuottaa virhettä laakereiden sisäinen esikuormitus, aksiaalikuormitus, vierintäelinten liukuminen ja laakerin geometrian muuttuminen sitä kuormitettaessa. [14, s. 167 – 173; 2, s. 311 – 313.]



Kuva 10. Vierintälaakerin poikkileikkaus [14, s. 169].

Metallikosketus aiheuttaa korkeataajuisia värähtelyä. Sen taajuus on tyypillisesti yli 2 kHz. Kun voiteluaine on likaantunut, spektrissä esiintyy ominaistajuuksien alueella piikkejä, joiden erotus on pidikkeen taajuus  $f_p$ . Laakerin vikaantumien näkyy myös

vierintätaajuuksien monikerroilla. Värähtely sysäystaajuuksilla voi olla seurausta myös liiallisesta kuormituksesta tai virheellisestä asennuksesta. Laakereiden viat ilmestyvät normaalisti ensin vierintäradoille, sitten vierintäelimiin ja pidikkeeseen. Pidikkeen taajuus esiintyy tavallisesti perustaajuutena tai jonkin toisen taajuuden sivunauhoina. Vierintäelinten sysäystaajuus ilmenee joskus sisä- tai ulkokehän sysäystaajuuden sivunauhoina. Ulkokehän vikaantuminen havaitaan voimakkaampana värähtelynä kuin sisäkehä, sillä se on lähempänä anturia. Lähellä vaurioitumista amplitudi nousee pyörimistaajuudella ja sen monikerroilla. Erilliset spektriipiikit laakerin sysäys- ja ominaistaajuuksilla alkavat ja niiden tilalle tulee laajakaistaista värähtelyä. Vinoon asennettu laakeri aiheuttaa akselin suuntaista värähtelyä pyörimistaajuudella ja  $180^\circ$  vaihe-eron vastakkaisten sivujen välille. Väljyys laakerissa aiheuttaa usein aliharmonisia komponentteja ja niiden monikertoja. [2, s. 310 – 316.]

## 5 Fourierin menetelmät ja FFT-algoritmi

### 5.1. Fourierin sarja

Fourierin menetelmien perusta on ranskalaisen matemaatikon Jean Fourierin (1768 – 1830) mukaan nimetty Fourierin sarja (Fourier series), jossa jaksollinen funktio voidaan esittää trigonometrisistä sini- ja kosinifunktioista koostuvana sarjana. Funktio  $f(x)$  on jaksollinen, jos kaikilla muuttujan  $x$  arvoilla  $f(x) = f(x + np)$ , kun  $n$  on mikä tahansa kokonaisluku ja jaksoväli  $p$  on se vakio, jonka välein funktio toistuu. Funktion  $f(x)$ , jonka jakso on  $L$ , Fourierin sarja on

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) \right). \quad (7)$$

Sarjan niin kutsutut Fourierin kertoimet ovat

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) \cos\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) dx \quad n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) \sin\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) dx \quad n = 1, 2, \dots$$

Käytännössä sarjaa ei voida laskea, koska se vaatisi äärettömän monta iterointia. Mitä useampi arvo lasketaan, sitä tarkemmin Fourierin sarjana esitetyn funktion arvot vastaavat alkuperäisen funktion arvoja. Sarja kuitenkin konvergoi melko nopeasti, joten muutama kymmenen iterointia riittää usein käytännössä. Eulerin kaavan

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta) \quad (9)$$

avulla, jossa  $i$  on imaginääriyksikkö ja  $\theta$  on kulma radiaaneina, voidaan Fourierin sarja esittää kompleksisessa muodossa

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{i2n\pi x}{L}}, \quad (10)$$

missä  $c_n$ :t ovat Fourierin kertoimet. Tässä tapauksessa ne ovat

$$c_n = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) e^{-\frac{i2n\pi x}{L}} dx \quad n = 0 \pm 1 \pm 2 \dots \quad (11)$$

[15, s. 486 – 497.]

## 5.2. Fourierin muunnos

Fourierin muunnos (Fourier transform, FT) on Fourierin integraaliin perustuva integraalimuunnos, jonka avulla voi ratkaista differentiaaliyhtälöitä ja tehdä aikatazon funktion muunnoksen vastaavaksi taajuustason funktioksi spektrianalyysiä varten. Sitä voi soveltaa jatkuviin ja paloittain jatkuviin funktioihin, jotka ovat integroitavissa. Jatkuvalle ajan funktiolle se voidaan esittää muodossa

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (12)$$

jossa  $t$  on aika ja  $\omega$  on kulmataajuus  $2\pi f$ . Taajuus  $f$  on jakson ajan käänteisarvo  $T^{-1}$ . Fourier-muunnetusta funktiosta halutaan usein tietää taajuustason amplitudi- ja vaihespektrit. Amplitudien funktio saadaan ottamalla muunnetusta funktiosta itseisarvo

$$A(\omega) = |F(\omega)|. \quad (13)$$

Vaiheiden funktio saadaan ottamalla muunnetusta funktiosta vaihekulma

$$\varphi(\omega) = \arg(F(\omega)). \quad (14)$$

[15, s. 506 – 521.]

### 5.3. Diskreetti Fourierin muunnos ja FFT-algoritmi

Diskreetti Fourierin muunnos (discrete Fourier transform, DFT) on diskreettiaikainen muoto Fourierin muunnoksesta. Siinä muunnettava aikajatkuva funktio diskretoidaan (näytteistetään määräväleihin) äärelliseltä väliltä, jonka jälkeen sen voidaan ajatella koostuvan äärellisestä Fourierin sarjasta. Aikadiskreetin funktion Fourier'n kertoimet voidaan laskea summalausekkeella

$$c_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-inx_k}, \quad (15)$$

jossa  $N$  on näytteiden määrä,  $f_k = f(x_k)$ ,  $x_k = \frac{2\pi k}{N}$  ja  $n=k=0, 1, \dots, N-1$ . DFT:n ratkaisu voidaan toteuttaa käyttämällä apuna vektoreita: funktion  $f_k$  arvot sijoitetaan vektoriin  $\mathbf{f} = [f_0 \cdots f_{N-1}]^T$  ja Fourier-muunnetut arvot sijoitetaan vektoriin  $\mathbf{F} = [F_0 \cdots F_{N-1}]$ . Vektorin  $\mathbf{F}$  alkioden arvot  $F_n$  saadaan kaavalla

$$F_n = Nc_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-inx_k}, \quad (16)$$

joka on funktion  $f_k$  diskreetti Fourierin muunnos eli taajuusspektri. [15, s. 524 – 525.]

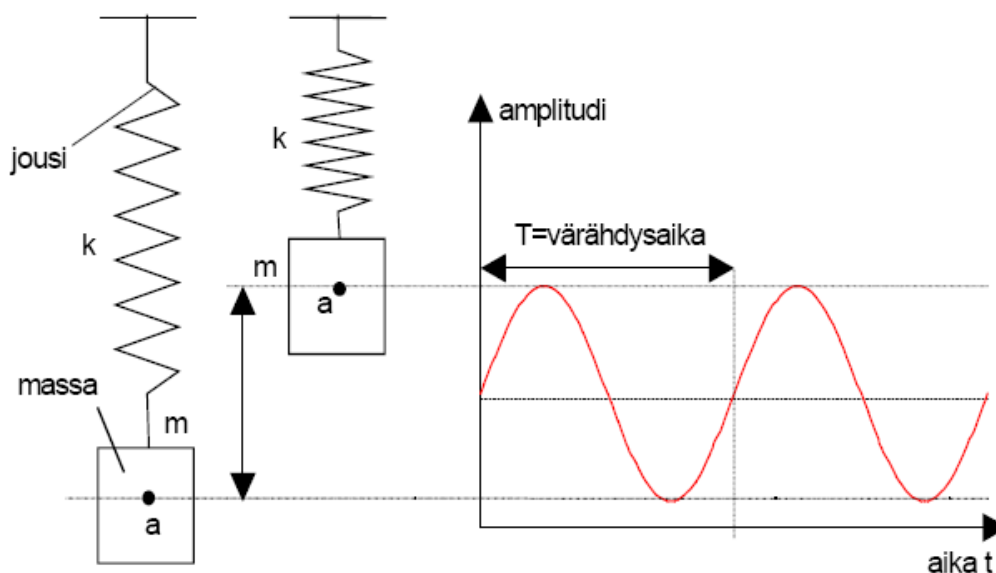
Kun DFT:llä ratkaistaan diskreetti spektri, on iterointien eli  $N$ :n määrä sama kuin diskreettien spektriviivojen määrä. DFT:n tavanomaisessa ratkaisemisessa operaatioiden määrä on  $N^2$ , joten se on raskas laskettava silloin, kun arvoja on paljon. Vuonna 1965 julkaistu nopea Fourierin muunnos -algoritmi eli FFT (fast Fourier transform) -algoritmi vähentää laskentakuormaa merkittävästi silloin kun  $N$  on kahden potenssi. Sen laskennallinen kuorma on  $N \log_2 N$ . FFT-algoritmeja on kehitetty monia erilaisia viime vuosikymmenten aikana. Bracewell-Bunemanin algoritmi on eräs nopea FFT-algoritmi, ja se on pseudokoodina esitettyä liitteenä 1. [16, s. 291 – 323.]



## 6 Värinäanalyysi

### 6.1. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt

Värähtely on fyysikaalisen systeemin liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä. Koneen värinä voidaan mallintaa vapausasteiden avulla. Tavallisella koneella, josta mitataan värinää, on vähintään kuusi vapausastetta. Ensimmäiset kolme vapausastetta ovat koneen siirtymä  $x$ -,  $y$ - ja  $z$ -akselien suuntiin. Loput kolme vapausastetta ovat kiertymät  $x$ -,  $y$ - ja  $z$ -akselien ympäri. [4, s. 40.] Yksinkertainen yhden vapausasteen värähtelijä voidaan esittää massa-jousisysteemin avulla (kuva 11).



Kuva 11. Massa-jousisysteemin värähtelyn esittäminen aikatasossa [7, s. 7].

Yhdellä sinimuotoisella värähtelytaajuudella kappaleen siirtymän  $x$  yhtälö on

$$x = X \cos(2\pi ft + \varphi), \quad (17)$$

jossa  $X$  on värähtelyn amplitudi,  $f$  on värähtelyn taajuus,  $t$  on aika ja  $\varphi$  on vaihe-ero. Värähtelyn taajuus on värähtelyn jakson ajan  $T$  käänteisluku eli  $f = T^{-1}$ . Nopeudelle  $\dot{x}$  saadaan siirtymän yhtälöstä derivoimalla yhtälö

$$\dot{x} = -2X\pi f \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (18)$$

ja kiihtyvyydelle  $\ddot{x}$  saadaan vastaavasti yhtälö

$$\ddot{x} = -4X\pi^2 f^2 \cos(2\pi ft + \varphi). \quad (19)$$

[4, s. 51.]

Harmonisen voiman vaikuttaessa kappaleeseen, alkaa kappale värähdellä voiman taajuudella. Silloin kun voima koostuu vain yhdestä taajuudesta, voidaan pakkovärähtelyn liikeyhtälöksi kirjoittaa toisen kertaluvun differentiaaliyhtälö

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \sin(\omega t), \quad (20)$$

missä  $x$  on kappaleen siirtymä,  $k$  on kappaleen jäykkyys,  $m$  on massa,  $c$  on vaimennus,  $F$  on vaikuttava voima ja  $\omega$  on kulmataajuus, joka voidaan esittää myös muodossa  $2\pi f$ . Värähtelyn amplitudin yhtälö on

$$X = \frac{F}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}}. \quad (21)$$

ja vaikuttavan voiman ja värähtelyn välinen vaihe-ero on

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega c}{k - \omega^2 m}\right). \quad (22)$$

Värähtelyn suuruus pakkovärähtelyssä riippuu siis rakenteen massasta, vaimennuksesta ja jäykkyydestä sekä herätteen taajuudesta. Se pakkovoiman taajuus, jolla siirtymä saavuttaa maksiminsa, on rakenteen resonanssitaajuus. [4, s. 40 – 44; 17, s. 75 – 78.]

Käytännössä ei välttämättä tiedetä, johtuuko koneen korkea tärinätaaso suurista vaikuttavista voimista vai resonanssista. Värähtelyn voimakkuus johtuu muun muassa pyörivästä liikkeestä syntyvien voimien ja rakenteen dynaamisten ominaisuuksien yhteisvaikutuksesta. Värähtelyä aiheuttavia voimia syntyy muun muassa pyörivien akseleiden ja roottoreiden epätasapainosta, akselien linjausvirheistä, edestakaisesta liikkeestä (männät), hammaspyörien kosketuksesta, hihnojen liikkeestä, hankauksista sekä väliaineiden virtauksista. Yleensä näiden voimien suuruus on verrannollinen koneen kierroslukuun. Eri koneenosilla on omat yksittäiset ominaistajuutensa, mikä lisää rakenteessa olevien ominaistajuuksien määrää. Kuormituksen vaikutus tärinään voi eri konetyypeillä olla huomattavan erilaista. Joillakin koneilla suurin tärinä esiintyy pienellä kuormituksella, toisilla se esiintyy suurella kuormituksella. Useilla koneilla se pysyy samana kuormituksesta riippumatta. [4, s. 107 - 112.]

## 6.2. Värinän mittaaminen

### 6.2.1. Värinämittausten anturityypit, suureet ja yksiköt

Värähtelyä mitataan yleisesti joko siirtymänä, nopeutena tai kiihtyvyytenä. Nämä mittaukset vaativat omat toisistaan eroavat mittausmenetelmänsä. Mittaustulokset voidaan kuitenkin muuntaa toisiksi integroimalla tai derivoimalla. Siirtymän  $x$  mittaus voidaan derivoida nopeudeksi  $\dot{x}$  ja edelleen kiihtyvyydeksi  $\ddot{x}$ . Jatkamalla mittaussignaalin derivointia saadaan kiihtyvyyden muutosnopeus ”jerk”, joka on siirtymän kolmas aikaderivaatta  $\dddot{x}$ . Myös siirtymän neljättä aikaderivaattaa  $x^{(4)}$  hyödynnetään kunnonvalvonnassa. Integroimalla saadaan mittausten muunnokset vastaavasti toiseen suuntaan. Derivointi on käytännössä usein toimiva tapa muuttaa suureita toisiksi, mutta integroinnissa tapahtuva kumulatiivinen summaus kasaa kvantisointivirheet, kanava-offsetit ja anturin virheet aiheuttaen virhettä erityisesti matalilla taajuuksilla. [2, s. 219 – 220; 17, s. 79.]

