

Juha Palenius

# Teollisuuspuhaltimien värähtelymittaukset

Fläkt Woods Oy:n Espoon yksikössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Automaatiotekniikka  
Opinnäytetyö  
20.9.2011

Tekijä Otsikko	Juha Palenius Teollisuuspuhaltimien värähtelymittaukset Fläkt Woods Oy:n Espoon yksikössä
Sivumäärä Aika	72 sivua + 1 liite 20.9.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Prosessiautomaatio
Ohjaajat	Tuotannon kehitysinsinööri Mikko Puttonen Lehtori Jari Olli
<p>Tämän insinöörityön aiheina olivat Fläkt Woods Oy:n Espoon tehtaan teollisuuspuhaltimien värähtelymittaukset ja vianmääritys koeajoissa sekä kunnonvalvonnassa.</p> <p>Tavoitteena insinöörityössä oli selvittää pyörivien koneiden värähtelymittauksissa yleisesti käytetyt menetelmät sekä laitteet ja koota niistä oppikirjamainen tietopaketti Espoon asennuksen ja kunnonvalvonnan henkilöstön käyttöön. Tavoitteena oli myös tarkastella nykyisen mittaustoiminnan tilaa ja sen kehittämismahdollisuuksia.</p> <p>Työssä perehdyttiin kattavasti aiheeseen liittyviin standardeihin, alan ammattikirjallisuuteen, mittalaitteiden käyttöön, esitteisiin ja oppaisiin sekä varsinaiseen mittaustoimintaan Espoon tehtaalla ja asiakkaiden laitoksissa tehtyihin huoltotoimenpiteisiin.</p> <p>Työn tuloksena syntyi teollisuuspuhaltimien näkökulmasta tarkasteltu värähtelymittausten ja vianmäärityksen selvitys, johon on kerätty värähtelyn, sen syiden määrittämisen ja eliminoinnin, mittalaitteiden ja -anturien sekä yleisten standardien antamien suositusten ja raja-arvojen oleellinen sisältö helposti lähestyttävässä muodossa.</p> <p>Värähtelymittauksen teorian ja käytännön työn vertailuissa todettiin aiheeseen liittyvien standardien suositusten olevan liian yleisluonteisia eivätkä standardit sovi sellaisenaan käytettäväksi suoraan puhaltimien tuotannossa. Työssä osoitettiin useita parannuskohteita, joiden avulla mittaustoiminnasta voidaan saada enemmän hyötyä ja samalla helpottaa mittauksia suorittavien henkilöiden työskentelyä.</p>	
Avainsanat	kunnonvalvonta, värähtely, mittaus, anturi, vianmääritys, teollisuuspuhallin

Author Title	Juha Palenius Vibration measurements of industrial fans in Fläkt Woods Oy Espoo factory
Number of Pages Date	72 pages + 1 appendix 20 September 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	Process Automation
Instructors	Mikko Puttonen, Production Development Engineer Jari Olli, Lecturer
<p>The subject of this thesis was vibration measurements and fault diagnosis of industrial fans in the Fläkt Woods Oy Espoo factory during test runs and condition monitoring.</p> <p>The purpose of this study was to establish the essential basics, procedures and equipment for vibration measurement and the use of them as a tool for fault diagnosis, and to summarize them for Espoo factory employees of the assembly and condition monitoring to use. The purpose was also to review the current measurement procedures and development possibilities.</p> <p>During this study the relevant standards, professional literature, booklets and manuals, use of the measuring equipment and also the actual measuring in Espoo factory and maintenance operations in customer's production plants were profoundly examined.</p> <p>As a result a database of vibration measurement and fault diagnosis for industrial fans was created, where the fundamentals of vibration, diagnosing and elimination of its causes, measuring equipment and sensors and also the recommendations and limiting values from the universal standards are gathered in an easily approachable format.</p> <p>It was noticed while comparing the theories and the practices of vibration measurement that the guidelines of the standards in the subject are too universal and should not be used as such in production of the industrial fans. This study includes several proposals for improvements that can make the measuring operations more effective and at the same time make the daily work of the measuring staff easier.</p>	
Keywords	condition monitoring, vibration, measurement, sensor, fault diagnosis, industrial fan

# Sisällys

## Tiivistelmä

## Abstract

<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Kunnossapito ja kunnonvalvonta</b>	<b>2</b>
2.1 Kunnossapidon merkitys	2
2.2 Kunnossapidon ja kunnonvalvonnan tavoitteet	2
2.3 Kunnonvalvonnan menetelmiä	4
2.3.1 Valvontamenetelmien luokittelu	4
2.3.2 Yleisimmät valvontamenetelmät	4
<b>3 Värähtely</b>	<b>6</b>
3.1 Värähtely pyörivissä koneissa	6
3.2 Suureet, mittayksiköt ja käsitteet	7
3.3 Siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys	7
3.4 Suureiden keskinäiset yhteydet	8
3.5 Värähtelyn peruskäsitteitä	9
3.5.1 Värähtely ja aaltoliike	9
3.5.2 Jakso, taajuus ja vaihekulma	10
3.5.3 Kulmanopeus, pyörimisnopeus ja pyörimistaajuus	10
3.5.4 Amplitudi ja tehollisarvo	11
3.5.5 Huippuarvo, huipusta huippuun -arvo ja huippukerroin	11
3.6 Värähtelyä aiheuttavat tekijät	12
3.6.1 Värähtely pyörivässä koneessa	12
3.6.2 Epätasapaino	12
3.6.3 Linjausvirhe	14
3.6.4 Resonanssi	15
3.6.5 Laakerivaurio	17
3.6.6 Mekaaninen väljyys	19
3.6.7 Muita värähtelyn aiheuttajia	19
3.7 Värähtelyn tason alentaminen	20
3.7.1 Heräte ja vaste	20
3.7.2 Tasapainottaminen	21

3.7.3	Akselien linjaaminen	22
3.7.4	Rakenteen tukeminen	23
<b>4</b>	<b>Värähtelyn mittaaminen ja raja-arvot</b>	<b>24</b>
4.1	Värähtelymittausten suunnittelu	24
4.2	Mittaukset ja suositusarvot	24
4.2.1	Koeajomittaukset ja raja-arvot	24
4.2.2	Vastaanottotarkastus ja käyttöönotto	26
4.2.3	Kunnonvalvonta ja vianmääritys	27
<b>5</b>	<b>Mittausjärjestelmät ja -laitteet</b>	<b>28</b>
5.1	Mittaustarve	28
5.2	Mittausjärjestelmät	28
5.3	Mittalaitteet	29
5.3.1	Mittalaitetyypit	29
5.3.2	Yksinkertaiset käsimittarit ja kannettavat tiedonkeruulaitteet	30
5.3.3	Monikanavaiset analysaattorit ja PC-pohjaiset sovellukset	31
5.3.4	Kiinteästi asennettavat toteutukset ja suojausjärjestelmät	31
<b>6</b>	<b>Anturit</b>	<b>33</b>
6.1	Anturit yleisesti	33
6.2	Värähtelyanturin valinta	33
6.3	Värähtelymittauksen anturityypit	34
6.3.1	Siirtymäanturi	34
6.3.2	Nopeusanturi	36
6.3.3	Kiihtyvyyssanturi	37
6.4	Pyörimisnopeus ja vaihekulma	38
6.5	Pyörimisnopeuden anturityypit	39
6.6	Anturien ominaisuudet	40
6.6.1	Herkkyys ja erotustarkkuus	40
6.6.2	Taajuusalue, amplitudialue ja signaali-kohinasuhde	40
6.6.3	Värähtelyanturien kalibrointi	41
6.7	Mittapisteet	41
6.7.1	Mittapisteiden valinta	41
6.7.2	Laakeripesän ja moottorin mittapisteet	42
6.8	Kiinnitystavat	43
<b>7</b>	<b>Valvontamenetelmät ja vianmääritys</b>	<b>44</b>

7.1	Valvontamenetelmät	44
7.1.1	Yleistä valvontamenetelmistä	44
7.1.2	Tunnuslukuvalvonta	44
7.1.3	Kokonaistason valvonta	45
7.1.4	Spektri, verhokäyrä ja PeakVue-valvonta	45
7.2	Vikojen tunnistaminen	47
7.3	Aikatason kuvaaja	48
7.4	Taajuustason kuvaaja	50
7.5	Signaalien tulkinta	51
7.5.1	Amplitudin taso	51
7.5.2	Epätasapaino	51
7.5.3	Linjausvirhe	52
7.5.4	Taipunut akseli	53
7.5.5	Mekaaninen väljyys	53
7.5.6	Vierintälaakerien vikataajuudet	54
7.5.7	Roottorin hankaaminen	55
7.5.8	Lapataajuus, turbulenttinen virtaus ja kavitaatio	55
7.5.9	Vaihteisto ja hihnakäyttö	56
7.6	Sähkömoottorin osuus värähtelystä	58
<b>8</b>	<b>Fläkt Woods Oy:n puhaltimien värähtelymittaukset</b>	<b>59</b>
8.1	Teollisuuspuhaltimet	59
8.2	Puhallintyytit ja ominaisuudet	60
8.3	Koeajojen mittaukset ja raja-arvot	60
8.4	Kunnonvalvonnan mittaukset	62
8.5	Käytössä olevat mittalaitteet	63
8.5.1	FAG Detector III ja Trendline	63
8.5.2	VIKON Miva®, PEMAC® ja ROBAL®	64
8.5.3	SPM VibChecker	65
8.6	Mittaustoiminnan kehittäminen	66
8.6.1	Mittalaitteet ja koulutus	66
8.6.2	Koeajojen kehittäminen	67
8.6.3	Kunnonvalvonnan kehittäminen	68
<b>9</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>69</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>70</b>

## **Liitteet**

Liite 1: Vianmäärityksen esimerkkejä

## 1 Johdanto

Fläkt Woods Oy on yksi suurimmista ilmastointialan toimijoista maailmanlaajuisesti. Yrityksen tuotteet kattavat asuntorakentamisen, teollisuuden ja yhdyskuntarakentamisen. Espoon Karamalmilla sijaitsevassa yksikössä suunnitellaan ja valmistetaan teollisuuspuhaltimia moniin eri käyttökohteisiin, esimerkiksi jätevesien käsittelyyn, paperi- ja selluteollisuuteen ja meijereihin.

Puhaltimien valmistuksessa värähtelymittaukset ovat tärkeässä roolissa niin koeajossa kuin käytön aikaisessa kunnonvalvonnassakin. Värähtelymittauksilla saadaan tärkeää tietoa koneen kunnosta kaikissa sen elinkaaren vaiheissa.