Siirtymän yksikkönä on tavallisesti metri ja nopeuden yksikkönä m/s. Kiihtyvyyden mittayksikkönä käytetään tavallisesti  $\text{m/s}^2$  tai maan putoamiskiihtyvyyttä  $g$ , jonka tekniikan standardiarvo on  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Siirtymän kolmannelle ja neljännelle derivaatalle

yksiköt ovat  $\text{m/s}^3$  ja  $\text{m/s}^4$ . Näiden edellä voidaan käyttää SI-järjestelmän etuliitteitä, ja yleisesti on käytössä kiihtyvyyden  $g$ :n tuhannesosa kuvaava merkintä  $mg$ . [4, s. 46; 17, s. 12.]

Pyörrevirta-anturi on yleisesti käytetty siirtymäanturi, jolla mitataan tavallisesti noin kahden millimetrin etäisyydellä kiinnityskohdan ja tutkittavan kohdan välistä suhteellista liikettä. Tavallisin sovellus on liukulaakeroitujen koneiden kunnonvalvonnassa. Anturin toiminta perustuu siihen, että sen päässä oleva kela muodostaa magneettikentän, joka induoi pyörrevirtoja kohtaamaansa ferromagneettiseen pintaan. Pyörrevirrat aiheuttavat muutoksen kelan jännitteeseen anturin ja kohteen pinnan etäisyyteen verrannollisesti. Siirtymäanturilla voidaan mitata akselin värähtelyn lisäksi pinnanmuodon muutoksia, asemaa ja akselin ratakäyriä, ja sitä voidaan käyttää linjaustilan ja liukulaakerin kunnonvalvonnassa. Siirtymämittaus on suositeltava hidaskäyntisillä koneilla (alle 300 rpm) silloin, jos viat ilmenevät matalilla taajuuksilla (alle 100 Hz). [4, s. 49 – 50; 19, s. 2.]

Nopeusanturina käytetään tavallisesti massa-jousianturia. Siinä anturin kuoren sisällä on kela, jonka sisällä on jousien varaan kiinnitetty magneettinen massakappale. Kelaan syntyy massakappaleen nopeuteen verrannollinen jännite, josta saadaan mittausignaali. [4, s. 47 – 50.] Seismistä nopeusanturia käytetään absoluuttisen värinän mittaamiseen taajuusalueella 10 – 1000 Hz. Tyypillisesti niitä käytetään turpiinien valvonnassa. Optisia nopeusantureita voidaan käyttää laajalla taajuusalueella suhteellisen värinän mittaamiseen. [19, s. 2.]

Kiihtyvyyssanturi voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Piettosähköiset anturit ovat värähtelymittauksissa yleisimpiä. Niiden dynamiikka-alue on laaja, ja ne kattavat laajan taajuusalueen hertsin osista satoihin kilohertzeihin. Rakentaltaan siinä on tavallisesti anturin runkoon kiinnitetty pietsoelementti, jonka päällä on seisminen massa. Käytössä on yhä enemmän myös mikrosysteemitekniikalla (Microelectromechanical Systems, MEMS) tehtyjä antureita, joihin voi olla integroituna kokonaisen mittausjärjestelmän sisältävä mikropiiri yhdessä piisirussa. Useimmiten MEMS-kiihtyvyyssanturit perustuvat kapasitiiviseen massa-jousimittaukseen.

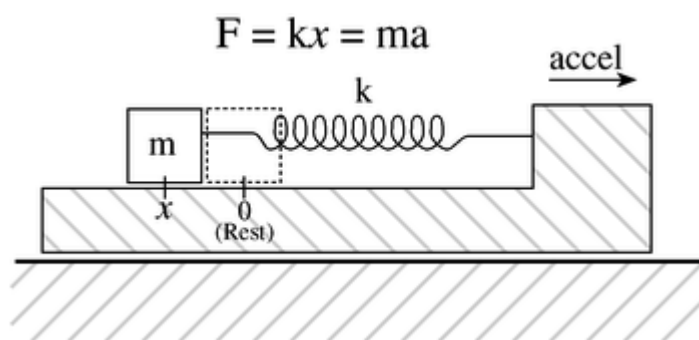
[2, s. 237 – 244.]

### 6.2.2. Kiihtyvyyden kapasitiivinen massa-jousimittaus

Massa-jousimittaus perustuu massaltaan tunnettuun kappaleeseen, joka on kiinnitetty tunnetun jousivakion välityksellä anturin runkoon (kuva 12). Anturin kiihtyvyys  $a$  saadaan Hookeen lain pätevyysalueella laskettua kaavalla

$$a = \frac{kx}{m}, \quad (23)$$

jossa  $k$  on jousivakio,  $x$  on poikkeama kappaleen tasapainoasemasta ja  $m$  kappaleen massa. Koska  $m$  ja  $k$  ovat vakioita, on kiihtyvyys ajateltavissa siirtymän  $x$  funktiona.



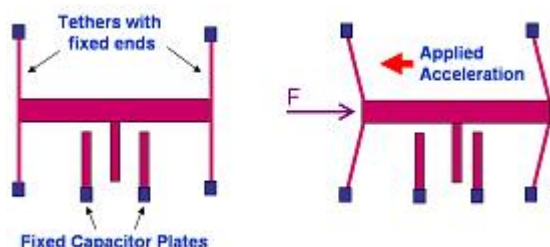
Kuva 12. Massa-jousimittauksen toimintaperiaate [20].

Siirtymää mitataan varsin yleisesti kapasitiivisesti, jolloin seismissä massassa kiinni oleva johdinlevy muuttaa liikkuessaan välimatkaa anturin runkoon kiinnitettyihin johdinlevyihin nähden. Fysiikasta tunnetaan kapasitanssin muodostuminen kondensaattorissa, jolloin kapasitanssi

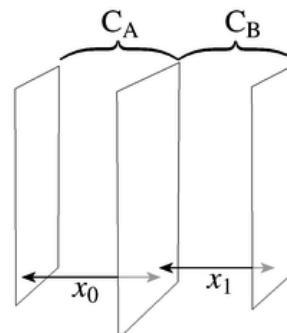
$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (24)$$

jossa  $\varepsilon_r$  on väliaineen suhteellinen permittiivisyys,  $\varepsilon_0$  on dielektrisyysvakio,  $A$  on elektrodilevyjen pinta-ala ja  $d$  on elektrodien välinen etäisyys [21, s. 265]. Tästä yhteydestä käy ilmi, että kapasitanssi on kääntäen verrannollinen johdinlevyjen

etäisyyteen. Muiden tekijöiden ollessa tunnettuja vakioita saadaan poikkeama selville periaatteessa mittaamalla kapasitanssia.



Kuva 13. Massa-jousisysteemin poikkeaman kapasitiivinen mittaus mikromekaanisessa anturissa [22].



Kuva 14. Massa-jousianturin johdinlevyjen väliset kapasitanssit ja etäisyydet [20].

Käytännössä mikromekaanisissa massa-jousiantureissa on ainakin kaksi mitattavaa kapasitanssia. Tällöin anturissa on kaksi kiinteää johdinlevyä ja niiden välissä seismisessä massassa kiinni oleva johdinlevy (kuvat 13 ja 14). Yhdessä anturisirussa voi olla useitakin tällaisia antureita. Väliaineen permittiivisyyden  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$  ja elektrodien pinta-alan  $A$  tulo voidaan ajatella aineesta ja rakenteesta riippuvana vakiona  $k$  ja johdinlevyjen välimatka  $d$  on  $x_0$ , jolloin kapasitanssi  $C = k/x_0$ . Edellä olevan perusteella voidaan muodostaa kaavat mitattaville kapasitansseille:

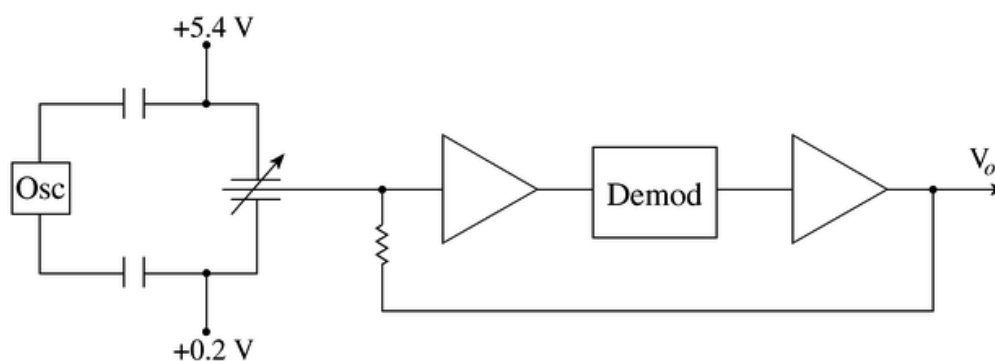
$$C_A = \frac{k}{x_0 + x} = C \frac{x_0}{x_0 + x}$$

$$C_B = \frac{k}{x_0 - x} = C \frac{x_0}{x_0 - x}.$$
(25)

Kaavoissa  $C_A$  ja  $C_B$  ovat kiinteistä elektrodeista mitattavat kapasitanssit liikkuvan elektrodin suhteen,  $C$  on kapasitanssi (sekä  $C_A$ :n että  $C_B$ :n) lepotilassa,  $x_0$  on seismisessä massassa kiinni olevan johdinlevyn ja kiinteän johdinlevyn välinen etäisyys ja  $x$  on seismisen massan siirtymä tasapainoasemasta eli keskimmäisen johdinlevyn siirtymä. Kapasitanssin muutokseksi voidaan laskea edellä olevan perusteella kirjoittamalla

$$\Delta C = C_A - C_B = \frac{-2x}{x^2 - x_0^2} \approx -\frac{2}{x_0^2}, \quad (26)$$

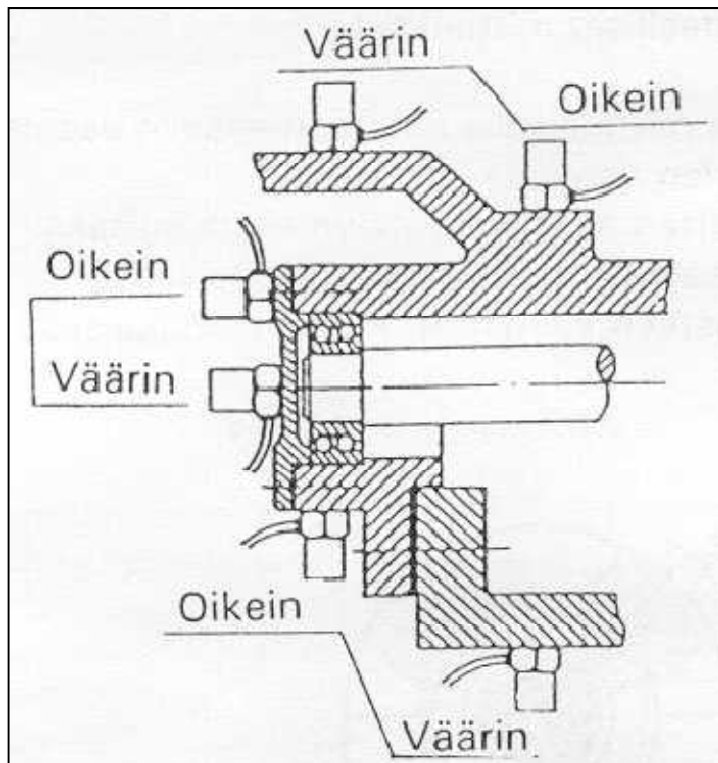
jossa likiarvokaava pätee käytännössä riittävän hyvin silloin, kun siirtymä  $x$  on pieni. Pienillä  $x$ :n arvoilla siirtymä on käytännössä verrannollinen kapasitanssin muutokseen. Erään yleisesti käytetyn kiihtyvyyssmittausjärjestelmän lohkokaavio näkyy kuvassa 15. [20.]



Kuva 15. Analog Devices ADXL50 -kiihtyvyyssmittauspiirin lohkokaavio [20].

### 6.2.3. Värinämittauksen mittauspisteet ja anturin kiinnitys

Yleisesti ottaen värähtelymittauksen mittauspiste tulee valita siten, että värähtelylähte ja mittausanturi ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Tyypillisesti korkeataajuinen värähtely menettää osan energiastaan kohdatessaan rajapinnan, jolloin mittauspistettä valittaessa tulee pyrkiä minimoimaan mittauksen ja värähtelylähteen välisten rajapintojen määrää. Tämä on tärkeää huomioida etenkin silloin kun käytettävä analyysimenetelmä hyödyntää korkeita taajuuksia. Värähtely siirtyy koneen pyörivistä massoista laakerien kautta runkoon, joten mittauspisteet on myös syytä valita laakerien läheltä. Myös laakerivian aiheuttama värähtely on voimakkaampaa laakerin lähellä. Pääsääntöisesti värähtelymittaukset suoritetaan säteissuunnassa. Tarvittaessa voidaan mitata myös akselin suuntaisesti. Kuvassa 16 on esitetty oikein ja väärin valittuja mittauspisteitä eräässä konelohkossa. Pysyvän mittauspisteen valinnassa tulee huomioida myös anturin huollettavuus, suojaus ja kestävyys valitussa paikassa sekä mahdolliset haitat koneen huollolle tai käytölle. [4, s. 54; 23, s. 1 – 2.]



Kuva 16. Anturin paikan valinta värähtelymittauksessa [23, s. 2].

Standardin PSK5702 mukaan kustakin koneesta on valittava niin monta mittauspistettä, ettei mikään ennalta arvattavissa oleva vika kone-elimissä jää havaitsematta. Minimimäärä on yksi kunkin laakerin kohdalla. Tällöin tulee tästä pisteestä tehdyn mittauksen perusteella voida arvioida laakerin kunnon lisäksi myös muiden kone-elinten kuntoa.

Standardin mukaan kunnonvalvontamittauksissa olisi pyrittävä siihen, että koneista tehdään mittaukset kunkin laakerin kohdalta kolmeen keskenään kohtisuoraan suuntaan (vaaka, pysty, akseli). Jotkin viat näkyvät aina selvemmin tietyissä mittaussuunnissa, joten koneessa oleva vikaantumisen voidaan arvioida tarkemmin. Kiinteissä kunnonvalvontajärjestelmissä joudutaan kuitenkin kustannussyistä usein tyytymään vain yhteen mittaukseen laakeria kohden. [4, s. 53.]

Kiihtyvyyssanturit kiinnitetään mitattavaan kohteeseen tavallisimmin ruuvilla, magneetilla tai käsin painamalla. Piezoilmiöön perustuvien antureiden mitta-alue on



tyypillisesti 2 Hz – 14 kHz. Käsini kiinni pidettäessä ylärajataajuus on noin 500 – 600 Hz, ja tulokset riippuvat suuresti mittaajan puristusvoimasta ja koetinpuikon kiinnityskulmasta. Magneettikiinnityksellä pinnan tasaisuudesta ja magneetin voimakkuudesta riippuen ylärajataajuus on noin 800 Hz – 4 kHz, mutta yleensä se on kuitenkin 1 – 2 kHz. Riittävän kireällä ruuvikiinnityksellä ja sopivalla anturilla voidaan mitata jopa yli 20 kHz:n taajuuksia. Muita käytössä olevia kiinnitystapoja ovat mehiläisvahakiinnitys ja liimauskiinnitys. [4, s. 46; 2, s. 246]

#### **6.2.4. Mittaustiedon digitalisointi**

Anturilta analogisesti mitattava, ja usein myös analogisesti lähetettävä, mittaustieto on digitalisoitava ennen kuin sitä voidaan käsitellä mikroprosessoripohjaisissa järjestelmissä. Analogisen signaalin digitalisointia kutsutaan AD-muunnokseksi. Se perustuu sähköisen signaalin diskretoivaan näytteistykseen, jossa signaalille määritellään AD-muuntimessa (A/D converter) sen tasoa lähiten vastaava digitaalinen arvo näytteenottotaajuuden määrittämin välein. Analogisen arvon digitaalisen vastineen etsimistä kutsutaan näytteen kvantisoinniksi ja siinä syntyvää virhettä kvantisointivirheeksi. Kvantisoitua arvoa pidetään muuntimessa yllä pitopiirin avulla, kunnes seuraava näytteistettävä arvo korvaa sen. [24, s. 20 – 21.]

Digitaalisen signaalin amplitudiresoluutio määräytyy yksittäisen näytteen kvantisointiin käytettävien bittien määrästä, jolloin näytteen bittien määrä  $n$  vastaa  $2^n$ :ää signaalin voimakkuutta kuvaavaa tasoa. Näytteenottotaajuus määrää, kuinka nopeita muutoksia voidaan mittauksesta havaita, ja siten myös mitattavan signaalin suurimman taajuuden. Nyquist-Shannonin näytteenottoeteoreeman mukaan näytteenottotaajuuden tulee olla vähintään kaksi kertaa suurempi kuin mitattava suurin taajuus, jotta signaali voidaan rekonstruoida. Suurinta mitattavaa taajuutta korkeammat taajuudet on syytä suodattaa pois laskostumisenestosuodattimella (anti-aliasing filter) ennen näytteiden kvantisointia. Muuten seurauksena voi olla laskostumisilmiö, jossa korkeampi taajuus tulkitaan AD-muunnoksen seurauksena matalammiksi. Käytännössä värähtelymittauksissa käytetään yleensä kerrointa 2,56 näytteenottotaajuuden ja suurimman mitattavan taajuuden suhteena. [2, s. 269 – 270.]

### 6.3. Värinän aikatason analyysi

#### 6.3.1. Yleistä aikatason valvonnasta

Aikatasossa mittaussignaalin suuruutta voi kuvata huippuarvo, huippuamplitudi, huipusta huippuun -arvo, tehollisarvo, keskiarvo tai desibeliarvo. Aikatasossa tyypillisiä oireita ovat seuraavat [4, s. 115]:

- jaksojen epäsäännöllisyydet
- transientit
- hitaasti tapahtuvat muutokset
- korkeat iskumaiset huiput.

Tehollisarvo (Root Mean Square, RMS) on tavallisin tapa ilmoittaa värähtelysignaalin suuruus. Värähtelyn nopeudelle  $v$  tehollisarvon laskentayhtälöksi voidaan kirjoittaa

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} . \quad (27)$$

Yhtälö on vastaava myös muille mittasuureille. Tehollisarvo kuvaa melko hyvin värähtelyn keskimääräisen energiasisällön suuruutta. Hetkelliset arvot, kuten iskut, eivät kasvata sitä kovinkaan paljoa. [4, s. 51 – 52.]

Huippuarvo (peak) on eräs tapa ilmoittaa värähtelysignaalin suuruus. Se kertoo mittausaikana vallinneen korkeimman hetkellisen amplitudiarvon. Huippuarvo on monien vikojen aikaisessa havaitsemisessa parempi kuin tehollisarvo. Laakerivika tai hammasvaurio näkyy ensin huippuarvon kasvuna ja vasta myöhemmin tehollisarvon kasvuna.

Huippuamplitudi on toinen tapa ilmoittaa värähtelysignaalin suuruus. Se saadaan kertomalla laskettu tehollisarvo tekijällä  $\sqrt{2}$ . Näin saatu arvo on eri kuin varsinainen huippuarvo, sillä minkään todellisen koneen mitattu tärinä ei muodostu yksittäisestä siniaallosta.

Huipusta huippuun -arvo on yleinen mittauksen esitystapa lähinnä siirtymämittauksissa. Se kertoo mittausaikana tapahtuneiden suurimman ja pienimmän arvon erotuksen. Tieto voi olla merkityksellinen erilaisissa välykseen liittyvissä asioissa. Keskiarvo on Japanissa tavallinen tapa ilmoittaa värähtelysignaalin suuruus. Se on melko lähellä tehollisarvoa, mutta sitä ei ole käytetty Suomessa kovin yleisesti. Desibeli on erityisesti SPM- ja melumittauksissa tavallinen tapa osoittaa mitatun arvon suuruus. Se voidaan tulkita mitatusta arvosta  $A_m$  kaavalla

$$A_{dB} = 20 \log \left( \frac{A_m}{A_v} \right), \quad (28)$$

jolloin on tiedettävä myös, mikä on käytetty vertailuarvo  $A_v$ . [4, s. 52.]

### 6.3.2. PeakVue-analyysi

PeakVue on Emersonin kehittämä aikatazon signaalin analysointimenetelmä, jossa tietyllä mittausvälillä määritetyn pituisin jaksoin otetaan kyseisen jakson maksimi-arvo. Menetelmässä aikajakson pituus on sellainen, että mittauksen maksimitaajuus on havaittavissa siltä eli  $\Delta t \geq (2,56 f_{\max})^{-1}$ . Saadut maksimi-arvot tasasuunnataan ja lopulta niistä muodostetaan PeakVue-signaaliksi kutsuttu aikatazon kuvaaja, jossa esitetään pelkät tasasuunnatut maksimi-arvot mitatuilta aikajaksoilta. Menetelmällä on siten mahdollista nähdä korkeataajuiset purskeet helpommin aikatasossa. [2, s. 222.]

### 6.3.3. Standardin mukaiset tunnusluvut

Värähtelyn kokonaistason tunnusluvut voivat olla siirtymä, nopeus tai kiihtyvyys. Yleensä käytetään tehollisarvoa, mutta muitakin arvoja voidaan käyttää. Tärinärasitus on määritelty muun muassa ISO 10816:ssa, VDI 2056:ssa ja PSK 5701:ssä. Perinteisesti se on ollut värähtelyn nopeuden tehollisarvo taajuuskaistalta 10 Hz – 1 kHz. Uudemmat standardit mahdollistavat muutkin suureet ja vapaasti valittavan taajuuskaistan. [4, s. 80.]

Tunnetuimmat sallittuja värähtelytasoja käsittelevät standardit ovat laakeritärinän osalta VDI 2056, ISO 10816, PSK 5704 ja PSK 5705 sekä akselivärinän osalta VDI 2059. Näiden lisäksi on olemassa erilaisia suosituksia ja diagrammeja erikokoisten, -ikäisten ja -pyörimisnopeuksisten koneiden sallituille ja ei-sallituille värinäarvoille. Standardi ISO 10816 (ja PSK 5704) on tarkoitettu koneiden yleiskunnon arvioimiseksi. Sitä ei ole tarkoitettu erityisesti yksittäisen koneenosän tärinävalvontaan tai vian määrittämiseen. Standardi käsittelee vain niitä värähtelyjä, jotka esiintyvät koneen rungossa, laakereissa ja kiinnityspisteissä. Standardit soveltuvat pyörimisnopeusalueelle 120 – 15 000 rpm. Ne on tarkoitettu sähkömoottoreiden, pumppujen, puhaltimien, turbiinien, kompressoreiden ja vastaavien pyörivien koneiden valvontaan. Mittaavana suurena on tärinärasitus. Koneelle annettava tärinärasitusarvo on suurin niistä arvoista, jotka on mitattu koneen merkittävistä mittauspisteistä. [4, s. 98-99.] Rajat voidaan asettaa standardin PSK 5705 mukaisesti kaavoilla

$$\text{Huomautusraja} = \bar{y} + 3\sigma, \quad (29)$$

$$\text{Hälytysraja} = 1,6\bar{y} + 2\sigma \quad (30)$$

ja

$$\text{Vaurioraja} = 4\bar{y} + 2\sigma, \quad (31)$$

joissa  $\bar{y}$  on mittauksen aritmeettinen keskiarvo

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (32)$$

ja  $\sigma$  on signaalin keskihajonta, joka on varianssin  $\mu$  neliöjuuri eli

$$\sigma = \sqrt{\mu} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}. \quad (33)$$

[25, s. 5; 2, s. 254.]

#### 6.3.4. Käyryysluku, kurtosis-arvo ja huippukerroin

Käyryysluku (skewness) ilmaisee signaalin arvojen jakautuman symmetrisyyttä. Se ilmaisee esimerkiksi offsetista aiheutuvaa mittausvirhettä. Kurtosis-arvo ilmaisee signaalin piikikkyyttä. Sen avulla on mahdollista tehdä vierintälaakerin kunnosta arvio yhdellä mittauksella ilman pitkään jatkunutta trendiseurantaa. Kunnossa olevalla laakerilla kurtosis on noin 3,0, ja sitä paljon suuremmat arvot voivat merkitä laakerivauriota. Kurtosis-arvo perustuu siihen oletukseen, että ehjän laakerin värähtely on satunnaisvärähtelyä, joka noudattaa Gaussin jakaumaa. Värähtelysignaalin tason  $y$  käyryysluvun  $\alpha_3$  laskentayhtälö on

$$\alpha_3 = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^3 \quad (34)$$

ja kurtosis-arvon  $\alpha_4$  laskentayhtälö on

$$\alpha_4 = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^4. \quad (35)$$

[2, s. 254, 283; 7, s. 17.]

Huippukerroin (Crest Factor) kuvaa kurtosiksen tavoin signaalin piikikkyyttä. Se on yksinkertaisesti signaalin huippuarvon ja tehollisarvon suhde. [2, s. 283.] Sen laskentayhtälö on

$$C = \frac{\hat{y}}{y_{rms}}. \quad (36)$$

## **6.4. Väriinän spektrianalyysi**

### **6.4.1. Yleistä spektrivalvonnasta**

Värähtelyspektrit voidaan muodostaa aikatasosignaalista joko FFT-algoritmin avulla laskemalla tai sitten käyttämällä kapeakaistaisia taajuussuotimia. Spektrivalvonta on erittäin käyttökelpoinen lukuisia eri osia sisältävän koneen kunnonvalvonnassa ja vika-analyseissä. Erottamalla eri koneenosista tulevan värähtelyn eri taajuudet ja niitä vastaavat värähtelyamplitudit voidaan yksittäisten koneenosien kuntoa valvoa. Menetelmää varten on oltava tiedossa eri akselien kierrosnopeudet ja eri koneenosien rakenne. Tarpeellisia tietoja ovat esimerkiksi hammaspyörän hampaiden lukumäärä, vierintälaakereiden laakerityyppi ja valmistaja sekä roottorin siipien lukumäärä. Logaritmisessa spektrissä saadaan samaan kuvassa näkymään sekä matalat että korkeat amplitudit. [4, s. 88.]

Spektrivalvonta perustuu spektrimaskien eli hälytysrajaspektrien käyttöön. Mikäli kone on muuttavanopeuksinen, voidaan eri kierrosluku- ja kuormitusalueille luoda omat hälytysrajaspektrinsä. Hälytysrajat muodostetaan mittaamalla värinät silloin, kun koneen voidaan olettaa olevan hyvässä kunnossa. Mittauksesta saadun vertailuspektrin avulla luodaan maski, jossa määritellään sopivat rajat taajuus- ja amplitudiarvojen vaihtelulle. Useampiakin maskeja voidaan luoda, jolloin esimerkiksi alemmat raja-arvot omaava maski toimii hälytysrajana ja ylempät raja-arvot omaava maski vauriorajana. [4, s. 90.]

Spektrivalvonta perustuu koneen eri vikataajuuksien ja koneen kierrosluvun tietämiseen sekä riittävän laajakaistaisen ja tarkkaerotteisen mittauksen tekemiseen oikealla mittasuureella. Taajuuskaistojen tunnusluvut lasketaan tietyltä taajuuskaistalta, jolla jokin ennakkoon määritelty vika mahdollisesti ilmestyy. Spektrihälytyksen tullessa on ensin selvitettävä, millä taajuudella tärinä on kasvanut ja kuinka voimakasta kasvu on ollut. Vian luonne voidaan heti määrittellä, jos hälytys on tunnetun vikataajuuden nousun aiheuttama. Vian vakavuus arvioidaan tärinän trendin arvon suuruudesta, trendin jyrkkyydestä, muiden spektrioppiikkien arvojen muutoksista sekä muiden

mittauspisteiden ja -suureiden muutoksista. Vian tarkan syyn ja vakavuuden selvittäminen voi vaatia erillisiä, tarkempia, mittauksia. Taulukossa 2 on esitetty joitakin tapoja määrittää vikojen kaistoja. Taajuuskaistan tunnusluku voi olla joko valitun taajuuskaista värähtelyn tehollisarvo tai taajuuskaistalla olevaa korkeinta amplitudiarvoa. Vierintälaakerien korkeataajuisten värähtelyn mittausten signaalista suodatetaan pois matalataajuinen osa, ja jäljelle jääneestä osasta lasketaan laakerin kuntoa kuvaava tunnusluku. [4, s. 81 – 82.]

*Taulukko 2. Vikojen näkyminen taajuuskaistalla. Kaavoissa  $n$  on pyörimistaajuus ja  $Z$  on hampaiden lukumäärä. [4, s.81.]*

Kaista	Kaistalla esiintyvät viat
$n$	Tällä kaistalla ilmenee epätasapaino.
$0,45n...0,5n$	Tällä kaistalla näkyy liukulaakerin öljykalvon pyörteily.
$2n...6n$	Tällä kaistalla näkyy mm. linjausvirhe ja kiinnitysten löystyminen.
$(Z-4)n...(Z+4)n$	Tällä kaistalla näkyy hammaspyörän hampaiden kunnan kehittyminen.

Taajuustasosta etsitään sellaisia oireita, joiden tiedetään vaikuttavan kyseisen koneen vikaantumisprosesseihin. Tulkinnassa tulee huomioida pyörimisnopeuden ja prosessinmuutosten vaikutukset. Oireita ovat seuraavat [4, s. 114]:

- kokonaistehoarvo
- amplitudi pyörimisalueella
- harmonisen, aliharmonisen ja epäharmonisen värähtelyn osuus
- matala-, keski- ja korkeakaistainen värähtelyenergia
- eri spektrikomponenttien väliset amplitudisuhteet
- kohinataso
- yksittäiset spektrihuiput
- amplitudit perustaajuudella ja monikerroilla muualla kuin pyörimisalueella
- summa- ja erotustaajuudet
- amplitudi sivunauhoilla
- värähtelyvoimakkuudet eri mittaussuunnissa
- eri spektrikomponenttien vaihe-erot

Vikojen eri ilmenemissääntöjen perusteella voidaan rakentaa asiantuntijajärjestelmiä, jotka pystyvät automaattisesti määrittämään koneiden kunnan tehtyjen mittausten perusteella käyttämällä tiettyä säännöstöä. Tällaisia järjestelmiä on jonkin verran käytössä suomalaisessa teollisuudessa. [4, s. 82.] Kehittyneimmissä automaattisissa diagnostiikkajärjestelmissä voidaan hyödyntää myös tilastollisia menetelmiä, sumeaa logiikkaa ja neuroverkkoja. Kehittyneitä menetelmiä käytetään myös koneiden turvallisen jäljellä olevan käyttöiän laskemiseen (prognostiikkaan), mistä on hyötyä huoltoseisokin optimoinnissa. [2, s. 360 – 362, 486 – 495.]