Tässä insinööriyössä on tarkoitus perehtyä kunnonvalvonnan värähtelymittauksiin ja koota aiheesta löytyvä oleellinen tieto Espoon tuotannon henkilöstön käyttöön. Tarkoitus on perehtyä aiheeseen liittyviin standardeihin ja muuhun ammattikirjallisuuteen, saatavilla oleviin laitteisiin ja tuotannossa nykyisin käytettyihin menetelmiin sekä esittää mahdollisia uusia ja tuoda esille jo aiemmin syntyneitä kehitysehdotuksia mittaus-toimintaan.

Työn päällimmäisenä tavoitteena on tuoda värähtelyn ja sen mittausten perusasiat ja käsitteet kaikkien kunnonvalvonnan parissa työskentelevien henkilöiden, etenkin tuotannon työntekijöiden, saataville ja parantaa sekä laajentaa näin yrityksen ammat-tiosaamista. Työhön on tarkoitus sisällyttää perusteellisen teoriaosuuden lisäksi paljon kuvia, taulukoita, käsitteiden selityksiä sekä vianmääritystä tukevia vertailuesimerkkejä pohjautuen aitoihin puhaltimiin. Parhaimmillaan työ toimii käytännön työn tukena selit-täen ilmiöiden ja menetelmien syitä ja antaen taustatietoja eri työvaiheista.

Värähtelyn ja kunnonvalvonnan mittausten menetelmät ja laitteet kehittyvät jatkuvasti ja niiden merkitys koneiden valmistuksessa tulee korostumaan entisestään. Vahva osaaminen erityisesti yrityksen omien tuotteiden ominaispiirteistä ja vianmäärityksestä tukevat tuotteiden parantamista sekä uusien mallien kehittämistä, ja antavat näin mahdollisuuden tarjota asiakkaille kestävämpien ja tehokkaampien tuotteiden lisäksi myös kattavia huolto- ja tukipalveluita.



## **2 Kunnossapito ja kunnonvalvonta**

### **2.1 Kunnossapidon merkitys**

Kunnossapitoon liittyvät kaikki koneen elinjakson aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimenpiteet, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa koneen toimintakyky tilaan, jossa se pystyy suorittamaan haluttuja toimintoja. Keskeisiä tavoitteita ovat tuotannon kokonaistehokkuus sekä hyvä käyttövarmuus, joka koostuu toiminnan varmuudesta, kunnossapidettävyydestä ja kunnossapitovarmuudesta. Kunnossapito on hyvin laaja käsite, eikä sille ole olemassa yhtä ainoata oikeata määritelmää. Aiemmin kunnossapidon on käsitetty sisältävän vain vikojen esiintymisen jälkeiset korjaukset ja huollot sekä tuotannon redundanttisen varmistamisen. [1, s. 16—17; 2, s. 12; 3, s. 4]

Kunnonvalvonta on kunnossapidon osa-alue, joka tuottaa tehdaslaitosten koneiden ja laitteiden käytön ja kunnossapidon kannalta oleellisia tietoja. Kunnonvalvonnalla voidaan vaikuttaa suoraan toiminnan kannattavuuteen. Kunnonvalvonnalla voidaan säästää suuria hyötyjä tuottavuuden kasvun, kunnossapidon suunniteltavuuden, seisokkiaikojen vähentämisen ja paremman hyödyntämisen sekä koneiden pidentyneiden elinkaarien kautta. [4, s. 11]

### **2.2 Kunnossapidon ja kunnonvalvonnan tavoitteet**

Taulukkoon 1 on kerätty kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan liittyviä käsitteitä ja termejä, joita käytetään yleisesti teollisuudessa. Monet taulukon 1 yleisluonteisista termeistä ovat vaikeasti määriteltäviä ja sisällöltään joko osittain tai kokonaan samoja, ja eri ihmiset tulkitsevatkin niitä monella eri tavalla.

Taulukko 1. Kunnossapidon käsitteitä [2, s. 8—33; 3, s. 2—27; 5, s. 26]

<b>Käsite</b>	<b>Sisältö</b>
kunnossapito	kaikki kohteen eliniän aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimintakyvyn ylläpitämiseen tai palauttamiseen tähtäävät toimenpiteet
käyttövarmuus	kyky toimia vaadittaessa vaaditulla tavalla
kunnossapitovarmuus	kunnossapito-organisaation kyky tukitoimenpiteiden mahdollistamiseen vaadittaessa
toimintavarmuus	kyky suorittaa vaadittu toiminto vaaditun ajan määrätyissä olosuhteissa
kunnossapidettävyyys	kohteen kyky olla pidettävissä tai palautettavissa normaalin toiminnan tilaan kunnossapidon toimenpiteillä
ehkäisevä kunnossapito	määrätyin välein tai suunniteltujen kriteerien täytyessä suoritettu kunnossapito
jaksotettu kunnossapito	ehkäisevä kunnossapito joka suoritetaan ilman toimintakunnon tutkimusta ennalta määritettyjen aikajaksojen tai käytön määrän mukaan
kuntoon perustuva kunnossapito	ehkäisevä kunnossapito kunnonvalvonnan ja/tai tarkastamisen ja/tai testauksen ja tulosten analysoinnin pohjalta
ennakoiva kunnossapito	kuntoon perustuva kunnossapito, joka perustuu toistuviin analyysihin ja/tai tunnettujen ilmiöiden pohjalta tehtyihin ennusteisiin ja/tai kohteen toimintakunnon heikkenemistä kuvaaviin muuttujiin
korjaava kunnossapito	kunnossapito, joka tehdään vian havaitsemisen jälkeen
käynninaikainen kunnossapito	kunnossapitotoimet tehdään kohteen käydessä ilman vaikutusta sen toimintaan
kunnonvalvonta	määrätyin välein manuaalisesti tai automaattisesti tehtävä toimenpide, jolla mitataan kohteen tilaa ja parametreja
vianmääritys	toimenpiteet vian havaitsemiseksi ja paikallistamiseksi sekä vikaantumisen syiden määrittämiseksi

Kunnonvalvontamittauksilla pyritään havaitsemaan laitteiden vikaantuminen hyvissä ajoin ennen vian kehittymistä niin vakavaksi, että se johtaa koneen pysäyttämiseen. Esimerkiksi laakeriviat voidaan oikeilla valvontamenetelmillä usein havaita aikaisessa vaiheessa, mahdollistaen vielä kuukausien turvallisen käytön ja laakerien vaihdon ajoittamisen ilman normaalin tuotannon häiriintymistä. Mittaavan kunnonvalvonnan merkityksen kasvuun ovat vaikuttaneet tuotantolinjojen rakentaminen ilman varakoneita, tuotantomäärien kohoaminen, koneiden pyörimisnopeuksien kasvu ja rakenteiden keventäminen, huolto- ja käyttöhenkilökunnan vähentäminen ja käyttöolosuhteiden epämieluisat olosuhteet. [4, s. 13; 6, s. 2]

## 2.3 Kunnonvalvonnan menetelmiä

### 2.3.1 Valvontamenetelmien luokittelu

Kunnonvalvonnassa on käytössä useita erilaisia mittausmenetelmiä, ja ne voidaan luokitella esimerkiksi mitattavien tunnusuu- reiden tai käytettävien mittausmenetelmien mukaan. Aistinvaraiset menetelmät antavat karkean yleiskuvan tilanteesta, ne pohjautuvat ihmisen näkö-, kuulo-, tunto- ja hajuaisteluihin, ja niiden antamia tuloksia on käytännössä mahdotonta dokumentoida tai vertailla luotettavasti. Fysikaalisten perussuureiden, kuten lämpötilan, paineen ja sijainnin, mittaamiseen perustuvat menetelmät ovat laajasti käytettyjä energia- ja prosessiteollisuudessa, hydraulikka-, pneumatiikka-, voitelu- ja jäähdytysjärjestelmissä sekä laakeroinneissa. Sähköisiä perussuureita, esimerkiksi jännitettä, virtaa, tehoa tai resistanssia, mittaavia kunnonvalvonnan toteutuksia käytetään sähköisten laitteiden, komponenttien ja käyttöjen valvontaan sekä muiden laitteiden yleiskunnon tarkkailemiseen. [5, s. 418; 7]

### 2.3.2 Yleisimmät valvontamenetelmät

Aistinvaraiset havainnot kertovat yleensä jo hyvin pitkälle edenneistä vioista ja yleensä muut mittausmenetelmät havaitsevat koneiden vauriot ennen ihmistä, mutta siltikään koneiden aistinvaraista kunnonvalvontaa ei kannata aliarvioida. Vielä nykyäänkin on toiminnassa suuri määrä koneita, joiden kuntoa valvotaan pelkästään aistinvaraisesti. [5, s. 418; 7]

Värähtelymittaukset ovat yleisimmin käytettyjä mittausmenetelmiä kunnonvalvonnassa, käytönaikaisessa valvonnassa sekä vikojen selvityksissä. Värähtelynvalvonnan suunnittelu on monimutkainen prosessi. Ohjaavina tekijöinä käytetään yleensä valvottavan kohteen kriittisyyttä tuotantoprosessin kannalta ja taloudellisia rajoitteita. Värähtelymittaukset soveltuvat erinomaisesti pyörivien koneiden ja niiden laakerointien, hammasvaihteiden ja sähkökäyttöjen kunnonvalvontaan. [4, s. 17–18; 5, s. 223]

Lämpötilamittaukset ovat myös yleisesti käytetty menetelmä teollisuuden kunnonvalvonnassa. Lämpötilaa käytetään etenkin erilaisten prosessien valvontaan, vierintälaakereiden vianhavaitsemiseen ja myös erilaisissa suojaus- ja hälytystoiminnoissa. Lämpötila

voidaan mitata koskettavalla tai koskettamattomalla mittalaitteella. Koskettavat anturit, kuten esimerkiksi Pt-100-metallivastusanturit, voidaan asentaa kohteeseen kiinteästi ja niitä voidaan käyttää helposti myös koneen käydessä. Lämpökameralla saadaan kerralla kohdetta koskettamatta lämpötilatiedot laajemmalla pinta-alueelta kuin pistemäisellä, edullisemmalla infrapunälämpömittarilla. [4, s. 20—21; 5, s. 439—446; 6, s. 5]