#### **6.4.2. Painotusikkunat ja spektrin keskiarvoistus**

FFT-algoritmin käyttämiseksi todellisen mittausdatan kanssa on syytä käyttää painotusikkunaa. Se muokkaa muunnettavan mittausjakson aikatason signaalin sellaiseksi, että se alkaa ja päättyy samasta tasosta. Operaatiossa mittaussignaalin aikaikkuna kerrotaan painotusikkunalla, joka on jokin painotusfunktio. Painotusikkunafunktioita on monia erilaisia. Kunnanvalvonnassa suosituin painotusikkuna on Hanning-ikkuna. Muita ikkunoita ovat muun muassa Hamming-, uniform-, suorakaide-, vino kosini-, eksponentiaali- ja voimaikkunat. Eri ikkunoilla on omia sovelluskohtaisia etujaan. Ikkunafunktiolla kerrotun signaalijakson päiden amplitudit tyypillisesti heikkenevät, mikä vaikuttaa signaalin energiasisältöön. Amplitudispektrissä asiaa voidaan korjata käyttämällä korjauskerrointa, joka on esimerkiksi Hanning-funktiolle 2. [2, s. 203 – 204.]

Satunnaisvaihtelun merkitystä mittaustuloksissa voidaan vähentää keskiarvoistamalla useampia tuloksia keskenään. Kun spektri lasketaan diskreetisti FFT-algoritmin avulla, voidaan keskiarvoistus tehdä kullekin spektriviivalle erikseen. Normaalisissa keskiarvoistuksissa käytetään muutamaa eri näytettä. Useamman näytteen käyttäminen yhden arvon ilmoittamiseksi lisää mittaukseen tarvittavaa aikaa. Tätä kierretään limittämällä mittauksen aikaikkunoita keskenään. Päällekkäisistä aika-alueista huolimatta kaikki aikaikkunat tulee laskea erikseen, koska jokaiselle ikkunalle pitää laskea painotusikkuna erikseen. [2, s. 272.]



### **6.4.3. Kepstrivalvonta**

Kepstri (cepstrum) on logaritmisen tehospektrin Fourier-muunnoksen neliö. Taajuusakselia vastaa kepstrin esityksessä jaatuusakseli. Jaatuuden (qufreny) yksikkö on 1/Hz eli sekunti. Kepstristä voidaan havaita spektrin erilaisia säännöllisyyksiä, joita voivat olla harmonisten taajuuksien sarjat ja sivunauhataajuudet. Taajuuden monikerrat näkyvät kepstrissä yhtenä piikkinä. Kepstrianalyysistä on saatu hyviä kokemuksia erityisesti vaihteiden kunnonvalvonnassa. Mitattava signaali on suodatettava halutulta taajuusalueelta, jotta kepstrianalyysi olisi tehokas. Suodatus voi olla esimerkiksi ryntötaajuuden ympärillä oleva 200 Hz:n kaista. [4, s. 76; 2, s. 216 - 217.]

### **6.4.4. Vektorivalvonta**

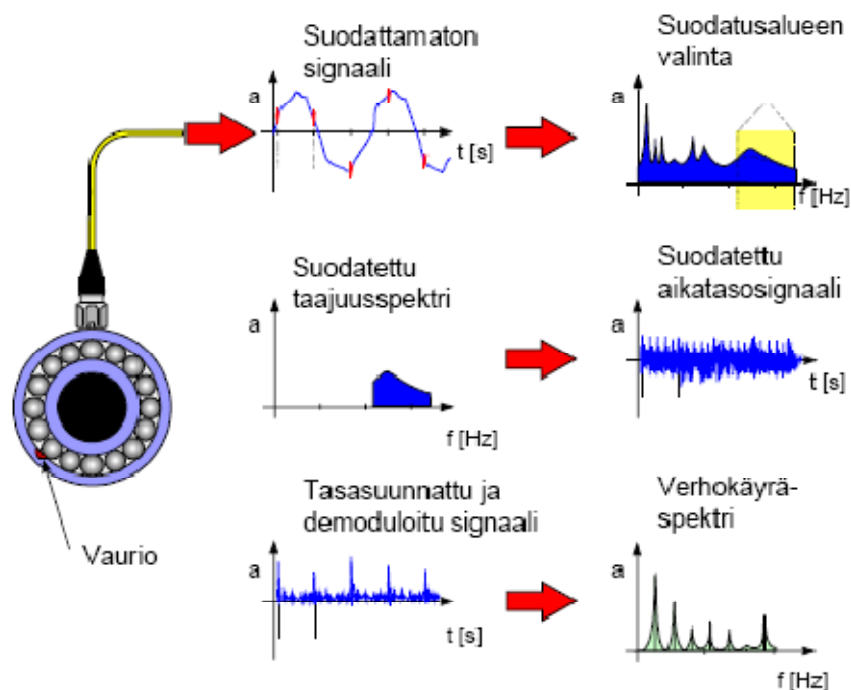
Vektorivalvonta on tarkka menetelmä seurattaessa koneen tasapainotilaa ja niitä vikoja, jotka aiheuttavat muutoksen sekä värähtelyn taajuuteen että vaihekulmaan. Esimerkkinä tällaisesta viasta on poikittainen särö. Vektorivalvonnassa mitataan ensin valvottavan värähtelytaajuuden amplitudi ja vaihekulma. Vaihekulman mittaukseen tarvittava tahdistussignaali otetaan akselin pyörimisliikkeestä. Mittausarvot yhdistetään värähtelyvektoriksi, jota voidaan tarkastella polaarikoordinaatistossa. Valvottavien värähtelyvektorien ympärille asetetaan hälytysrajat, jolloin sallitun alueen ylityksestä annetaan hälytys. Tietyllä värähtelytaajuudella voidaan saada vektorivalvonnassa hälytys, vaikka spektrissä tätä taajuutta vastaava amplitudi ei ole muuttunut ollenkaan tai se on pienentynyt. Vektorivalvonnalla voidaan koeluonteisesti määrittää myös koneen ominaistajuuudet, kun mittauspisteen värähtelyvektoria seurataan koneen kierrosluvun muuttuessa. Saaduista tuloksista voidaan piirtää Nyquistin tai Boden diagrammi. [4, s. 92 – 93.]

### **6.4.5. Verhokäyräanalyysi**

Verhokäyräanalyysi (envelope analysis) on signaalinkäsittelymenetelmä, jolla signaalista erotetaan säännöllisesti toistuvia heikkotehoisia komponentteja. Se perustuu

amplitudimoduloituneen signaalin suodatukseen ja demodulointiin. Amplitudimodulaatiossa moduloitava signaali kerrotaan sitä korkeampitaajuisen kantoaallon signaalin kanssa. Moduloiduksi signaaliksi voidaan ajatella vikataajuus ja kantoaallosi jokin korkeataajuinen värähtely, kuten esimerkiksi vierintälaakerin ominaistaajuus tai jokin muu vikataajuutta oleellisesti korkeampi taajuus. [2, s. 220 – 221.] Verhokäyräanalyysi on osoittautunut luotettavaksi erityisesti hitaasti pyörivien koneiden vierintälaakereiden vikojen selvityksessä [4, s. 74].

Kuvassa 17 laakerista mitatussa aikatason signaalissa esiintyy alkavan vaurion aiheuttamia korkeataajuisia signaaleita ohitustaajuudella, jonka jaksonaika on  $T$ . Signaalista suodatetaan purskeet sisältävä taajuusalue, jolla sijaitsee iskujen herättämä laakerin ominaistaajuus. Suodatetun signaalin vahvistuksen jälkeen se demoduloidaan tasasuuntaamalla ja alipäästösuodattamalla siitä kantoaalto pois. Tasasuuntaus voidaan toteuttaa joko ottamalla signaalista itseisarvo tai korottamalla se toiseen potenssiin. Demoduloidusta signaalista lasketaan lopuksi niin sanottu verhokäyräspektri, jossa näkyy ohitustaajuus ja sen kerrannaisia sekä mahdollisesti sivunauhataajuuksia.



Kuva 17. Verhokäyräanalyysin periaate [7, s. 15].

Yleisesti laakerivauriot voidaan mitata laittamalla kaistanpäästösuodatin tai ylipäästösuodatin laakerin ominaistajuuden ympärille, demoduloimalla se ja tekemällä sille spektrianalyysi. Verhokäyräanalyysissä alarajataajuus valitaan tavallisesti väliltä 500 Hz – 5 kHz. Käytännössä suositellaan alarajataajuudeksi 500 – 900 Hz. Myös demoduloidun signaalin aikatason analyysiä voidaan hyödyntää samaan tapaan kuin normaalissa spektrivalvonnassa. On myös mahdollista asettaa hälytysrajat verhokäyräanalyysille. [2, s. 221 – 222; 7, s. 15; 4, s. 74, 91.]

#### **6.4.6. Haystack-ilmio**

Haystack-ilmiota on käytetty erityisesti vierintälaakeriden voiteluongelmien tunnistamisessa. Se näkyy amplitudispektrissä muutaman kilohertsin taajuudella piikikkäänä kuviona, joka muistuttaa jonkin verran heinäkasia. Silloin kun vierintälaakerin voitelu ei ole optimaalinen, tuottavat vierintäelinten ja vierintä ratojen väliset kosketukset pieniä rakenteen ominaistajuuksia herätteleviä impulsseja epäsäännöllisellä taajuudella. Näkyvä värähtely ei ilmene millään täsmällisellä taajuudella, vaan tietyn taajuusalueen hieman epäsäännöllisenä kohoamisena. Taajuusalue riippuu laakerin ominaistajuuksista. Pienemmillä laakereilla ominaistajuudet ovat tyypillisesti korkeampia, joten pienimmillä laakereilla haystack-ilmio ei välttämättä näy, jos mittausalue ei ulotu riittävän korkeille taajuuksille. [2, s. 253.]

## **7 Kompressorien laakerivärinämittaukset**

### **7.1. Mittauksen tarpeellisuuden määrittäminen**

Kunnonvalvonnan tarve vaihtelee teollisessa tuotannossa eri prosessien ja koneiden kohdalla suuresti. Mittaustarpeen määrittäminen voidaan suorittaa esimerkiksi seuraavien tekijöiden perusteella:

- laitteen kriittisyys tuotannon kannalta
- huollettavuus
- kunnossapitokustannukset
- varaosien saatavuus
- luoksepäästävyys
- ympäristöolosuhteet
- käyttöolosuhteet
- häiriöherkkyys
- pyörimisnopeus
- laitteen rahallinen arvo
- laitteen käyttöteho
- turvallisuusmääräykset.

Värinämittauksia voidaan suorittaa kiinteiden, puolikiinteiden tai kannettavien mittalaitteiden avulla. Kannettavien mittalaitteiden kanssa tehdään yleensä tietyn aikataulun mukaisesti niin sanottuja kiertomittauksia. Aikataulutetussa mittauksessa oletetaan, että vikaantumisen on hidasta suhteessa mittausväliin. Kannettavalla mittalaitteella voidaan myös täydentää kiinteällä mittauksella saatua tietoa. Puolikiinteissä mittauksissa anturit on asennettu kiinteästi mitattavaan kohteeseen, mutta itse mittaus suoritetaan kiertomittauksena kannettavalla mittalaitteella. Kiinteissä mittauksissa voidaan suorittaa sekä jatkuvatoimisia että määrävälein tehtäviä mittauksia. Standardissa PSK5705 jatkuvatoimisia mittauksia suositellaan käytettäväksi kohteissa, joissa vikojen kehittyminen vaurioiksi voi olla hyvin nopeaa. Esimerkkeinä tällaisista kohteista mainitaan turbiinit, kompressorit ja generaattorit. [25, s. 7.]

Standardi PSK5705 antaa ohjeita myös mittausvälin valinnasta. Sen mukaan mittausväli määritellään ottamalla huomioon käytettävä valvontamenetelmä, kohteen kriittisyys, häiriöherkkyys, vikojen kehittymisnopeudet ja kunnossapidon historiatiedot. Standardissa suositellaan ohjeellisesti tiettyjä mittausperiaatteita eri koneille niiden kriittisyyden ja käytön rasittavuuden perusteella. Kaikille kriittisille koneille suositellaan ensisijaisesti kiinteää järjestelmää, mikäli se on taloudellisesti järkevää. Niille ruuvikompressoreille, jotka eivät ole kriittisiä, suositellaan jaksottaista kunnonvalvontamittausta. [25, s. 8 – 9.] Taulukossa 3 on esitetty standardin suositukset ruuvikompressorien osalta.

*Taulukko 3. Ruuvikompressorien ohjeelliset värinämittausvälit standardin PSK5705 mukaisesti. [25, s. 9.]*

KRIITTISYYS	RASITUS	SUOSITELTAVA MITTAUSVÄLI				
		Kiinteä	2 vko	4 vko	2 kk	4 kk
kriittinen	kova	X				
	kevyt	X				
ei kriittinen	kova					
	kevyt					

Taulukossa 4 on esitetty standardin mukainen tapa arvioida koneen värähtelyvalvonnan tarpeellisuutta. Työn kohteena olleen prosessiteollisuuden laitoksen paineilmakompressorien tapauksessa voidaan olettaa laakerien rikkoontumisen olevan suoranaisesti mitätön turvallisuus- ja ympäristöriski. Laatuhäviötä tuskin tulee, mikäli painetta ylläpidetään niin korkealla tasolla ja niin paljon säiliöitynä, että tuotanto kestää yhden kompressorin äkillisen sammumisen paineilmaverkossa. Laatuhäviötä voi mahdollisesti tulla, jos paineilman taso putoaa niin alas, että jokin laitoksen tuotantolaitoksista ajetaan äkisti alas. Värähtelyvalvonnan tarpeeksi voidaan taulukosta arvioida 100 – 240, kun 640 on suurin mahdollinen tarve. Värähtelyvalvonnan tarve on siis noin 16 – 38 % suurimmasta kuviteltavissa olevasta tarpeesta. Paineilmakompressoreita ei siis voida pitää erityisen kriittisinä valvontakohteina, mutta niiden valvonta voi kuitenkin olla hyödyllistä. Myös PSK-standardissa 6800 on esitetty hieman vastaava tapa arvioida laitteiden kriittisyyttä [26, s. 4 – 7]. Siinä huomioidaan myös laitteiden vikaantumisvälit.

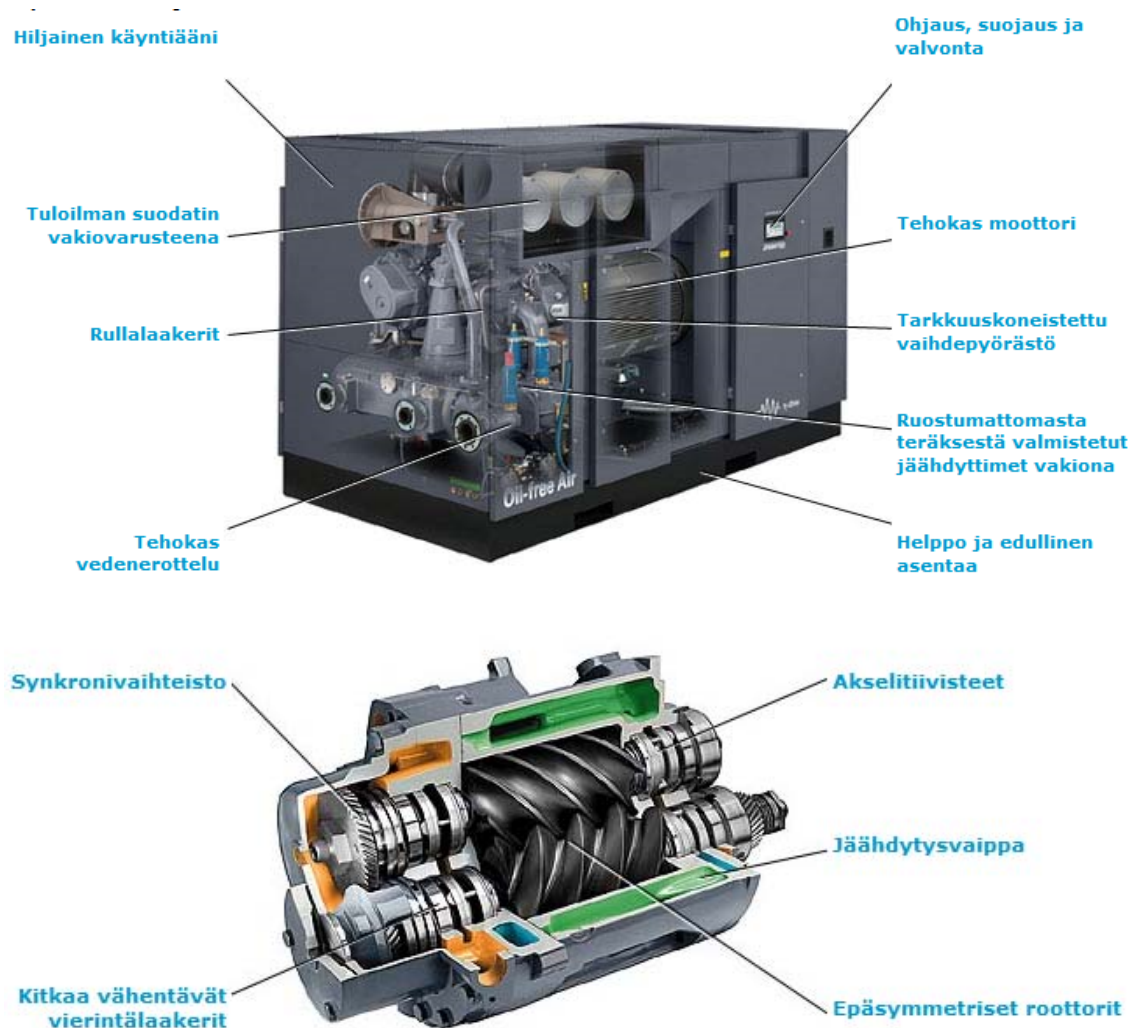
Taulukko 4. Värähtelyvalvonnan tarpeen määrittely standardin PSK7505 mukaisesti. Taulukosta on tummennettu arvio laitoksen ruuvikompressoreihin soveltuvista kertoimista. [25, s. 13 – 14.]

Kohde	Tekijä	Paino	Kerroin	Valintakriteeri
Turvallisuus- ja ympäristövaikutukset	Turvallisuusriskit	20	0	Ei turvallisuusriskiä
			4	Vähäinen turvallisuusriski
			8	Merkittävä turvallisuusriski
	Ympäristöriskit	20	0	Ei ympäristöriskiä
			4	Vähäinen ympäristöriski
			8	Merkittävä ympäristöriski
Tuotannonmenetyksen kustannusvaikutukset	Kriittisyys (laitteen toimimattomuuden merkitys)	20	0	Ei merkitystä tehtaan tuotannolle
			2	Voi johtaa tuotannon häiriöön, seisokkiin tai laatukustannuksiin
			4	Aiheuttaa tuotannonmenetystä
			8	Aiheuttaa tuotannon pysähtymisen
	Laatu (laitteen toimimattomuuden merkitys)	10	0	Ei aiheuta laatukustannuksia
			2	Aiheuttaa laatukustannuksia
Kunnossapidon kustannusvaikutukset	Häiriöherkkyys	5	1	Varmakäyntinen
			2	Vähäisiä häiriöitä
			4	Häiriöherkkä
	Kunnossapitotyön kustannukset	5	1	Vähäiset
			2	Kohtuulliset
			4	Korkeat
	Kunnossapidon materiaali-kustannukset	5	1	Vähäiset
			2	Kohtuulliset
			4	Korkeat
	Jälleenhankinta-arvo	5	1	Vähäiset
			2	Kohtuulliset
			4	Korkeat
	Elinkaarikustannus	5	1	Vähäiset
			2	Kohtuulliset
			4	Korkeat
	Kunnonvalvonta-kustannukset	5	1	Vähäiset
			2	Kohtuulliset
			4	Korkeat

## 7.2. Prosessiteollisuuslaitoksen paineilmakompressorit

Työn kohteena olleessa laitospakettiosuudessa on yksitoista Atlas Copcon toimittamaa ruuvikompressoria (kuva 18), jotka kuuluvat Sarlinin ja laitoksen välisen huoltosopimuksen piiriin. Käytössä olevat mallit ovat ZR450, ZR315 ja ZR5. Koneiden ikä vaihtelee reilun kolmenkymmen ja muutaman vuoden välillä. Sähkötehon kulutus

on yhteensä noin 3,6 MW ja paineilman tuotto yli 700 m<sup>3</sup>/min. Koneita ohjataan Sarlinin toimittamalla Balance-ohjausjärjestelmällä. Koneita ohjataan päälle ja pois päältä käyttötarpeen ja vuoroperiaatteen mukaan. Kompessoreiden sähkömoottorit ovat ABB:n valmistamia. Sähkömoottoreissa on moottorin akseli kahden laakerin varassa. Sähkömoottorit on kytketty suoravetoisesti kompressorilohkojen vaihteistoihin. Kompresointilohkossa on vierintälaakerit roottorien tukena. Roottoreita on neljä välijäähdytetyissä koneissa. Lisäksi lohkoissa on useita vaihteistorattaita.



Kuva 18. Kompressorin ja kompressorielementin poikkileikkaus [27].

### 7.3. Sarlin Balance -ohjausjärjestelmä

Sarlin Balance on Sarlinin kehittämä ohjausjärjestelmä yhteisessä paineilmaverkossa olevien paineilmakompressorien keskitettyyn hallintaan ja käyttöön. Järjestelmän tarkoituksena on pitää verkon paineilman tuotto mahdollisimman pienenä, mutta paineilmaverkon käyttöä häiritsemättömällä tasolla. Tämä pienentää paineilmakompressorien kokonaisvaltaista päälläoloaika ja sitä kautta käyttökuluja, joista merkittävä osuus on sähköenergian kulutusta.

Ohjausjärjestelmä perustuu kokonaisverkkopaineen mittaukseen, jonka perusteella kompressoreita ohjataan automaattisesti päälle ja pois päältä asetetun painetarpeen mukaan. Myös yksittäisten kompressorien tuottamia paineita mitataan niiden toiminnan tarkkailemiseksi. Kompressorien päällelaittojärjestys perustuu konfigurointiin, jossa kompressoreille annetaan numerojärjestys. Järjestelmään kuuluu myös koneiden vuorottelu esiasetetun aikataulun mukaisesti. Vuorottelun avulla voidaan tasata kompressorien käyttöasteita.

Sarlin Balance Control -ohjausjärjestelmän peruslaitteistototeutus on yksittäisen kompressorin tai kompressoriryhmän lähettyville asennettava ohjauslaitekaappi, joka sisältää tavallisesti tarvittavat I/O (Input/Output, tulot ja lähdöt) -yksiköt, Unitronicsin ohjelmoitavan logiikkaohjaimen (Programmable Logic Controller, PLC) ja tietoliikennelaitteet. I/O:lle tulee kompressoreilta mittatietoina tavallisesti tuottopaine ja käyntitieto. Myös sähkömoottorin sähkövirta, ruuvikompressorien välipaine ja tuotetun paineilman kastepiste voidaan tuoda järjestelmään. Ohjauksena kompressorille annetaan tavallisesti ainakin tilat päälle, pois päältä ja kevennykselle. PLC välittää mittaus- ja tilatiedot Modbus RS485 -sarjaliikkeväylän kautta valvomotietokoneelle, joka vastaa vuorottelusta ja käytön optimoinnista. Valvomo antaa väylän kautta ohjauskomennot PLC:lle, joka välittää ne eteenpäin oikealle kompressorille.

Balance Monitor on Balance Controlin valvomojärjestelmä. Valvomo perustuu Wonderware InTouch -valvomoalustaan, joka toimii tavanomaisessa PC-tietokoneessa,



jossa on Windows-käyttöjärjestelmä. Valvomoa voidaan usein myös etäkäyttää internetin kautta PCAnywhere-ohjelmistolla.

#### **7.4. Laakerien kunnonvalvonnan instrumentoinnin toteutus**

##### **7.4.1. Toteutuksen lähtökohdat**

Työn kohteena olleen prosessiteollisuuden laitoksen paineilma-verkon kompressoreista neljässä oli Atlas Copcon toimittama värinävalvonta. Näissä koneissa oli seitsemän jatkuvatoimista värinämittausta kompressoria kohden, joista kaksi oli sähkömoottorissa ja loput olivat kompressorilohkossa. Mittaus perustui SPM-menetelmään.

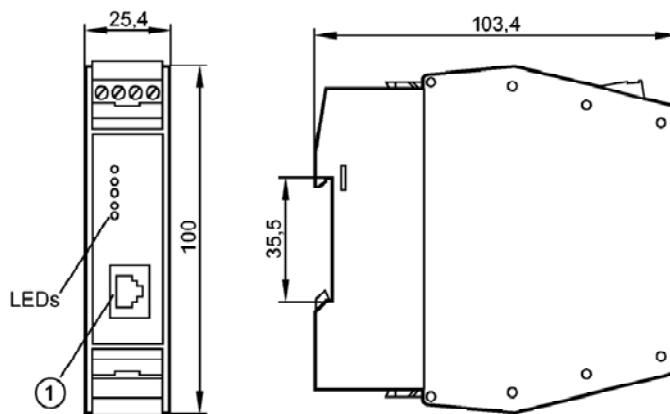
Neljän muun kompressorin sähkömoottoreihin oli asennettu Sarlinin toimesta Ifm:n valmiskorjaukseen perustuva laakerivärinävalvontalaitteisto paineilmakompressorien Balance-ohjausjärjestelmän päivityksen yhteydessä vuonna 2008. Moottoreista kolme oli sähkötehoaan 450 wattia ja yksi oli 315 wattia. Kompressorien paineilmalohkoissa ei ollut värinävalvontaa. Alunperin ajateltiin pelkän moottorien laakerien valvonnan riittävän. Kunnonvalvontadiagnostiikka oli liitetty Balance-ohjausjärjestelmään virtaviestillä ohjelmoitavan logiikan kautta. Kullekin anturille oli oma diagnostiikkayksikkönsä.

Valvontalaitteiston keräämää tietoa ei kuitenkaan osattu tulkita tai hyödyntää eikä sitä osattu konfiguroida siten, että alkavia laakerivaurioita olisi voitu tehokkaasti havaita. Tavoitteena oli selvittää, miten värinäanalyysiä voitaisiin tehokkaasti hyödyntää laakerien jatkuvatoimisessa kunnonvalvonnassa.

##### **7.4.2. VSE002-diagnostiikkayksikkö**

Ifm VSE002 -diagnostiikkayksikkö on valmis, tuotteistettu ratkaisu värinädatan diagnostiikkaan. Sillä voidaan suorittaa signaalinkäsittelyoperaatioita ja valvoa näiden avulla koneiden kuntoa aika- ja taajuustasossa. Diagnostiikkayksikössä on liitännät neljälle kiihtyvyyssanturille. Mittaustieto välitetään 0 – 10 mA virtaviestinä.

Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää IEPE-antureita, jolloin ne kytketään anturiliittimen ensimmäiseen pinniin. Muina tuloina on kaksi virtaviestiliitäntää, jotka voivat tulkita konfiguroinnista riippuen 0 – 20 mA:n tai vaihtoehtoisesti 4 – 20 mA:n virtaviestejä. Ne pystyvät tulkitsemaan myös pulssisignaalia, jota voi hyödyntää lähinnä valvottavan koneen nopeustiedon siirtämiseen. Yksiköstä on kaksi lähtöä, joista kumpaakin voidaan käyttää digitaalisena lähtönä. Lähtöä 1 voidaan käyttää myös analogisena virtaviestilähtönä. Tulosten ja lähtöjen tarkempi toiminta perustuu konfigurointiin, joka tehdään erillisellä PC-ohjelmalla yksikön Ethernet-portin kautta. [28, s. 1.] Kuvassa 19 näkyvät yksikön dimensiot ja kuvassa 20 näkyvät sen liitännät.