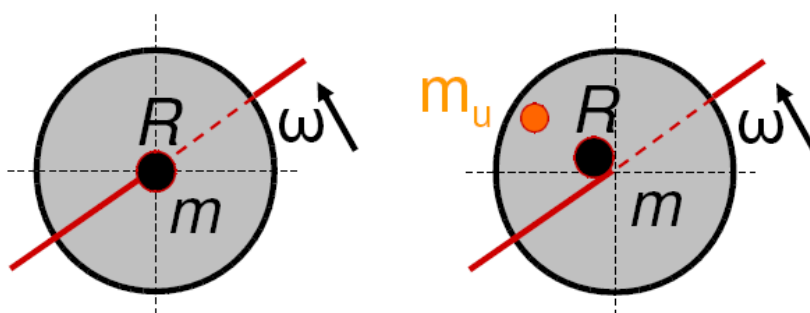
Laakeroidun koneen osat pyörivät voiteluainekalvon varassa, joten voiteluaineanalyysit ovat luonnollisia menetelmiä antamaan tietoa koneen osien kulumisesta, prosessin toiminnasta, voitelun tehokkuudesta ja itse voiteluaineen tilasta, koska voiteluaineen käyttökuunto ja koneen kunto vaikuttavat väijäämättä toisiinsa. Epäpuhtaudet lisäävät kulumista ja laskevat voiteluaineen kuntoa, laskenut voitelutaso lisää koneen kulumista ja lisääntynyt kuluminen tarkoittaa lisää epäpuhtauksia voiteluaineessa. Voiteluaineanalyysit jaotellaan neljään ryhmään. Perusanalyyseillä tutkitaan itse voiteluaineen kuntoa. Hiukkasanalyyseillä seurataan voiteluaineen puhtautta, epäpuhtauksien hiukkaskokoa, -määrää ja -jakaumaa sekä koko koneen kuntoa. Kulumametallianalyyseillä saadaan tietoa koneen kunnosta seuraamalla voiteluaineessa olevien metallipitoisuuksien muutoksia. Erikoistapauksissa voidaan voiteluaineelle tehdä vesipitoisuusanalyysijä. [4, s. 22—23; 5, s. 429; 6, s. 6]

Koneiden kuntoa voidaan seurata myös laskemalla prosessin virtausmääristä, lämpötiloista ja paineista hyötysuhteita tai käyttämällä aiemmin kerättyä tietoa ja vertaamalla näitä tuloksia todellisiin, mitattuihin arvoihin. Kohteina voivat olla muun muassa turbiniit, lämmönsiirtimet, venttiilit, pumpput tai kokonaiset prosessit. Sähkömoottoreiden mekaanisten osien kunnonvalvontaan käytetään samoja menetelmiä kuin muidenkin pyörivien koneiden, mutta joitakin niille tyypillisiä vikoja havaitaan vain mittaamalla syötettyä virtaa, tehoa ja jännitettä. [4, s. 21—22; 5, s. 369; 6, s. 5—6]

### 3 Värähtely

#### 3.1 Värähtely pyörivissä koneissa

Kaikki pyörivät koneet värähtelevät käyttäessä, eikä värähtelyä voida kokonaan poistaa. Yleisimmin värähtely aiheutuu epätasapainosta, asennusvirheistä tai vaurioituneista osista. Mekaaninen värähtely eli värähtelyä määritellään rakenteen, koneen tai koneen osan liikkeeksi tasapainoasemansa ympärillä. Kuvassa 1 vasemmalla on havainnollistettu massakeskipisteen ideaalitilanne ja oikealla epätasapainoa kuvaavan massan  $m_u$  vaikutus massakeskipisteen  $m$  siirtymiseen. [4, s. 40; 6, s. 7]



Kuva 1. Massan  $m_u$  vaikutus kappaleen massakeskipisteeseen  $m$  [8, s. 5].

Värähtely tarvitsee jatkuakseen sitä ylläpitävän voiman, joka muuttaa joko suuntaansa tai suuruuttaan jatkuvasti. Jos värähtelyyn ei vaikuta ulkoista voimaa, sitä kutsutaan vapaaksi värähtelyksi, joka vaimenee ja lopulta katoaa. Kun värähtelyyn vaikuttaa ylläpitävä voima, esimerkiksi sähkömoottorista akselin kautta välittyvä voima, puhutaan pakkovärähtelystä. Kappale alkaa värähdellä tämän harmonisen voiman taajuudella. Todellisuudessa kappaleen värähtely on usean eri taajuuskomponentin summa. [4, s. 40 – 44]

Pyörivien koneiden värähtelystä 80–90 % aiheutuu epätasapainosta, linjausvirheistä tai mekaanisesta väljyydestä. Muita syitä ovat esimerkiksi voiteluongelmat, laakerivauriot, resonanssi tai kavitaatio. [9, s. 9]

### 3.2 Suureet, mittayksiköt ja käsitteet

Värähtelymittauksissa käytetään yleisesti taulukossa 2 olevia suureita ja mittayksiköitä. Myös muita suureita ja merkintätapoja voidaan käyttää, mutta pyrkimyksenä on yhdenmukainen ja yleisesti tunnettu käytäntö.

Taulukko 2. Värähtelyn mittauksissa käytetyt suureet ja mittayksiköt [10, s. 12].

Suure	Mittayksikkö	SI-mittayksikkö
siirtymä [s]	$\mu\text{m}$	m
nopeus [v]	mm/s	m/s
kiihtyvyys [a]	$\text{m/s}^2$ , g	$\text{m/s}^2$
taajuus [f]	Hz	Hz
pyörimisnopeus [n]	1/min, rpm, 1/s	1/s
vaihekulma [ $\phi$ ]	°	rad
jaksonaika [T]	ms	s

Värähtelyn tasoa mitataan siirtymänä, nopeutena tai kiihtyvyytenä. Pelkkä kokonaisvärähtelyn taso voidaan mitata ja ilmoittaa värähtelyn suureiden avulla, mutta myös vaihekulma ja pyörimisnopeus ovat tärkeitä mittaushetkiä tasapainotuksessa.

### 3.3 Siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys

Värähtelyn mittaaminen siirtymänä ilmaisee kohteen siirtymän vertailupisteeseen nähden. Siirtymän käyttäminen mittasuurena voi olla järkevää, jos mitattava koneen pyörimisnopeus on alle 300 rpm tai jos oletettavissa olevat viat ilmenevät matalilla, alle 100 Hz taajuuksilla. [4, s. 50]

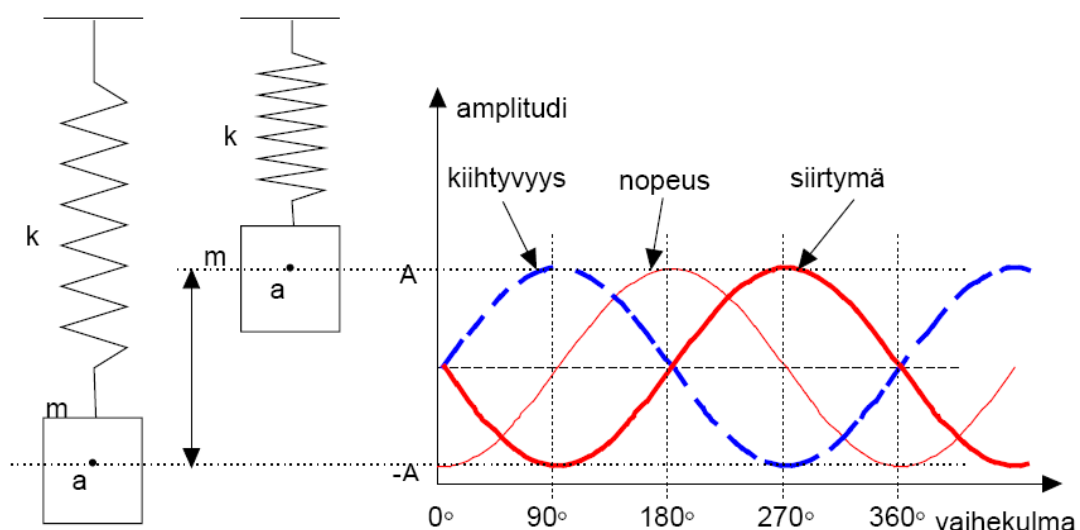
Värähtelyn nopeus on yleisimmin käytetty kunnonvalvonnan mittaussuure, koska sen vaste on sopiva yleisimmin mittauksissa tarkastelun kohteina olevilla taajuuksilla. Värähtelyn mittaaminen nopeutena ilmaisee kohteen siirtymän tietyn ajanhetken aikana. [5, s. 228]

Kiihtyvyyden mittaaminen ilmaisee kohteen nopeuden muutoksen tietyn ajanhetken kuluessa. Kiihtyvyys on käytännöllinen mittaussuure korkeilla taajuuksilla. Kunnonval-

vonnassa mittausanturina käytetään yleisimmin kiihtyvyyssanturia, jonka tulos integroidaan yleisimmäksi suureeksi eli nopeudeksi. Integrointi suoritetaan joko analogisella integraattorilla mittalaitteessa tai digitaalisesti aikatasosignaalista ja taajuusspektristä. [5, s. 229]

### 3.4 Suureiden keskinäiset yhteydet

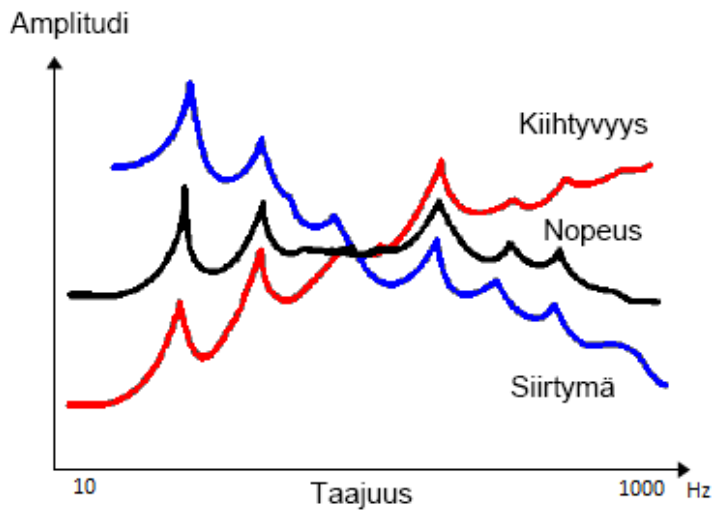
Kuvassa 2 on havainnollistettu värähtelyä jousen  $k$  ja massan  $m$  avulla, ja kolmen yleisimmin käytetyn mittaussuureen keskinäinen suhde on havainnollistettu samassa kuvaajassa, jonka vaaka-akselilla on vaihekulma asteina ja pystyakselilla värähtelyn amplitudi eli värähtelyn laajuus.



Kuva 2. Värähtelyn yleisimmin mitatut suureet ja niiden väliset suhteet eri vaiheissa [6, s. 8].

Riippumatta siitä, mitä suuretta todellisuudessa mitataan, voidaan muut suureet määrittää matemaattisesti joko derivoimalla tai integroimalla ajan suhteen siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys. Siirtymän ensimmäinen derivaatta on nopeus ja toinen kiihtyvyys. Vastaavasti kiihtyvyyden ensimmäinen integraali on nopeus ja toinen siirtymä. Laskutoimitukset suoritetaan joko suoraan mittalaitteessa tai tulosten analysointiohjelmassa. [4, s. 50; 5, s. 229; 11, s. 50 – 56]

Kuvassa 3 on esitetty malli siirtymän, nopeuden ja kiihtyvyyden taajuusvasteista ja niiden keskinäisistä eroista.