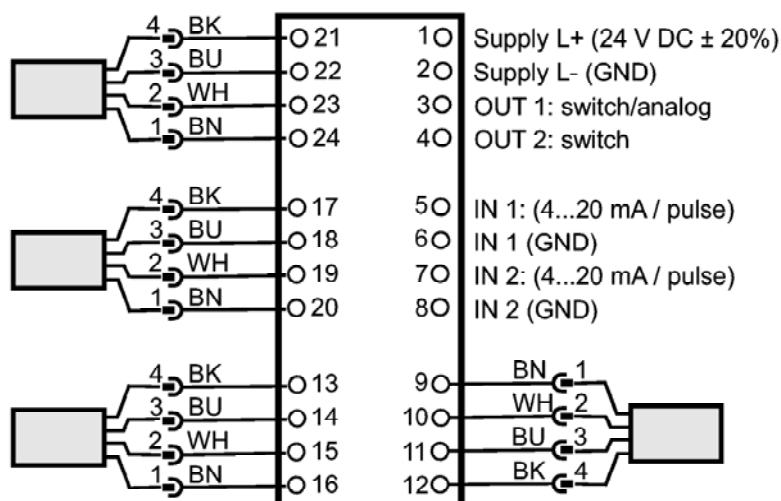


*Kuva 19. VSE002-diagnostiikkayksikön mitat. Etupaneelissa on neljä merkkilediä ja Ethernet-portti. Ruuviliittimet ovat modulaarisia Combicon-liittimiä. [28, s. 1.]*

IEPE (Integrated Electronic Piezo Electric) –anturit ovat integroitua elektroniikka sisältäviä pietsosähköisiä antureita. Ne toimivat sähköteknisesti virtalähteinä eli siirtävät mittaustietoa virtaviestinä. [29.] VSE002:ssa on IEPE-antureilla mahdollista käyttää vahvistusta, joka on välillä 1 – 10.

VSE002:n näytteenottotaajuus on 100 kHz, jolloin suurimman näytteistettävän taajuuden voidaan laskea olevan noin 39 kHz, kun käytetään yleistä taajuuksien suhdetta 2,56 [28, s. 1]. Mikäli näytteenotto jaettaisiin neljän anturin kesken multipleksaamalla, olisi suurin taajuus noin 9,8 kHz. Enimmillään mitattavat taajuudet ovat Nyquistin suhteella, jolloin ne ovat 50 kHz ja 12,5 kHz.

Monitoroida voi enintään 24:ää VSE002:lle konfiguroitua diagnostiikkakohdetta kerrallaan. Yhteensä näissä voi olla enintään 84 eri vikataajuutta määriteltynä. Muistia on 30 000:lle mittauksen historiatiedolle aikaleimoineen. Historiamuisti poistaa mittaustietoja vanhimmasta päästä sitten, kun tila loppuu. Yksikössä on paristovarmennettu reaaliaikakello aikaleimoja varten. Dataa voi siirtää myös Ifm:n erikseen myytävän OPC-palvelimen avulla muille järjestelmille. OPC-palvelinta hyödyntämällä on myös mahdollista konfiguroida yksikön omia asetuksia vaikka oman valvomosovelluksen kautta. [30, s. 5 – 6.]

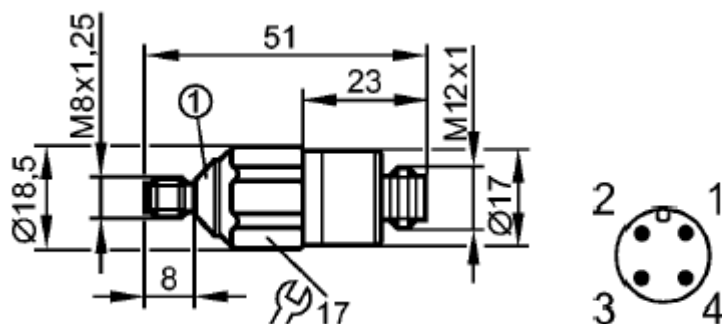


Kuva 20. VSE002-diagnostiikkayksikön ruuviliitännät. Liitännät 9 – 21 ovat värinäanturien tuloja. Kukin anturi välittää kiihtyvyydestiedon 0 – 10 mA virtaviestillä. [28, s. 2.]

### 7.4.3. VSA001-kiihtyvyyssanturit

Laakerien kuntoa mitataan Ifm:n VSA001-kiihtyvyyssantureilla. Anturit ovat kapasitiivisella periaatteella toimivia yhden mittausakselin MEMS-antureita. Niissä on Ifm:n omaan VSE002-diagnostiikkayksikköön sopiva M12-pistokeliitännä. Kaapelin suositeltu enimmäispituus on 30 metriä. Mittaustiedon lähettäminen perustuu 0 – 10 mA:n virtaviestiin. Liittimen (kuva 21) signaalit ovat 1. käyttöjännite +9 V, 2. virtaviestin lähtö, 3. maadoitus ja 4. testaus. Anturin mittausalue on  $\pm 25$  g, ylikuormitettavuus on 500 g ja herkkyys on  $0,2 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Anturin taajuusalue on 0 –

6000 Hz ja lineaarisuus on 0,2 %. [31.] Anturia ei asennusohjeen mukaan tule kiinnittää akselin suuntaisesti, joten sillä voi mitata vain akselin normaalin suuntaisesti [32, s. 2].

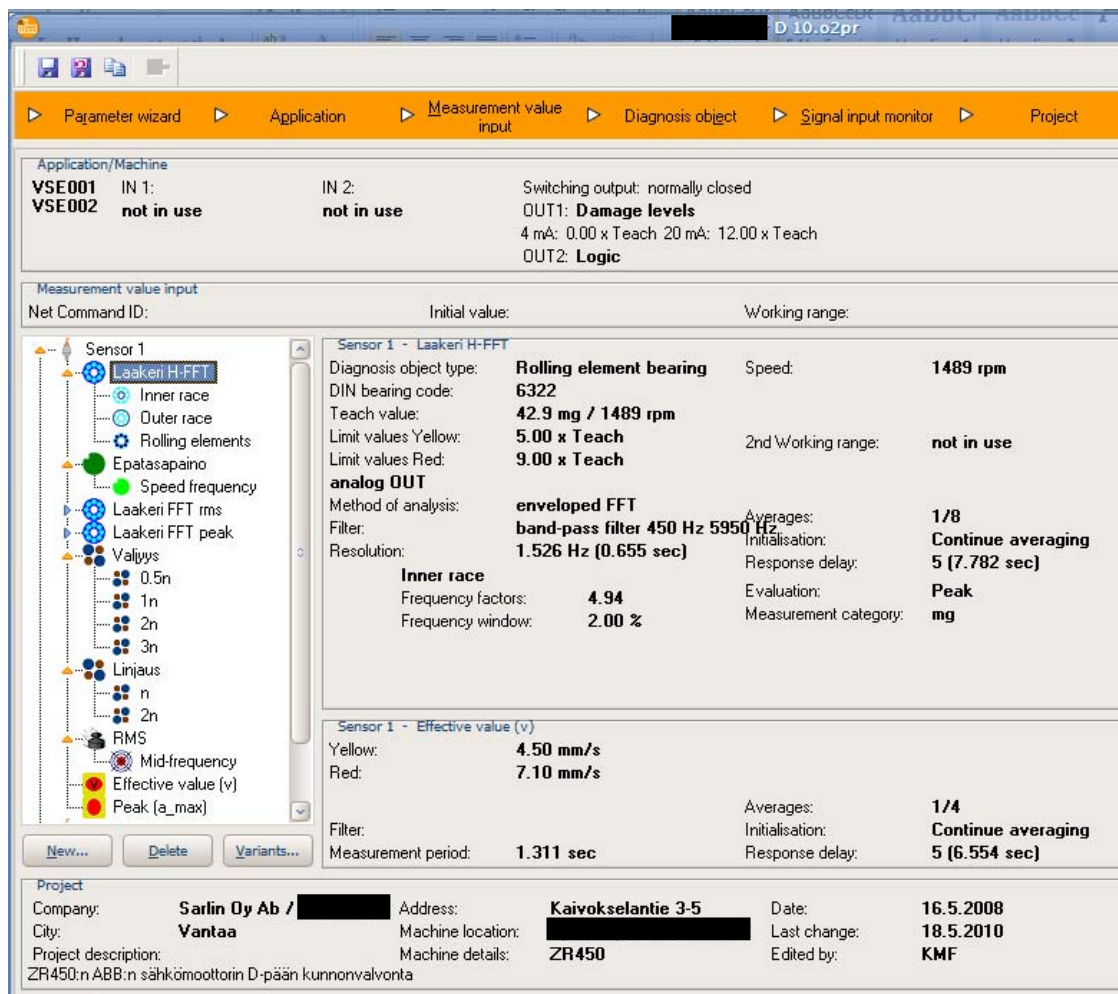


Kuva 21. VSA001-kiihtyvyyssanturin mitat ja liitin [31].

#### 7.4.4. Diagnostiikkayksikön analyysit ja parametointi

VSE002-diagnostiikkayksikön konfigurointi tehdään PC-tietokoneella käyttäen Ifm:n efector octavis VES003 -ohjelmaa (kuva 22). Mikäli valmista konfiguraatiota ei ole käytettävissä, voidaan ohjelmalla tehdä uusi konfiguraatio melko helposti Parameter wizard -avustinta käyttäen. Sillä ei kuitenkaan pääse kuin vasta alkuun. Kunnollisen konfiguraation tekeminen vaatii enemmän tietoa kuin ohjelmassa käyttäjälle tarjotaan. Liitteessä 2 on esitetty laadittujen valvontakonfiguroitujen parametrit. Ohjelma sopii myös käytettäväksi mittauksien reaaliaikaiseen kuvaajien tarkasteluun eri suodatuksilla. Myös historiatiedon tallennus PC:lle onnistuu sillä.

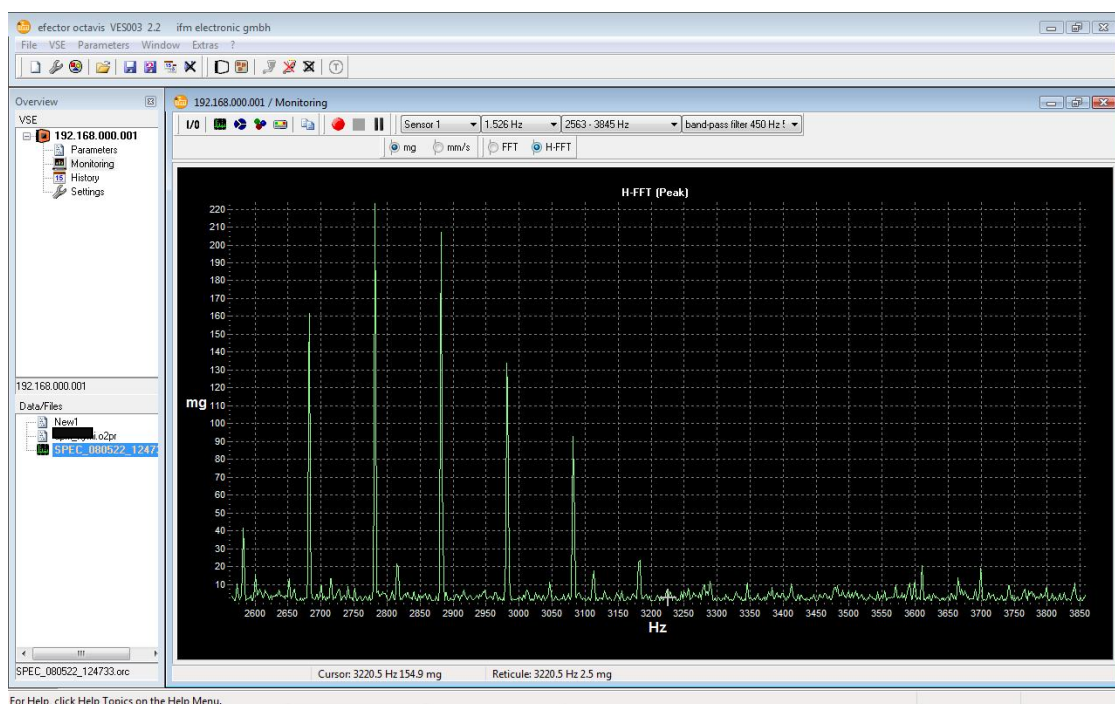
Anturin aikatason signaalista tarkkailtavaksi voi valita kiihtyvyyden tehollisarvon  $a_{rms}$ :n, kiihtyvyyden huippuarvon  $a_{max}$ :n ja nopeuden tehollisarvon  $v_{rms}$ :n. Rajoituksena on se, että  $a_{rms}$  ja  $v_{rms}$  eivät jostain syystä voi olla samaan aikaan valittuna samalla anturilla. Kaikissa kolmessa tarkkailussa tulee antaa värinälle varoitus ja hälytysrajat, jotka on ohjelmassa nimetty yksinkertaisesti keltaiseksi ja punaiseksi.  $a_{rms}$ :n ja  $a_{max}$ :n maksimina on 25 000 mg.  $v_{rms}$  perustuu standardin ISO 10816 mukaiseen valvontaan. Taajuuskaista on standardin mukainen eli 10 Hz – 1 kHz. Suurin arvo on 100 mm/s. Standardin mukaisina viitteellisinä suositusarvoina  $v_{rms}$ :n rajoille isojen kompressorien tapauksessa voidaan pitää 4,5 mm/s ja 7,1 mm/s [30, s. 60].



Kuva 22. VES003-parametrintiohjelma. Puurakenteessa näkyy erilaisia konfiguroituja valvontamenetelmiä (liite 2).

Taajuustason diagnoositoimintoja on valmiina järjestelmässä vierintälaakerille ja epätasapainotilaan. Vierintälaakereille järjestelmässä käytetään verhokäyräanalyysia, josta ohjelmassa käytetään nimitystä H-FFT (kuva 23). Standardin DIN 623 mukaiset vierintälaakerit voi etsiä helposti standardin laakerikoodin avulla ohjelman laakeritietokannasta. Samalla DIN-koodilla löytyy yleensä useamman valmistajan laakereita, joissa on usein hieman erilaiset parametrit ja ominaistajuudet (kuva 24). Ohjelma mahdollistaa kuitenkin useammankin eri laakerin valinnan, jos ei ole varma oikeasta. Tällöin taajuusikkunaa kasvatetaan niin, että kaikkien valittujen laakerien taajuudet mahtuvat sinne. Ikkuna kasvaa helposti liian isoksi, jotta sillä voisi suorittaa analyysin hyvin. Laakerien taajuudet voi syöttää myös käsin. Ohjelma tarvitsee sisäkehän, ulkokehän ja vierintäkappaleiden taajuudet. Siinä on myös laskuri, jolla voi

laskea taajuudet vierintälaakerin geometriatietojen perusteella. Laakerikunnonvalvonta on vakiona H-FFT-analyysi, mutta sen voi käydä valvonnan avustetun määrittelyn jälkeen käydä muuttamassa käsin pelkäksi FFT-analyysiksi.