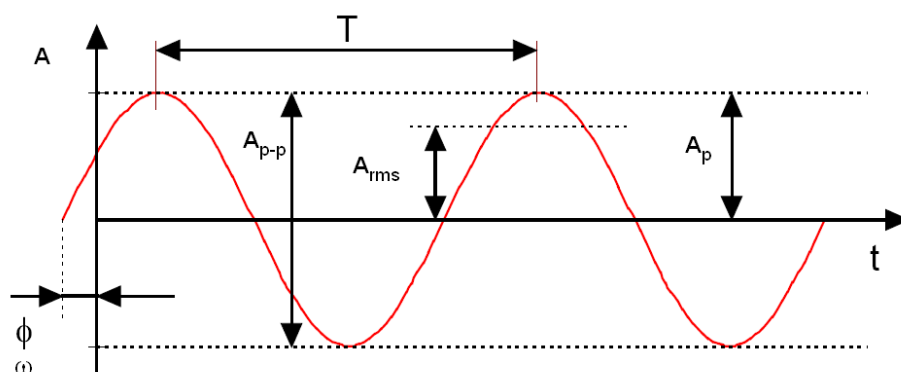
Kuva 3. Siirtymän, nopeuden ja kiihtyvyyden taajuusvasteiden hahmotelmat [6, s. 10].

Kuvassa 3 nähdään, että nopeus on käyttökelpoisin mittasuure laajimmalla taajuusalueella, joka on yleensä 10–1000 Hz. Kun mitataan matalampia taajuuksia, on siirtymä usein hyödyllisempi, ja vastaavasti korkeimmilla taajuuksilla voi olla kannattavampaa käyttää kiihtyvyyttä mitattavana suureena. [5, s. 228]

### 3.5 Värähtelyn peruskäsitteitä

#### 3.5.1 Värähtely ja aaltoliike

Koska värähdysliike on jaksoittain toistuvaa aaltoliikettä, niiden peruskäsitteet ja yksiköt ovat samoja. Kuvassa 4 on esitetty erään aaltoliikkeen eteneminen ja siihen liittyviä peruskäsitteitä.



Kuva 4. Värähtelysignaalin peruskäsitteitä [10, s. 1].



Kuvassa 4 olevan signaalin suure voisi olla siirtymä, nopeus tai kiihtyvyys, koska niille kaikille käytetään samoja parametreja. Kuvassa 4 esiintyvät käsitteet selitetään seuraavissa kappaleissa.

### 3.5.2 Jakso, taajuus ja vaihekulma

Jakson eli jaksonajan (T) yksikkö on sekunti, s. Jaksonajalla tarkoitetaan yhteen kokonaiseen värähdysliikkeeseen kulunutta aikaa (kuva 4). Jaksonaika voidaan laskea kaavalla

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

jossa f on taajuus ja T jaksonaika. [12, s. 67]

Taajuuden (f) yksikkö on hertsi Hz tai 1/s, joka tarkoittaa tapahtumien määrää yhdessä sekunnissa. Taajuus ilmoittaa aikayksikössä tapahtuvien värähdysten lukumäärän. Kun jaksonaika on tiedossa, taajuus voidaan laskea kaavalla

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

jossa T on jaksonaika ja f taajuus. [12, s. 67]

Vaihekulma kertoo signaalista jakson kohdan, johon värähtely on edennyt vertailukohdasta. Vaihekulma lasketaan ajan, kulmataajuuden ja alkuvaihekulman avulla kaavalla

$$\omega t + \phi \quad (3)$$

jossa  $\omega$  on kulmanopeus, t on ajan hetkellisarvo ja  $\phi$  on alkuvaihekulma, joka riippuu värähtelijän alkutilanteesta. Kuvassa 2 nähtävät siirtymän, nopeuden ja kiihtyvyyden signaalit ovat vaihekulmiltaan aina 90 astetta toistensa perässä. [6, s. 7 – 9; 12, s. 68]

### 3.5.3 Kulmanopeus, pyörimisnopeus ja pyörimistaajuus

Kulmanopeuden eli kulmataajuuden ( $\omega$ ) yksikkö on radiaania sekunnissa rad/s. Kulmanopeus ilmaisee kulman muutosnopeuden aikayksikköä kohden, ja se voidaan laskea kaavalla

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

jossa  $\omega$  on kulmanopeus,  $\pi$  on vakio pii ja f on taajuus. [12, s. 68]

Pyörimisnopeuden ( $n$ ) yksikkönä on usein rpm tai 1/min. Pyörimisnopeus ilmaisee kapaleen tekemät kierrokset esimerkiksi minuutin aikana. Pyörimisnopeus voidaan laskea pyörimistaajuudesta kaavalla

$$n = f_n * 60 \quad (5)$$

jossa  $n$  on pyörimisnopeus ja  $f_n$  on pyörimistaajuus. [13, s. 12]

Pyörimistaajuuden ( $f_n$ ) yksikkö on hertsi Hz. Pyörimistaajuus on pyörimisnopeus kieroksina sekunnissa. Pyörimistaajuus johdetaan pyörimisnopeudesta kaavalla

$$f_n = \frac{n}{60} \quad (6)$$

jossa  $f_n$  on pyörimistaajuus ja  $n$  on pyörimisnopeus. [14, s. 6]

### 3.5.4 Amplitudi ja tehollisarvo

Amplitudin eli värähtelylaajuuden ( $A$ ) yksikkönä on mitattavan suureen yksikkö. Amplitudista puhuttaessa tarkoitetaan usein huippuamplitudia  $A_p$ , joka on värähtelyn muodostaman sinikäyrän huippuarvo, mutta amplitudi tietyllä ajanhetkellä ei välttämättä ole värähtelyn huippuarvo. Kuvassa 4 amplitudin arvot löytyvät pystyakselilta. [10, s. 1–3]

Tehollisarvon eli neliöllisen keskiarvon ( $A_{rms}$  tai rms) yksikkö on mitattavan suureen yksikkö. Tehollisarvo on yleisimmin käytetty tapa ilmoittaa värähtelyn voimakkuus, ja se kuvaa värähtelyn keskimääräisen energiasisällön suuruutta paremmin kuin yksittäinen huippuarvo (kuva 4). Tehollisarvo  $A_{rms}$  voidaan laskea huippuarvosta  $A_p$  kaavan

$$A_{rms} = \frac{A_p}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

avulla. [4, s. 51–52; 10, s. 1–3]

### 3.5.5 Huippuarvo, huipusta huippuun -arvo ja huippukerroin

Huippuarvon eli huippuamplitudin ( $A_p$ ) yksikkö on mitattavan suureen yksikkö. Huippuarvo on värähtelyn ääripisteiden etäisyys nolla-asetasta (kuva 4), arvo on aina positiivinen ja se lasketaan jakamalla värähtelyn ääripisteiden etäisyys toisistaan, eli huipusta huippuun -arvo  $A_{p-p}$ , kahdella kaavan

$$A_p = \frac{A_{p-p}}{2} \quad (8)$$

mukaisesti. [10, s. 1–3]

Huipusta huippuun -arvon ( $A_{p-p}$ ) yksikkö on mitattavan suureen yksikkö. Huipusta huippuun -arvolla tarkoitetaan värähtelyn ääriarvojen etäisyyttä toisistaan (kuva 4), ja se lasketaan summaamalla positiivisen ja negatiivisen huippuarvon itseisarvot yhteen. [10, s. 1–3]

Huippukertoimella (PAR) ei ole yksikköä. Joskus huippukertoimen arvo ilmoitetaan desibeleinä, jolloin yksikkönä on dB. Huippukerroin on suureen huippuarvon suhde tehollisarvoon, ja normaalilla sinimuotoisella käyrällä se on kahden neliöjuuri, likiarvoltaan 1,414. Huippukerroin lasketaan kaavalla

$$C = \frac{A_p}{A_{rms}} \quad (9)$$

jossa C on huippukerroin,  $A_p$  huippuarvo ja  $A_{rms}$  tehollisarvo. [10, s 4; 11, s. 164]

### 3.6 Värähtelyä aiheuttavat tekijät

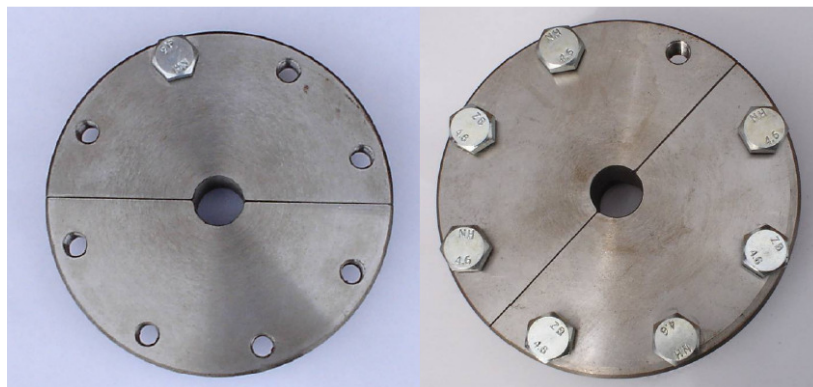
#### 3.6.1 Värähtely pyörivässä koneessa

Värähtely pyörivässä koneessa on aina usean eri komponentin summa. Värähtelyä aiheuttavien tekijöiden käsittely ja ymmärtäminen on helpompaa yksittäin, mutta todellisessa tilanteessa värähtelyn aiheuttajan tai aiheuttajien tunnistaminen voi olla hyvin haastavaa. Toisinaan värähtelyn tasoa pyritään turhaan laskemaan tasapainottamalla roottoria, kun värähtely todellisuudessa aiheutuu jostakin toisesta syystä kuin epätasapainosta. [8, s. 23; 15]

#### 3.6.2 Epätasapaino

Epätasapaino on pyörivien koneiden yleisin haitallisen värähtelyn aiheuttaja. Epätasapaino voi johtua esimerkiksi kohteen epätasaisesta likaantumisesta tai kulumisesta, massan irtoamisesta käytön aikana tai kappaleen sisäisten jännitysten laukeamisesta, mutta yksinkertaisimmillaan se voidaan ajatella joko ylimääräisenä tai liian vähäisenä

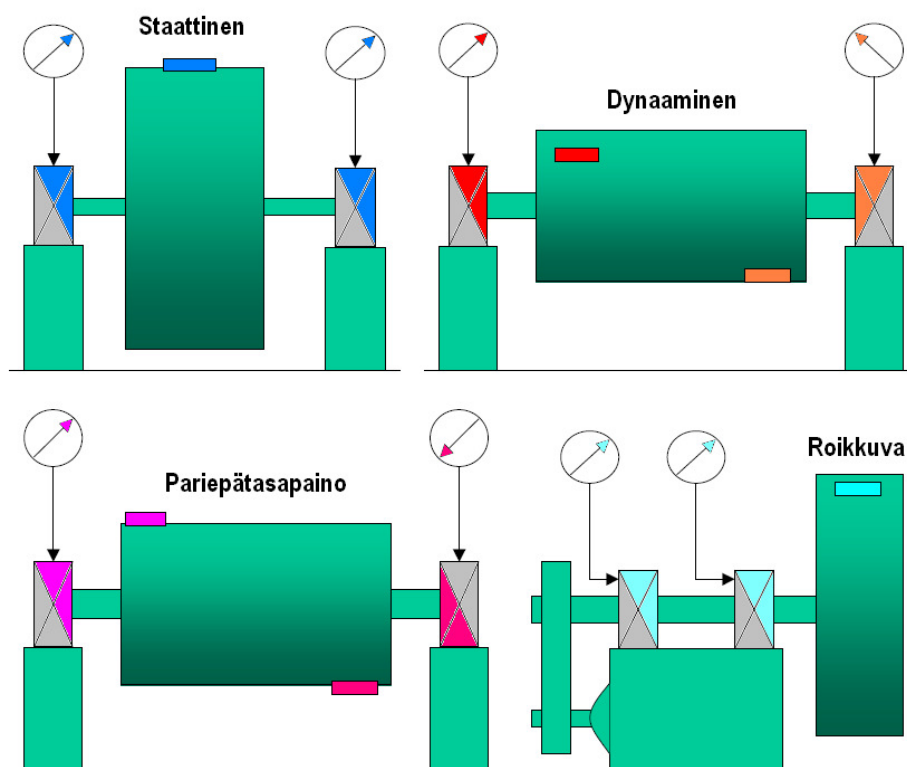
massana kappaleessa (kuva 5). Varsinaisesti epätasapaino aiheuttaa keskihakuvoiman komponentin, joka vaikuttaa pyörivään kappaleeseen ja aiheuttaa värähtelynä ilmenevän epätasaisen pyörimisen. [5, s. 297; 16, s. 7]



Kuva 5. Epätasapainoa kappaleissa [8, s. 5].

Epätasapaino voi esiintyä staattisena tai pariepätasapainona. Yleensä nämä molemmat epätasapainotyytit esiintyvät yhdessä, jolloin puhutaan dynaamisesta epätasapainosta. Yleisesti staattista epätasapainoa kutsutaan yhden tason ja dynaamista useamman tason epätasapainoksi. [16, s. 7–9]

Kuvassa 6 on havainnollistettu erilaisia epätasapainotyyppisiä pyörivän kappaleen eri kohdissa sijaitsevien epätasapainoa aiheuttavien massojen ja niiden aiheuttamien voimien avulla. Kuvan 6 vasemmassa yläreunassa on esimerkki staattisesta epätasapainosta, jossa epätasapainoa aiheuttava massa on yhdessä tasossa. Vasemmalla alhaalla on malli pariepätasapainosta, jossa epätasapainoa aiheuttavat massat ovat kahdella eri tasolla mutta sijoittuneet täsmälleen vastakkaisille puolille, jolloin kappaleen voidaan sanoa olevan staattisesti tasapainossa. Oikealla ylhäällä kuvataan dynaamista epätasapainoa kahdella eri tasolla sijaitsevilla massoilla, jotka eivät ole toistensa vastapuolilla. Oikealla alhaalla on molempien laakerien ulkopuolella roikkuva kappale ja staattinen epätasapaino. [17, s. 2]



Kuva 6. Staattinen, dynaaminen ja pariepätasapaino sekä roikkuva roottori [16, s. 9].

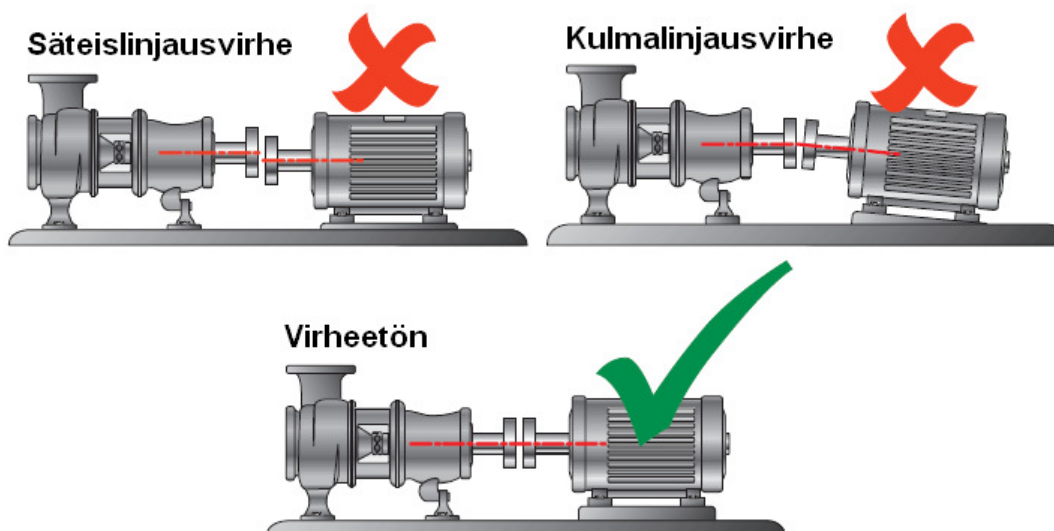
Kiekkomaisille eli kapeille kappaleille riittää usein tasapainotus staattisesti yhdellä korjaustasolla, kun kappaleen asentovirhe pyörimisakselin suhteen on vähäinen. Mikäli kappaleen tasapainotus ei ole riittävä yhteen tasoon, käytetään tasapainotuksessa kahda tai useampaa korjaustasoa. Roikkuvassa eli vain toiselta puolelta tuetussa roottorissa epätasapaino aiheuttaa erilaisia värähtelyitä ja erisuuntaisia voimia kuin molemmilta puolilta laakerein tuetuissa koneissa. [16, s. 9; 17, s. 4]

### 3.6.3 Linjausvirhe

Linjausvirhe eli epäkeskeisyys aiheuttaa värähtelyä ja osien kulumista pyörivässä koneessa. Linjausvirhettä voi esiintyä koneen kaikissa liitoksissa, joissa kahden osan pyörimisliikkeiden keskilinjat voivat poiketa toisistaan. Tällaisia kohtia ovat esimerkiksi kytkimet, hihnapyörät, vaihteistot ja laakeroinnit. [16, s. 9]

Kulmalinjausvirheessä (kuva 7) kahden akselin keskilinjat ovat erisuuntaisia, ja tämä aiheuttaa pääasiassa akselin suuntaista värähtelyä. Säteislinjausvirhe eli yhdensuunta-

suusvirhe (kuva 7) tarkoittaa tilannetta, jossa kahden akselin keskilinjat ovat samansuuntaisia mutta eivät ole samassa linjassa toisiinsa nähden. [16, s. 11–12]



Kuva 7. Kytkimen säteis- ja kulmalinjausvirhe sekä virheetön tilanne [18, s. 42].

Aksiaalivirhe tarkoittaa kahden akselin liian suurta tai pientä etäisyyttä toisistaan aksiaalisuunnassa. Samalla hihnalla yhdistettyjen hihnapyörien linjausvirhe voi olla aksiaalista tai väärästä kulma-asennosta johtuvaa, ja se aiheuttaa värähtelyn lisäksi hihnojen ennenaikaista kulumista. Laakerointien linjausvirhe syntyy, kun kaksi samaa akselia kannattelevaa laakeria eivät ole linjassa toisiinsa nähden. [11, s. 128; 19, s. 10; 18, s. 43]

Nykyisin linjaus suoritetaan useimmiten linjaukseen tarkoitetulla laserlinjauslaitteella, jonka tarkkuus ja toistettavuus ovat parempia kuin aiemmin käytettyjen mekaanisten menetelmien. Linjauksen toleranssi määritetään kohteen mukaan ja mahdollinen lämpölaajenemisen aiheuttama muutos otetaan huomioon. [19, s. 7]

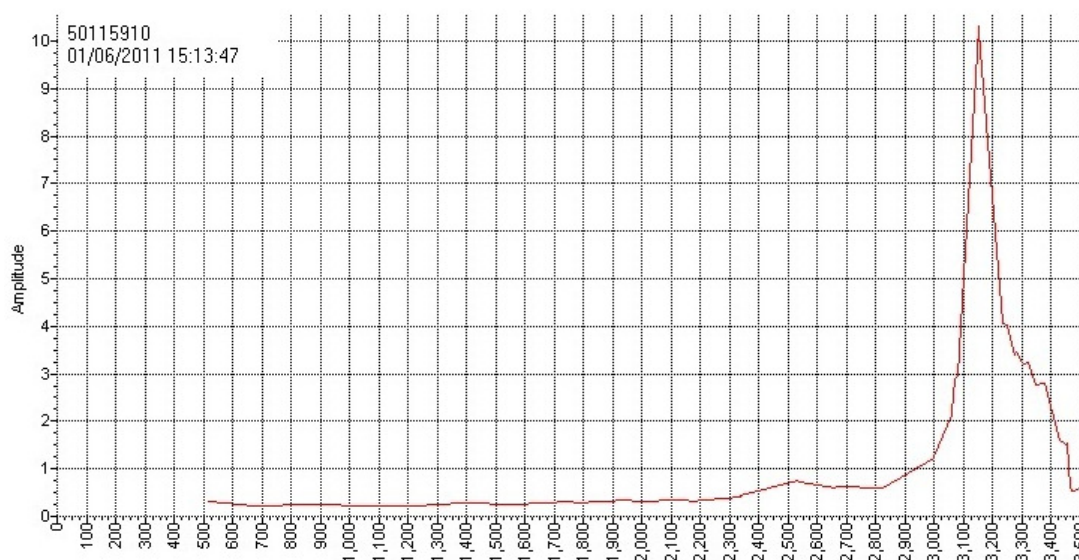
#### 3.6.4 Resonanssi

Voimakas värähtely koneessa saattaa olla peräisin jostakin herätetaajuudesta ja ilmetä tietyllä pyörimisnopeudella. Resonanssi johtuu koneen tukirakenteen tai koneen osan käyttötarkoitukseensa liian joustavasta tai kevyestä rakenteesta. Kaikilla rakenteilla on

omat ominaistajuuksensa, jotka aiheuttavat mahdollisesti resonanssia, kun pyörimistajuus osuu riittävän lähelle. [20, s. 2]

Resonanssia ilmenee, kun koneessa vaikuttaa herätevoima, pyörivässä koneessa tiettyä pyörimisnopeudella ilmenevä voima, jonka taajuus osuu lähelle rakenteen ominaistajuuksia. Resonanssin värähtelyä voimistava vaikutus on tyypillisesti hyvin suuri, noin 5—50-kertainen. Koneille määritellään usein resonanssin takia jokin tietty kierroslukualue tai useampia alueita, joilla konetta ei saa käyttää ja jotka on ylös- ja alasajossa ohitettava mahdollisimman nopeasti. [5, s. 302; 20, s. 2]