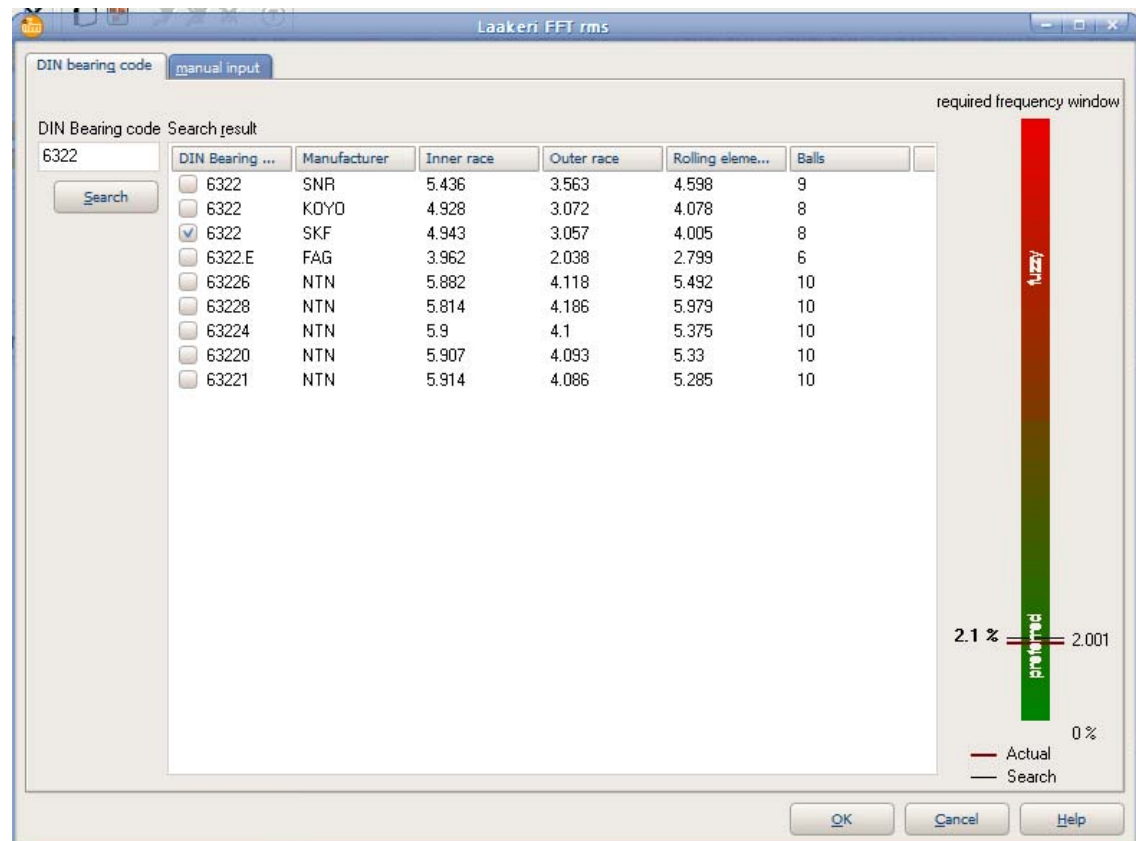


Kuva 23. Näkymä kompressorin verhoikäyräspektristä VES003-ympäristössä.

Epätasapainotiloihin tarkoitetussa diagnostiikassa käytetään FFT:tä (ilman demodulointia). Vikataajuuksia on tarkastelussa vain yksi. Ohjelman RMS-diagnostiikassa valitaan automaattisesti asetukset värähtelyn nopeuden tehollisarvolle vapaasti määritettävissä olevalla taajuusalueella, mikä poikkeaa standardista ISO 10816, jossa on kiinteä taajuusalue. Alarajataajuus voi olla välillä 0 – 9 999 Hz ja ylärajataajuus välillä 1 – 10 000 Hz. Molemmat rajataajuudet ovat selvästi yli käytössä olevien antureiden taajuusalueen, joka loppuu jo kuuteen kilohertsiin.

Muita diagnostiikkatoimintoja kuin vierintälaakerit, epätasapaino ja RMS varten on valittavissa vielä ”Others”. Siinä voi valita haluamansa määrän vikataajuuksia, joita voi yhdessä diagnostiikkayksikössä olla kokonaisuudessaan 84. Tässä tilassa FFT-analyysin voi tehdä verhoikäyrällä tai ilman. Others-avustimella tehtiin mahdollisen väljyyden ja linjauksen havaitsevat diagnostiikat, joiden arvot näkyvät liitteessä 2. Väljyydelle

määritettiin seurattaviksi kaistoiksi pyörimistaajuuden kerrannaiset  $0,5n$ ,  $n$ ,  $2n$  ja  $3n$ .  
Linjaus seuraa kaistoja  $n$  ja  $2n$ .



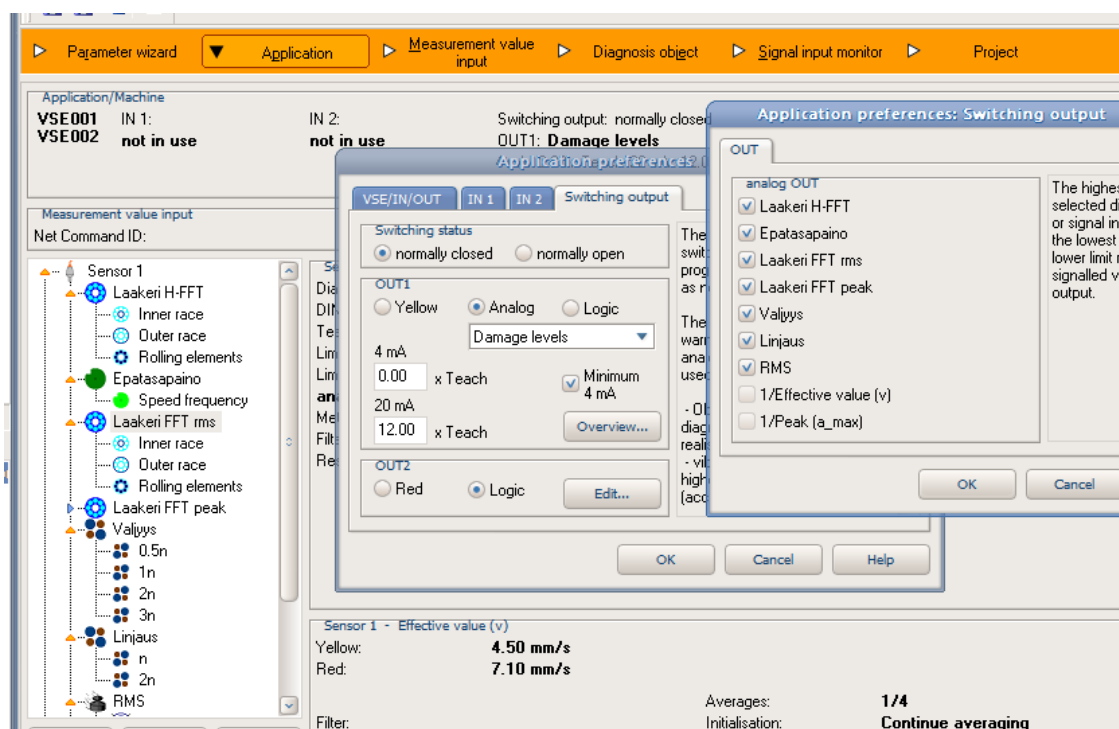
Kuva 24. Laakerin valinta DIN-koodin perusteella. Samalla koodilla löytyy paljon laakereita, joista osa on kuitenkin keskenään melko erilaisia esimerkiksi vierintäelimien määrän suhteen. Oikealla näkyy, millaisen taajuusikkunan tehty valinta vaatii.

Itsemääritettyjen diagnostiikkatoimintojen (Others), RMS:n, epätasapainon ja vierintälaakerien valmiiden diagnostiikoiden amplitudirajojen määrittelyssä voidaan käyttää ohjelman opettamistoimintoa, joka puoliautomaattisesti hakee oikeat hälytystasot ehjälle koneelle. Tasot voi asettaa myös manuaalisesti, sillä ne voi arvioida sopiviksi tarkkailemalla värinän mittausarvoa.

Hetkellisistä muutoksista tulevia vääriä hälytyksiä voi ehkäistä asettamalla vaimennuksia tarkkailtavien arvojen muutoksille. Toisaalta ne voivat hävittää pienemmät oireet. Signaalin keskiarvoistus perustuu eksponentiaalisesti painotettuun liukuvaan keskiarvoon. Vaimennuksia on 1/2:sta alkaen 1/256:een saakka. Voidaan myös valita, alkaako keskiarvon laskeminen nolasta vai edellisistä lasketuista arvoista

(initialisation). Vaikutusviive (response delay) estää hälytystä tulemasta, mikäli arvo palautuu sen aikana normaaliksi. Myös mittauksen jaksonaika voidaan valita.

Kun koneen pyörimisnopeus on vakio, se voidaan konfiguroida suoraan VES003:ssa koneen vakionopeudeksi. Diagnostiikkayksikön tuloiksi voi muussa tapauksessa määrittellä koneen pyörimisnopeuden. Tulo voidaan konfiguroida myös joksikin muuksi, käyttäjän määrittelemäksi prosessiarvoksi. Sille voi vapaasti antaa yksikön ja sen voi skaalata sopivaksi virtaviestiin nähden. Sen jälkeen siihen voi soveltaa rajavalvontaa. Binääristen lähtöjen toiminnoksi voi asettaa joko normaalisti kiinni (NC) tai normaalisti auki (NO). Yksinkertaisimmillaan niistä lähetetään vain keltaista ja punaista eli kaksi virherajaa, jotka näkyvät myös itse diagnostiikkayksikön ledeissäkin. Binääriset lähdöt voidaan konfiguroida lähettämään jonkin monimutkaisemman vikatiedon loogisen AND- ja loogisen OR-piirin sekä ohjelmassa käyttäjän määrittämien valvonta- ja diagnostiikatoimintojen hälytysraja-arvojen avulla.



Kuva 25. Lähdön konfigurointi. Useampia eri analyysejä voi valita lähetettäväksi virtaviestiin, mutta vain kulloinkin korkeinta arvoa näyttävä analyysi lähetetään.

Toinen lähde voidaan konfiguroida lähettämään 0 – 20 tai 4 – 20 mA:n virtaviestiä. Useampia samankaltaisia mittauksia tai diagnostiikoita voi lisätä analogisesti



lähettävään signaaliin. Silloin lähetetään sitä analyysiä, millä on isoimmat arvot. Ulostulosta voidaan saada asetuksesta riippuen värinäarvo kiihtyvyytenä (mg), nopeutena (mm/s), itse määriteltynä prosessisuureena tai opetusarvoihin suhteutettuina niin sanottuina damage level -arvoina. Opetusarvoa käyttämällä eri suureilla tapahtuvat mittaukset saadaan vertailukelpoisiksi keskenään. Ongelmaksi niillä muodostuu se, miten opetusarvot skaalataan ja miten niiden varoitusrajat määritellään eri analyyseissä. Tähän ei löydy suoraa vastausta, ja arvot on parasta määritellä kokeilemalla ja seuraamalla diagnostiikan toimintaa pitkällä aikavälillä. Kuvassa 25 näkyy lähtöjen konfigurointi.

## 8 Kunnonvalvontajärjestelmän parannusehdotukset

Liitanta Balance Control –ohjausjärjestelmään on toteutettu 4 – 20 mA virtaviestinä kaikista diagnostiikkayksiköistä. Arvot tuodaan ohjelmoitavien logiikkaohjaimien kautta PC-valvomolle. Valvomon kautta haluttaisiin valvoa laakereiden kuntoa, mutta ongelmana on se, ettei diagnostiikkajärjestelmältä tulevaa tietoa osata hyödyntää valvomossa oikein. Trendit ovat hankalia tulkita myös siksi, että niihin vaikuttaa prosessitila eli kompressorien vuorottelu kevennyksellä, kuormituksella ja pois päältä. Tähän ongelmaan ratkaisu voisi olla ratkaistavissa valvomon tasolla. Voitaisiin ohjelmoida tiedonkeruu siten, että se lopettaisi laakerivärinätiedon keräämisen silloin, kun koneet eivät ole kuormituksella. Trendiin ei silloin jäisi kuin vertailukelpoisia osia ja tyhjiä välejä.

Valvomolle ei virtaviestinä kulje tieto vikatilanteista suoraan, vaan sille pitää erikseen tehdä hälytysrajat, mikäli halutaan varmistaa se, että laakerien kunnon heikkenemisestä saadaan tieto jo varhaisessa vaiheessa. Parhaiten tieto kulkisi, kun värinämittausten hälytykset yhdistettäisiin Sarlinin päivystäjän tekstiviestihälytyksiin. Arvot hälytysrajoille voidaan määrittää suoraan siitä, miten ne on määritelty diagnostiikkayksikössä. Silloin kun vauriotaso ilmaistaan välillä  $0 \times \text{Teach} - 12 \times \text{Teach}$ , se voidaan skaalata välille 4 – 20 mA laskemalla  $D \cdot 16 / 12 + 4 = I$ . Kun pienin hälytysraja on  $2 \times \text{Teach}$ , on se silloin milliampeereina  $2 \cdot 16 / 12 + 4 = 6,67$  mA, joka voidaan asettaa varoitusarvoksi. Kun suurempi raja on  $6 \times \text{Teach}$ , on hälytysrajan arvo 12 mA. Havainnollisin esitysmuoto olisi varmaankin palkki, josta näkisi suoraan tason värinän tason esitysskaalansa suhteen. Nämä palkit voisi upottaa esimerkiksi pääkuvaan kompressorien kuvien viereen. Trendiseurantaa varten voisi sitten olla oma ikkunansa, jossa on vastaava skaalaus opetusarvoihin.

VSE002-diagnostiikkayksiköjä on kaikissa neljässä kompressorissa kaksi kappaletta kussakin. Kiihtyvyyksmittauksia on yksi jokaista diagnostiikkayksikköä kohden, vaikka yhteen yksikköön saisi neljä kiihtyvyyksmittausta. Mittausta olisi varsin helppo laajentaa, koska se vaatisi vain lisää antureita. Paikkoja antureille olisi, sillä kompressorilohkot ovat täysin ilman omaa, jatkuvatoimista, värähtelyvalvontaa.

Toisaalta jo yhden laakerin ja osittain myös muiden koneenelimiä kunnonvalvonnan tulosten siirtäminen yhdellä analogisella virtaviestillä on sekin jo haasteellista. Pelkkä uusien anturien lisääminen diagnostiikkayksiköihin periaatteessa pahentaisi nykyisen mittausjärjestelmän pullonkaulaa. VES002 sisältää aika paljon erilaisia analyysejä, kun sen ominaisuudet pyrkii ottamaan mahdollisimman kattavasti käyttöön. Niiden toimintaa ei pysty tehokkaasti seuraamaan silloin, kun tiedonsiirto on rajoittunut yhteen lähtöön. Luontevin ratkaisu olisi kytkeä diagnostiikkayksiköt laitoksen Ethernet-verkkoon, jolloin niillä olisi oma yhteys valvomoon. Ifm:n OPC-palvelimella olisi mahdollista liittää diagnostiikka paremmin osaksi valvomoa. Lisäksi Ifm VSE003:a voisi käyttää suoraan tarkempaan kunnonvalvontaan ja diagnostiikkaan jopa täysin etäkäyttöisesti. Luonnollisesti oireiden tunnistaminen värinämittauksista vaatii suhteellisen paljon tietämystä värähtelykunnonvalvonnasta, joten tämän hyödyntäminen vaatisi mahdollisesti kunnossapitohenkilöstön lisäkoulutusta.