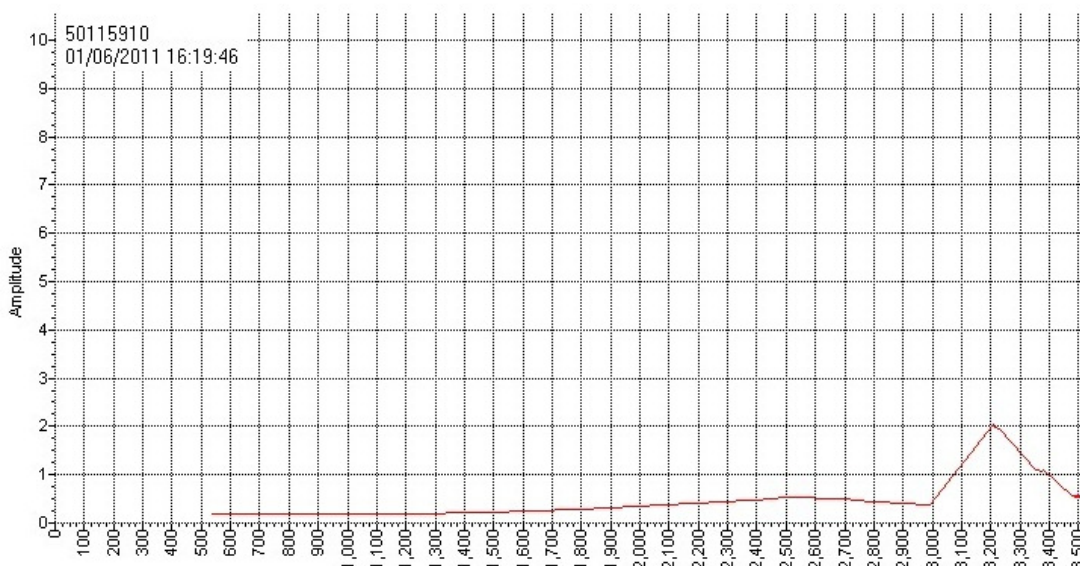
Kuvassa 8 on tehtaalla asennetun puhaltimen ylösajosta mitattujen värähtelyarvojen muodostama kuvaaja, jossa vaaka-akselilla on pyörimisnopeus ja pystyakselilla värähtelyn tehollisarvon amplitudi. Yksikköinä ovat millimetriä sekunnissa ja kierrosta minuutissa. Kuvan 8 mittauksissa on kyseessä puhaltimen ensimmäinen testiajo. Kuvan anturi oli kiinnitettyä puhaltimen sähkömoottorin käyttöpään laakerin kohdalle, akselin suuntaisesti.



Kuva 8. Puhaltimen ylösajon kuvaaja ennen tasapainotusta.

Kuvassa 8 nähdään puhaltimesta mitattuja värähtelyarvoja nopeusalueella 525—3500 rpm. Värähtely pysyy alhaisena suurella osalla kierrosnopeuksista, mutta 3150 rpm nopeudessa amplitudi käy huomattavan korkeassa yli 10 mm/s arvossa.

Kuvassa 9 on saman puhaltimen ylösajon mittaus tasapainotuksen jälkeen. Mittausjärjestely mittapisteiden ja laitteiden osalta on pysynyt täsmälleen samanlaisena kuin ensimmäisessä ajossa. Kuvaajassa näkyy vieläkin resonanssin vaikutus hyvin lähellä nopeutta 3150 rpm, mutta amplitudi on selvästi alhaisempi kuin aiemmin, noin 2 mm/s.



Kuva 9. Puhaltimen ylösajon kuvaaja tasapainotuksen jälkeen.

Puhaltimen rakenteen ominaisuuksia ei voida muuttaa tasapainottamalla, mutta resonanssin aiheuttamaa korkeaa amplitudia sillä voidaan pienentää. Resonanssin värähtelyyn voidaan vaikuttaa myös kierrosnopeutta säätämällä, jos se on mahdollista, tai tekemällä rakenteesta tukevampi. [5, s. 302]

### 3.6.5 Laakerivaurio

Laakerien kestoikä on teoreettisesti ääretön, jos suunnittelussa, asennuksessa, voitelussa ja käytönaikaisessa puhtaudessa onnistutaan täydellisesti. Käytön aikana tärkeintä on huolehtia puhtaan öljykalvon säilymisestä vierintäelimien ja vierintäratojen välissä. Laakerien materiaali väsyä ylikuormituksen, linjausvirheen, epätasapainon ja mekaanisen väljyyden aiheuttamien ylimääräisten kuormittavien voimien takia. [9, s. 3]

Vierintälaakerin vikaantumisessa on tyypillisiä vaiheita, joiden aikana oireiden voimakkuus kasvaa, ja jatkuessaan vika johtaa laakerin sekä akselin vaurioitumiseen. Puutteellinen voitelu aiheuttaa metallikosketuksen, joka voidaan havaita korkeataajuisesta,

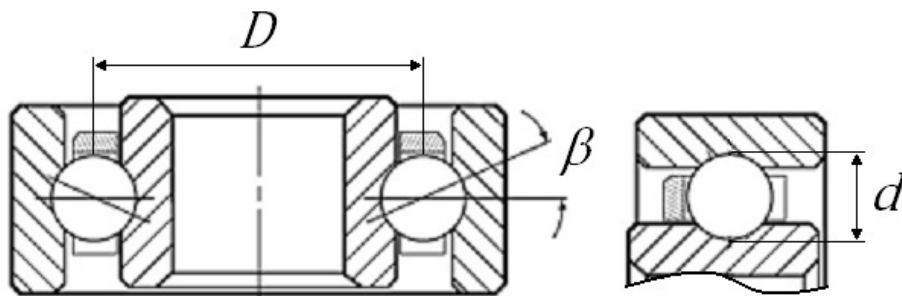


yli 2000 Hz värähtelystä. Vierintälaakerien eri osille on olemassa laskentakaavat, joiden avulla voidaan värähtelyn taajuustason kuvaajasta selvittää mahdollinen laakerin viikaantuminen ja sen vakavuus. Laakerin eliniän ennustaminen vaatii useampia mittauksia ja pidempiaikaista trendiseurantaa. Laakerien vikataajuudet voidaan laskea taulukossa 3 esitetyillä kaavoilla. [5, s. 312–313; 16, s. 15]

Taulukko 3. Vierintälaakerin osien vikataajuuksien laskentakaavat [5, s. 313; 16, s. 15].

Vaurion sijainti	Nimitys	Laskentakaava
ulkokehä	BDFO	$f_u = \frac{N}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) n$
sisäkehä	BDFI	$f_s = \frac{N}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right) n$
vierintäelin (rulla/kuula)	BSF	$f_r = \frac{D}{2d} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right) n$
pidike (kun sisäkehä pyörii nopeammin)	FTF	$f_p = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) n$
pidike (kun ulkokehä pyörii nopeammin)	FTF	$f_p = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right) n$

Taulukon 3 kaavoissa  $N$  on vierintäelinten lukumäärä,  $d$  on vierintäelimen halkaisija,  $D$  on vierintäelimien keskilinjasta mitattu laakerin halkaisija,  $\beta$  on kuormituskulma ja  $n$  on sisä- ja ulkokehän välinen suhteellinen pyörimisnopeus. Laakerien mitat saadaan laakerien valmistajilta. Laakerin rakennetta selvennetään kuvassa 10. Useissa kunnonvalvontaan kehitetyissä ohjelmistoissa hyödynnetään laakerinvalmistajien tarjoamia valmiita laakerikirjastoja, eikä käyttäjien tarvitse laskea laakerien vikataajuuksia itse. [5, s. 313]



Kuva 10. Kuulalaakerin leikkauskuva ja oleelliset mitat [21].

Kuvassa 10 kuulalaakerin vikataajuuksien laskemiseen tarvittavat mitat pätevät myös rullalaakereille. Liukulaakerien vikaantuminen havaitaan parhaiten lämpötilan pitkäaikaisella seurannalla tai pyörrevirta-antureilla seuraamalla akselin ratakäyrää, mutta myös kiihtyvyyss- tai nopeusanturilla laakeripesästä mitattava värähtely lisääntyy laakerin vian edetessä. [5, s. 316; 22, s. 1]

### 3.6.6 Mekaaninen väljyys

Väljyys koneen liitoksissa voi aiheuttaa monenlaisia ongelmia ja väljyyden tunnistaminen onkin usein hankalaa. Esimerkiksi kun laakerien ja akselin tai laakerien ja laakeripesän välissä on väljyyttä, oireet saattavat vaikuttaa tavalliselta epätasapainolta. Luonnollisesti tällaisessa tilanteessa koneen tasapainottaminen ei paranna lopputulosta. [23, s. 126—128]

Moottorin tai laakeripesän väljyys mahdollistaa niiden liikkumisen konetta käytettäessä, ja tämä usein nähdään linjauksen virheenä mittauksissa. Jos niin kutsuttu linjausvirhe vaihtaa asemaansa ajon aikana tai ajojen välissä, voidaan perustellusti epäillä puutteellista kiinnitystä jossakin koneen komponenteista. [23, s. 128]

Väljyyttä voi esiintyä myös siipipyörän ja akselin liitoksessa tai kytkimessä, hihnapyörässä sekä vaihteistossa. Tyypillistä väljyydelle ovat värähtelyn amplitudin ja vaihekulman vaihtelut. Mekaaninen väljyys myös pyrkii käytön aikana aina suurenemaan. Tämä saattaa johtaa kyseisten osien kiinnityksen irtoamiseen, joka nähdään värähtelyn äkillisenä kasvuna. [16, s. 12—13]

### 3.6.7 Muita värähtelyn aiheuttajia

Ulkopuoliset värähtelylähteet voivat vaikuttaa yksittäisen koneen värähtelyarvoihin ja saattavat olla haitallisia kokonaisuuden kannalta. Ympäristön aiheuttama värähtely ei välttämättä ole haitaksi yksittäiselle koneelle, mutta se saattaa hankaloittaa värähtelyn mittausta. Tietyn koneen itse aiheuttama värähtely voidaan selvittää mittausteknisesti. [24, s. 3]

Sähkömoottoreissa on monia tyypillisiä vikoja, joita on vaikea paikallistaa kokonaisen koneen, esimerkiksi puhaltimen kunnonvalvonnassa. Moottorin sisäinen epätasapaino, staattorien viat, kontaktiviat, roottorisauvojen viat ja ongelmat sähkönsyötössä sekä taajuusmuuttajissa voivat aiheuttaa ongelmia koneen vianmäärityksessä. Moottorin oma värähtely ja ottama teho voidaan mitata, kun selvitetään pyörivän koneen ongelmien alkuperää. [5, s. 326—343; 16, s. 28—32]

Prosessin aiheuttamat voimat saattavat aiheuttaa värähtelyä koneessa. Tällaisia voimia muodostavat esimerkiksi paineen muutokset prosessissa puhaltimen imu- tai painepuolella, läpivirtauksen kuristaminen, prosessissa kulkevan fluidin koostumuksen muutokset, sarjaan kytkettyjen puhaltimien vaikutukset toisiinsa ja putkistojen tai kanavien resonointi tietyillä taajuuksilla. [25, s. 85—86]

Koneen väärä kokoonpano, väljyydestä aiheutunut koneen osien liikkuminen tai koneen osien virheellisesti huomioitu ajon aikainen lämpeneminen saattavat aiheuttaa osien kiinniottoa tai hankausta tosiaan vasten. Koneen osien hankaamisen aiheuttaman värähtelyn komponentit voivat olla ajoittaisia tai jatkuvia. [5, s. 318; 16, s. 19]

### 3.7 Värähtelyn tason alentaminen

#### 3.7.1 Heräte ja vaste

Pyörivän koneen värähtelyn vähentäminen edellyttää joko rakennetta herättävien dynaamisten voimien tai niiden aiheuttaman rakenteen vasteen pienentämistä. Tietyn suuruinen herätevoima koneessa, esimerkiksi epätasapaino, aiheuttaa tietyllä kierrosnopeudella tietyn suuruisen vasteen. Funktiota voidaan kuvata kaavalla

$$Y(s) = X(s) * G(s) \quad (10)$$

jossa  $Y(s)$  on vaste,  $X(s)$  on heräte ja  $G(s)$  on siirtofunktio tai lohkokaaviollla (kuva 11), johon vasemmalta syötetään heräte joka kerrotaan siirtofunktiolla, ja oikealta ulostulosta saadaan mitattava vaste. [26, s. 8; 27]



Kuva 11. Vaste, siirtofunktio ja heräte [27].

Esimerkiksi epätasapaino voi aiheuttaa tietyllä pyörimisnopeudella herätteen, johon kone ominaisuuksineen reagoi vasteella, tässä tapauksessa värähtelyllä. Käytännössä tasapainotus suoritetaan kaikilla moderneilla laitteilla niin, että itse aiheutetun herätteen ja mitatun vasteen avulla selvitetään koneen siirtofunktio, jonka avulla voidaan kompensoida kappaleen todellinen epätasapaino.

### 3.7.2 Tasapainottaminen

Epätasapaino on yleisin värähtelyä aiheuttava tekijä pyörivissä koneissa, ja tämän takia tasapainotus on yksi yleisimpiä kunnonvalvonnan seurauksena suoritettavista toimenpiteistä. Epätasapaino voi johtua mistä tahansa syystä, joka aiheuttaa pyörivän kappaleen massakeskipisteen poikkeamisen pyörimiskeskisteestä. [5, s. 297]

Tasapainotus määritellään menetelmäksi, jolla pyritään parantamaan pyörivän massan tasapainoa, jotta sen laakereilleen aiheuttama voima olisi mahdollisimman pieni. Nykyisillä laitteilla päästään hyvin pieniin epätasapainon määriin, mutta liian tarkka tasapainotus eli laatuvaatimusten liioittelu on epätaloudellista. Tasapainotustarkkuusstandardi SFS 4968 antaa suosituksia pyörivien kappaleiden sallitun jäännösepätasapainon määrittämiseen. [5, s. 125; 17, s. 1]

Nykykaikaiseen tasapainotuslaitteistoon kuuluu tiedonkeräin, tietojen analysointiohjelma, nopeusanturi ja vähintään yksi värähtelyanturi. Monet eri valmistajat ovat tuoneet markkinoille omia laitteitaan, jotka soveltuvat joko pelkästään tasapainotukseen tai useampaan kunnonvalvonnan toimintoon teollisuudessa.

Käytännössä kaikki nykyaikaiset tasapainotuslaitteet toimivat samalla periaatteella. Ensin mitataan koneen värähtelyn amplitudi ja sen vaihekulma tietyllä kierrosnopeudella, eli suoritetaan referenssiajo. Tämän jälkeen koneen roottoriin kiinnitetään koemas-

sa, jonka vaikutus koneen värähtelyyn ja vaihekulmaan mitataan toisella ajolla. Näiden kahden ajon perusteella mittalaite laskee vaikutuskertoimen eli siirtofunktion ja ehdottaa koneeseen kiinnitettävää massaa, jolla korjataan koneen alkuperäinen epätasapaino. [8]

Tasapainotuksessa sekä referenssiajosta että koemassan kanssa tehdystä ajosta saadut arvot syötetään kaavoihin 11 ja 12

$$X_e * G_p = Y_e \quad (11)$$

$$X_e + X_k * G_p = Y_{e+k} \quad (12)$$

joissa  $X_e$  on todellinen epätasapaino,  $G_p$  on puhaltimen vaikutuskerroin,  $Y_e$  on referenssiajon mitattu värähtely,  $X_k$  on koemassan suuruus ja  $Y_{e+k}$  on toisen ajon mitattu värähtely. Koska epätasapainolla on sekä suuruus että astekulma, kaavassa käytetään kompleksilukuja. Näistä yhtälöistä muodostettu yhtälöpari voidaan ratkaista, koska tuntemattomia tekijöitä jää jäljellä vain kaksi,  $X_e$  ja  $G_p$ .

Teknisesti tasapainotus voidaan suorittaa monella eri tavalla, ja oikea menettely tulee valita puhtaasti tuotteen vaatimusten perusteella. Standardeissa annetaan lukuisia erilaisia ohjearvoja tasapainotuksen hyvyysluokille ja hyväksyttävälle jäännösepätasapainoille. Käytännössä massaltaan ja halkaisijaltaan suurempi sekä nopeudeltaan hitaampi kappale sallii enemmän epätasapainoa, ja kierrosnopeuden kasvaessa sekä fyysisten ominaisuuksien pienentyessä tarkkuusvaatimus kasvaa. [17, s. 4; 25, s. 85–86]

### 3.7.3 Akselien linjaaminen

Linjausvirhe on toiseksi yleisin värähtelyn aiheuttaja teollisuuden pyörivissä koneissa. Linjausvirheen yleisimmät syyt löytyvät asennusvirheistä tai lämmön aiheuttaman koneen osien liikkeen virheellisestä kompensoinnista. Linjauksen tarkkuutta koskevia suosituksia löytyy standardista PSK 8301. [5, s. 303]

Nykyisin koneen osien linjaukset tehdään laserlinjauslaitteiden avulla. Laitteita löytyy useiden eri toimittajien valikoimista, mutta niiden käyttö ja toimintaperiaate ovat hyvin samankaltaisia. Kahden akselin päähän, esimerkiksi kahteen vastakkaiseen kytkimen puolikkaaseen, kiinnitetään lähettävä laserlaite ja heijastava peili. Kun kappaleita pyöri-

tetään 360 astetta ympäri, saadaan laserin heijastuman avulla mitattua kappaleiden keskinäinen kulmavirhe ja yhdensuuntaisuusvirhe.

Yleensä toisen akselin pään laite, esimerkiksi laakeripesä, on kiinnitetty alustaansa ja vain toista, useimmiten sähkömoottoria, liikutellaan linjauksen aikana. Sähkömoottorin alle voidaan laittaa ohuita metallilevyjä linjauslaitteen opastamaan kohtaan. Linjaaminen täytyy suorittaa yleensä aina uudelleen, kun koneen osia irrotetaan alustasta tai koko konetta siirretään.

#### 3.7.4 Rakenteen tukeminen

Resonanssin aiheuttamia värähtelyitä voidaan yrittää pienentää koneen rakennetta tukemalla. Resonanssitaajuuudet eivät saisi sijaita käytettävien pyörimisnopeuksien tai niiden toisen monikertojen läheisyydessä, mutta tämän säännön toteuttaminen etukäteen laskemalla koneen suunnittelussa voi osoittautua haastavaksi, varsinkin silloin kun koneella on useita käyttöpyörimisnopeuksia. [20, s. 4]

Rakenteen jäykistäminen on toimenpide, jota ei kannata suorittaa ilman kokemusta aikaisemmista kohteista. Kun rakenteen tukeminen tehdään ilman perusteellista suunnittelua ja ilman että tunnetaan rakenteen dynaamisia ominaisuuksia kunnolla, voidaan värähtelyä kasvattaa, kun siirretäänkin ominaistaajuutta lähemmäksi pyörimistaajuutta. [28, s. 7]

## 4 Värähtelyn mittaaminen ja raja-arvot

### 4.1 Värähtelymittausten suunnittelu

Kunnonvalvonnan ja värähtelymittausten toteuttamisen suunnittelu aloitetaan jo laitetta hankittaessa. Investointia harkittaessa on otettava huomioon koneen valvonnan toteuttaminen, jotta hankitusta laitteesta voidaan huolehtia tehokkaasti sen koko elinkaaren ajan. Hankintavaiheessa määritetään myös raja-arvot toimituksen vastaanottamiselle, ja ne yleensä kirjataan hankintasopimuksen. Koneiden valmistajien tulee osoittaa, että laitteet kestävät sitä käyttöä, johon ne on suunniteltu ja hankittu, ja helpoiten tämä onnistuu, kun noudatetaan koneiden kunnonvalvontaa koskevien standardien suosituksia. Standardit ovat usein yleisluonteisia, eivätkä ne sovellu sellaisenaan kaikille teollisuuden laitteille. Tilaajan ja toimittajan tulee keskenään sopia käytettävät standardit tai muut raja-arvot, joita noudatetaan. [29, s. 2; 30, s. 2]

Investoinnin suunnitteluvaiheessa määritellään laitteiden kunnonvalvonnan tarve, karotetaan laitteet, joille värähtelynvalvonta on ylipäättänsä mahdollista toteuttaa, ja valitaan näistä ne laitteet, joiden valvonta on kokonaisuuden kannalta järkevää. Valituille laitteille olisi valvonnan luotettavuuden varmistamiseksi kannattavaa laatia mittaus-suunnitelma joka määrittää käytettävät menetelmät, raja-arvot, mittausvälit, käytännön järjestelyt sekä mittausten dokumentoinnin, raportoinnin ja seurannan. [30, s. 2—3]

### 4.2 Mittaukset ja suositusarvot

#### 4.2.1 Koeajomittaukset ja raja-arvot

Koneiden koeajossa tehtaalla ennen toimittamista kannattaa käyttää samoja raja-arvoja kuin tulevassa vastaanottotarkastuksessa. Monesti on kuitenkin mahdotonta luoda tehtaalle samanlaisia olosuhteita kuin asiakkaan tiloissa koneen lopullisella sijoituspaikalla, joten koeajotilanteen mittaustulokset eivät voi taata koneen todellista laatua. Useat laitteet valetaan kiinni alustastaan ja virtauskanavat kiinnitetään vasta kohteessa, ja luonnollisesti itse prosessi, jonka osaksi laite on hankittu, virtauksineen, paineineen ja värähtelyineen, vaikuttaa koneen ominaisuuksiin suuresti. Koneiden valmis-

tajien ja tilaajien täytyy tällöin luottaa kokemukseensa vastaavien laitteiden koeajotilanteista ja varsinaisista prosessiolosuhteista. Koneiden vastaanottotarkastukseen on olemassa lukuisia ohjeita ja suosituksia, esimerkiksi standardit PSK 5704, SFS 4968, SFS-ISO 2372 ja ISO 10816-3 käsittelevät sallittuja värinärasitus- ja jäännösepätaspainorajoja. Kuvassa 12 on taulukko koneiden värähtelyrajojen suositusarvoista. [24, s. 2—3; 29, s. 2]

DIN ISO 10816-3	Group 1		Group 2	
Machine type	Large machines 300 kW < P < 50 MW		Medium sized machines 15 kW < P < 300 kW	
	Motor H > 315 mm		Motor 160 mm < H < 315 mm	
Foundation	flexible	rigid	flexible	rigid
Velocity $v_{eff}$ mm/s rms  10–1000 Hz $r > 600$ rpm  2–1000 Hz $120 < r < 600$ rpm	11,0	D		
	7,1			
	4,5	C		
	3,5			
	2,8	B		
	2,3			
	1,4	A		
				©PRÜFTECHNIK AG
<div> <div>A</div> Newly commissioned machines <div>B</div> Unrestricted long term operation <div>C</div> Restricted long term operation <div>D</div> Vibration causing damage </div>				

Kuva 12. Värähtelyrajat vastaanottotarkastuksessa [31].