## 9 Yhteenveto

Kunnossapito on laaja ala, ja se käsittää paljon muutakin kuin huollon. Kokonaistuottavuuden ja luotettavuuden lisäämisen seurauksena on alettu suosia entistä enemmän koneiden kuntoon perustuvaa kunnossapitoa, jossa kunnonvalvonnalla on iso rooli. Usein kunnonvalvonta edellyttää melko kehittyneitäkin mittauksia ja analyysejä. Niitä kannattaa kuitenkin tehdä ja kehittää silloin, kun voidaan estää merkittävien vahinkojen muodostuminen.

Kun teollinen tuotanto perustuu enimmäkseen pyörivien koneiden hyödyntämiseen, ovat niiden läheiset tukirakenteet, laakerit, kriittisessä paikassa tuotannon käynnissäpysymisen kannalta. Satunnaisesti vikaantuvina koneeneliminä niihin liittyy selvä tarve kunnon mittaamiseen ennakoinnin mahdollistamiseksi. Laakerien toiminnan ja vikaantumismekanismien ymmärtäminen vaatii melko syvällistä mekaniikan hallintaa, johon sekoittuu paljon myös signaalinkäsittelyä luotettavamman kuvan aikaansaamiseksi. Diskreetti Fourierin muunnos ja sen tietokonealgoritmi FFT ovat spektrianalyysien perusasioita. Tilastollisten menetelmien ymmärtäminen on myös hyväksi.

Sarlinilla on hyvä mahdollisuus kehittää laitoksen kompressoreihin hankittua kunnonvalvontajärjestelmää. Tässä työssä tehty selvitys diagnostiikkajärjestelmän käytöstä ja sen perusteista antaa suuntaa laakerien kunnonvalvontajärjestelmän edistämiseksi. Se on mahdollista integroida kiinteäksi osaksi Balance-järjestelmää. Jatkokehittelyllä siitä voitaisiin saada jopa standardiosa Balanceen, jonka avulla ohjausjärjestelmää voitaisiin myydä ja markkinoida asiakkaille, jotka eivät itse halua huolehtia kaikesta värähtelyvalvonnastaan itse. Toisekseen järjestelmän jatkuvatoimisuus ja automaattiset analyysit vähentävät kiertomittauksen tarvetta, mikä voi myös olla syy järjestelmän hankintaan.

## Lähdeviitteet

- 1 Järviö, Jorma. Kunnossapito. 2. täydennetty painos. Hamina: KP-Media Oy, 2004.
- 2 Mikkonen, Henry. Kuntoon perustuva kunnossapito. Käsikirja. 1. painos. Kerava: KP-Media Oy, 2009.
- 3 Kunnossapito Suomessa. Kalvosarja. Kunnossapitoyhdistys ry, 2003.
- 4 Nohynek, Petri & Lumme, Veli. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2., täydennetty painos. Hamina: KP-Media Oy, 2004.
- 5 Kunnossapito. Menestystekijä. Opetushallitus.  
[www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet\\_2-3\\_kunnossapidon\\_toiminnot\\_ennen\\_vian\\_ilmenemista.html](http://www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_2-3_kunnossapidon_toiminnot_ennen_vian_ilmenemista.html). Luettu 16.5.2010.
- 6 PSK 5710. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittalaitteiden tyypit ja valinta. 2. painos. PSK Standardisointiyhdistys, 2003.
- 7 ABB:n TTT-käsikirja 2000-7. Kunnonvalvonta ja huolto. ABB Oy, 2000.  
[www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/230\\_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/230_0007.pdf). Luettu 15.5.2010.
- 8 Mäkinen, Kari & Kulhelm, Markku. Kunnonvalvonta-asetajat työn kohteena olleessa laitoksessa. Suullinen lähde 3.6.2009.
- 9 Stjernberg, Timo. Lämpökamera kunnossapidon työkaluna. Kunnossapitokoulu. Kunnossapitolehden erikoisliite. N:o 56. Lehti 4, 2000.
- 10 Kunnossapito. Menestystekijä. Opetushallitus.  
[www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k3\\_kulumishiukkasanalyysi.html](http://www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k3_kulumishiukkasanalyysi.html). Luettu 16.5.2010.
- 11 Korpi, Arto – Manninen, Ari – Rinkinen, Jari – Suontama, Kauko. Öljyjen kunnonvalvonta. Kunnossapitokoulu. Kunnossapitolehden erikoisliite. Numero 76, 1/2003.
- 12 Blom, Seppo – Lahtinen, Pekka – Nuutio, Erkki – Pekkola, Kari – Pyy, Seppo – Rautiainen, Hannu – Sampo, Arto – Seppänen, Pekka – Suosara, Eero. Koneenelimet ja mekanismit. 5. – 6. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy, 2006.
- 13 Kunnossapito. Menestystekijä. Opetushallitus.  
[www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_a2\\_miksi\\_laakerit\\_vaurioituvat.html](http://www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_a2_miksi_laakerit_vaurioituvat.html). Luettu 16.5.2010.

- 14 Taylor, James. The Vibration Analysis Handbook. A Practical Guide for Solving Rotating Machinery Problems. First edition, second printing. Vibration Consultants, 1994.
- 15 Kreyszig, Erwin. Advanced Engineering Mathematics. 9<sup>th</sup> edition. Singapore: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- 16 Kammler, David. A First Course in Fourier Analysis. New York: Cambridge University Press, 2008.
- 17 Peltonen, Hannu – Perkkiö, Juha – Vierinen, Kari. Insinöörin (AMK) fysiikka. Osa II. 6. painos. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus, 2004.
- 18 PSK 7501. Prosessiteollisuuden kunnossapidon tunnusluvut. PSK Standardisointiyhdistys, 2000.
- 19 PSK 5703. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. 4. painos. PSK Standardisointiyhdistys, 2006.
- 20 Stilson, Tim. Input/Data Acquisition System Design for Human Computer Interfacing. 17.10.1996. [ccrma.stanford.edu/CCRMA/Courses/252/sensors/node9.html](http://ccrma.stanford.edu/CCRMA/Courses/252/sensors/node9.html). Luettu 16.5.2010.
- 21 Hautala, Mikko & Peltonen, Hannu. Insinöörin (AMK) fysiikka. Osa I. 6., uudistettu painos. Jyväskylä: Lahden Teho-Opetus, 2003.
- 22 Accelerometers. 2005. [www.siliconfareast.com/accelerometers.htm](http://www.siliconfareast.com/accelerometers.htm). Luettu 16.5.2010.
- 23 PSK 5702. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. 3. painos. PSK Standardisointiyhdistys, 2007.
- 24 Haltsonen, Seppo – Levomäki, Jaakko – Rautanen, Esko. Digitaalitekniikka. Helsinki: Edita Publishing Oy, 2004.
- 25 PSK 5705. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. 5. painos. PSK Standardisointiyhdistys, 2006.
- 26 PSK 6800. Laitteiden kriittisyysluokittelu teollisuudessa. PSK Standardisointiyhdistys, 2008.

- 27 Elementin rakenne. Leikkauskuva. ZT/ZR 110-750 ja ZR 160-900 VSD. Öljytön, pyörivä ruuvikompressor. Atlas Copco.  
[productpagesct.atlascopco.com/ProductPages.asp?MASTER=PP%20MASTER%20ZT%20ZR%20110%20750%20%20%20ZR%20132%20900%20VSD&Lng=FI&Country=FI](http://productpagesct.atlascopco.com/ProductPages.asp?MASTER=PP%20MASTER%20ZT%20ZR%20110%20750%20%20%20ZR%20132%20900%20VSD&Lng=FI&Country=FI). Luettu 17.5.2010.
- 28 VSE002. Diagnostiikkayksikkö värinäantureille. Tietolehti. Essen: ifm electronic, 2009.
- 29 How does a piezo-electric accelerometer work? Test & Measurement. Honeywell.  
[content.honeywell.com/sensing/sensotec/accelerometer\\_faq.asp?category=All](http://content.honeywell.com/sensing/sensotec/accelerometer_faq.asp?category=All).  
Luettu 16.5.2010.
- 30 Programming manual. Software for efector octavis. VES003. Version 2.3. 2009.
- 31 VSA001. Tärinäanturi. Tietolehti. Essen: ifm electronic, 2009.
- 32 Installation instructions. Vibration sensor. VSA001. Ifm electronic, 2009.

## **Liitteet**

- 1 Bracewell-Bunemanin FFT-algoritmi pseudokoodina
- 2 Konfiguroidut diagnostiikat



Bracewell-Bunemanin FFT-algoritmi pseudokoodina [16, s. 291 – 323]:

```

 $\mu_+ := \lfloor (m + 1)/2 \rfloor$  (so  $\mu_+ := \mu + \lambda$ )
 $M := 1$ 
 $r[0] := 0$ 
For  $\nu = 1, 2, \dots, \mu_+$  do:
  For  $k = 0, 1, \dots, M - 1$  do:
     $T := 2r[k]$ 
     $r[k] := T$ 
     $r[k + M] := T + 1$ 
   $M := M + M$ 

If  $m$  is odd, then  $M := M/2$  (so  $M := 2^\mu$ )

For  $q = 1, 2, \dots, M - 1$  do:
   $n' := q - M$ 
   $r'' := r[q] \cdot M$ 
  For  $p = 0, 1, \dots, r[q] - 1$  do:
     $n' := n' + M$  (so  $n' := Mp + q$ )
     $r' = r'' + r[p]$  (so  $r' := Mr[q] + r[p]$ )
  Swap  $f[n']$  and  $f[r']$ 

 $s[0] := 0$ 
 $s[N/8] := 1/\sqrt{2}$ 
 $s[N/4] := 1$ 
 $h := 1/\sqrt{2}$ 
 $k := N/8$ 
While  $k > 1$  do:
   $h := \{2 + 1/h\}^{-1/2}$ 
   $\ell := k/2$ 
  For  $j = \ell, \ell + k, \ell + 2k, \dots, N/4 - \ell$  do:
     $s[j] = h \cdot (s[j - \ell] + s[j + \ell])$ 
   $k := k/2$ 

```

For  $\kappa = 0, 1, \dots, 2^{m-1} - 1$  do: (apply  $Q_2^{(N/2)}$ )

$$\left[ \begin{array}{c} f[2\kappa] \\ f[2\kappa + 1] \end{array} \right] := \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \left[ \begin{array}{c} f[2\kappa] \\ f[2\kappa + 1] \end{array} \right]$$

For  $\mu = 2, 3, \dots, m$  do: (apply  $Q_{2^\mu}^{(N/2^\mu)}$ )

$$M := 2^{\mu-2}$$

For  $\kappa = 0, 1, \dots, 2^{m-\mu} - 1$  do:

$$\left[ \begin{array}{c} f[\kappa \cdot 4M] \\ f[\kappa \cdot 4M + M] \\ f[\kappa \cdot 4M + 2M] \\ f[\kappa \cdot 4M + 3M] \end{array} \right] := \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -i \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & i \end{bmatrix} \cdot \left[ \begin{array}{c} f[\kappa \cdot 4M] \\ f[\kappa \cdot 4M + M] \\ f[\kappa \cdot 4M + 2M] \\ f[\kappa \cdot 4M + 3M] \end{array} \right]$$

For  $\lambda = 1, 2, \dots, M - 1$  do:

Fetch  $s := \sin(2\pi\lambda/4M)$  from  $s[\lambda \cdot 2^{m-\mu}]$

Fetch  $c := \sin(2\pi(M - \lambda)/4M)$  from  $s[(M - \lambda) \cdot 2^{m-\mu}]$

For  $\kappa = 0, 1, \dots, 2^{m-\mu} - 1$  do:

$$\left[ \begin{array}{c} f[\kappa \cdot 4M + \lambda] \\ f[\kappa \cdot 4M + 2M - \lambda] \\ f[\kappa \cdot 4M + 2M + \lambda] \\ f[\kappa \cdot 4M + 4M - \lambda] \end{array} \right] := \begin{bmatrix} 1 & 0 & c - is & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -c - is \\ 1 & 0 & -c + is & 0 \\ 0 & 1 & 0 & c + is \end{bmatrix} \cdot \left[ \begin{array}{c} f[\kappa \cdot 4M + \lambda] \\ f[\kappa \cdot 4M + 2M - \lambda] \\ f[\kappa \cdot 4M + 2M + \lambda] \\ f[\kappa \cdot 4M + 4M - \lambda] \end{array} \right]$$

For  $k = 0, 1, \dots, 2^m - 1$  do: (apply  $1/N$ )

$$\left[ f[k] := f[k]/2^m \right]$$

	Diagnostiikka-olion tyyppi	Analyysi-menetelmä	Tapa	Mittaus
	Diagnosis object type	Method of analysis	Evaluation	Measurement category
Laakeri H-FFT	Rolling element bearing	enveloped FFT	Peak	mg
Laakeri FFT rms	Rolling element bearing	FFT	RMS	mg
Laakeri FFT peak	Rolling element bearing	FFT	Peak	mg
Epätasapaino	Unbalance	FFT	RMS	mm/s
Väljyys	Others	FFT	Peak	mg
Linjaus	Others	FFT	Peak	mg
RMS	RMS	FFT	RMS	mm/s
Effective value (v)				
Peak (a_max)				

	Taajuusikkuna		Varoitusraja	Vaurioraja
	Frequency window	Frequency factors	Limit values Yellow	Limit values Red
Laakeri H-FFT	2,00 %	4,94; 3,06; 4,01	5,00 x Teach	9,00 x Teach
Laakeri FFT rms	2,00 %	4,94; 3,06; 4,01	5,00 x Teach	9,00 x Teach
Laakeri FFT peak	2,00 %	4,94; 3,06; 4,01	5,00 x Teach	9,00 x Teach
Epätasapaino	5,00 %	1,00	2,00 x Teach	6,00 x Teach
Väljyys	5,00 %	0,50; 1,00; 2,00; 3,00	2,00 x Teach	6,00 x Teach
Linjaus	5,00 %	1,00; 2,00	2,00 x Teach	6,00 x Teach
RMS	99,80 %	50,50	4,00 x Teach	8,00 x Teach
Effective value (v)			4,50 mm/s	7,10 mm/s
Peak (a_max)			5000 mg	10000 mg

	Keskiarvot	Vaikutusviive	Suodatus
	Averages	Response delay	Filter
Laakeri H-FFT	1/8	5 (7,78 s)	450 Hz - 5950 Hz
Laakeri FFT rms	1/8	5 (7,78 s)	ei
Laakeri FFT peak	1/8	5 (7,78 s)	ei
Epätasapaino	1/8	5 (7,78 s)	ei
Väljyys	1/8	5 (7,78 s)	ei
Linjaus	1/8	5 (7,78 s)	ei
RMS	1/8	5 (7,78 s)	ei
Effective value (v)	1/4	5 (6,554 s)	ei
Peak (a_max)	1/1	3 (3,932 s)	ei