Kuvan 12 taulukossa koneet on jaoteltu tehon ja moottorin koon mukaan suuriin ja keskikokoisiin sekä kiinnityksensä mukaan joustaviin ja jäykkiin tyyppeihin. Kaikille koneityypeille on määritelty omat raja-arvot taulukossa, jonka yksikkönä käytetään värähtelyn nopeudentehollisarvoa ja jonka mukaan mittaukset tulee suorittaa pyörimisnopeudesta riippuen tietyllä taajuuskaistalla. Taajuusalue on tyypillisesti joko 2—1000 tai 10—1000 Hz. Taulukossa on neljä eri värein merkittyä käyttöaluetta, joista A on tarkoitettu käytettäväksi vastaanottotarkastuksissa, B on sallittu värinärasitusalue takuuajan jälkeen, C on hälytysalue, jonka yläraja voidaan käyttää alustavana vauriorajana, ja D on vaurioalue jolla, konetta ei tule käyttää hetkeäkään. [24, s. 5; 31]



Kuvassa 13 on toinen esimerkki käyttökelpoisista värähtelyrajoista koeajon ja vastaanottotarkastuksen yhteydessä. Kuvan taulukossa käytetään samoja kirjain- ja värikoodeja kuin kuvan 12 värähtelyrajoissa.

Tärinärasitus Vibration severity $V_{rms}$ (mm/s)	Koneryhmät 2 ja 4 Machine groups 2 and 4		Koneryhmät 1 ja 3 Machine groups 1 and 3	
	Jäykkä Rigid	Joustava Flexible	Jäykkä Rigid	Joustava Flexible
11				11,0 D
10				
9		D	D	C
8				
7		7,1	7,1	7,1
6				
5	D	C	C	B
4	4,5	4,5	4,5	
3	2,8 C	B	B	3,5
2	1,4 B	2,3	2,3	
1		A	A	A

Kuva 13. Värähtelyrajojen suosituksia [24, s. 5].

Kuvassa 13 olevat raja-arvot ovat käytössä standardin PSK 5701 mukaisella tärinärasituksella, eli luvut ovat värähtelynopeuden tehollisarvoja, kun mittauksissa käytetään taajuuksialuetta 10—1000 Hz.

#### 4.2.2 Vastaanottotarkastus ja käyttöönotto

Kun kone on asennettu varsinaiselle käyttöpaikalleen, suoritetaan koneen vastaanottamista varten värähtelymittaukset. Mittauksissa ja luonnollisesti jo investoinnin suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon ympäristöstä mahdollisesti johtuvat ulkoiset värähtelyt, joihin laitetoimittaja ei pysty vaikuttamaan. Mittaukset suoritetaan esimerkiksi standardin PSK 5702 suositusten mukaisesti, eli laakerointien kohdalta kolmeen toisiinsa nähden kohtisuoraan suuntaan. Tilaaja ja laitetoimittaja sopivat keskenään käytetyistä menetelmistä ja raja-arvoista, joita mittauksen tulokset eivät saa ylittää missään mittapisteessä. Mittapisteiden sijainnit tulee merkitä pysyvällä ja yksiselitteisellä tavalla,

jotta mittaukset voidaan toistaa luotettavasti tulevaisuudessa. [4, s. 24—25; 24, s. 3—4; 32, s. 2]

#### 4.2.3 Kunnonvalvonta ja vianmääritys

Kannettavilla mittalaitteilla mitattaessa käytetään usein niin kutsuttuja reittejä, joita pitkin mittaukset suoritetaan jokaisella kerralla samalla tavalla. Reitit suunnitellaan yleensä tietokoneella, ladataan mittalaitteeseen ja mittaukset suoritetaan kohteessa. Värähtelymittausten rutiininomainen suorittaminen ja tulosten dokumentointi eivät vaadi syvää asiantuntemusta, mutta toimenpide on suoritettava huolellisesti, etenkin anturien sijoittelun osalta. Mittaukset suoritetaan samoja sääntöjä noudattaen kuin koeajossa ja vastaanottotarkastuksessa. [4, s. 26; 24, s. 4]

## 5 Mittausjärjestelmät ja -laitteet

### 5.1 Mittaustarve

Teollisuuden koneiden kunnonvalvonnan tarve vaihtelee eri laitosten, tuotteiden, osastojen ja koneiden osalta suuresti. Jokaiselle yksittäiselle koneelle tulisi määritellä yksilöllinen kunnonvalvonnan tarve ja sen mukaiset menetelmät ja niiden toteutus. Kone voidaan myös tarkoituksella rajata kunnonvalvonnan ulkopuolelle esimerkiksi kustannusten alentamiseksi. Mittaustarve voidaan määrittää esimerkiksi koneen kriittisyyden, huollettavuuden, kunnossapitokustannusten, varaosien saatavuuden, luokse päästävyyden, ympäristö- ja käyttöolosuhteiden, häiriöherkkyyden, koneen rahallisen arvon tai konetta koskevien turvallisuusmääräysten pohjalta. [4, s. 26]

### 5.2 Mittausjärjestelmät

Mittaustoimintaa käsittelevä standardi PSK 5705 jaottelee mittausjärjestelmät kolmeen ryhmään, kiinteisiin ja puolikiinteisiin järjestelmiin sekä kannettaviin mittalaitteisiin. Käytettävä järjestelmä tulee valita mahdollisten vikojen ennustettavan kehittymisnopeuden ja kohteen kriittisyyden mukaan. Mittaustavat voidaan jaotella myös jatkuvaan ja määrävälein tapahtuvaan tiedon tallentamiseen. [4, s. 28; 30, s. 6]

Kiinteästi asennettua toteutusta tulee käyttää järjestelmissä, joiden vikaantumisnopeus ja häiriöherkkyys ovat suuria, kohteen mittausväli on hyvin lyhyt tai kohteen kuormitusvaihtelu on erityisen nopeaa ja vaikeuttaa vertailukelpoisten mittausarvojen saantia. Puolikiinteä järjestelmä soveltuu kohteisiin, jotka ovat vaikeasti tavoitettavissa. Anturit asennetaan kiinteästi ja anturien johdot vedetään paikkaan, josta mittaus voidaan suorittaa kannettavalla mittauslaitteella. Puolikiinteää järjestelmää käytetään myös silloin, kun halutaan varmistaa, ettei anturien uudelleen sijoittelu aiheuta virhettä mittauksiin. Kannettava mittalaite, jossa käytetään siirrettäviä antureita, sopii kohteisiin, joiden luokse on helppo päästä suorittamaan mittaukset ja joiden vikaantuminen on hidasta suhteessa tarvittavaan mittausväliin. [30, s. 6—7]

Monet kunnossapitoon keskittyneet valmistajat tarjoavat värähtelyn mittauslaitteita ja ohjelmistoja, joilla voidaan suorittaa pyörivien koneiden kunnonvalvonta sekä tulosten

analysointi. Standardissa PSK 5710 jaetaan värähtelymittalaitteet eri tyyppeihin sekä otetaan kantaa näiden soveltumiseen koneiden kunnonvalvontaan ja vikojen määrittämiseen. Mittalaitetta valittaessa tulee ottaa huomioon koneen kriittisyys prosessissa sekä koneen ennustettavat vikaantumismekanismit taloudellisten ja teknisten seikkojen ohella. [33, s. 1]

### 5.3 Mittalaitteet

#### 5.3.1 Mittalaitetyypit

Mittalaitteet voidaan jakaa erilaisiin ryhmiin monella eri tavalla joko ominaisuuksiensa tai käyttökohteidensa pohjalta. PSK 5710 jakaa värähtelyn mittalaitteet taulukossa 4 näkyviin tyyppeihin.

Taulukko 4. Mittalaitetyypit [33, s. 2]

<b>Tyyppi</b>	<b>Laite</b>	<b>Ominaisuudet</b>
tyyppi 1	kokonaistasoa mittaavat laitteet	värähtelyä kuvaa vain yksi tunnusluku
tyyppi 2	korkeataajuista (yli 5000 Hz) värähtelyä mittaavat laitteet	värähtelyä kuvaa korkeintaan kaksi tunnuslukua
tyyppi 3	mittalaitteet joissa on aseteltava taajuusalue	värähtely voidaan esittää sekä aika-että taajuustasossa
tyyppi 4	laitteet ja ohjelmat sisältävä kokonainen mittausjärjestelmä	suorittaa vianmäärityksen ja mahdollisesti tekee ennusteen koneen turvallisuudesta käyttöajasta

Toinen käytännöllinen tapa on jaotella laitteet ominaisuuksiensa mukaan, kuten taulukossa 5. Mittalaitteet voivat olla ominaisuuksiltaan taulukoissa 4 ja 5 mainittujen kaltaisia tai ne voivat sisältää ominaisuuksia useammasta eri tyypistä.

Taulukko 5. Kunnonvalvonnan mittalaitteiden ominaisuuksia [5, s. 263]

Laitetyyppi	Käyttö	Ominaisuudet
yksinkertaiset käsi-mittarit	hyvin helppokäyttöisiä	rajoittuneet ominaisuudet, yleiskäyttöön
kannettavat tiedonkeruulaitteet	helppo käyttää mittaukseen, ohjelmointi ja analysointi vaativat asiantuntemusta	riittää suurimpaan osaan normaalissa koneen kunnonvalvonnassa
monikanavaiset FFT-analysaattorit	vaativia käyttää, vaatii syvempää asiantuntemusta	vaihtelee laitteittain, mahdollisuuksia kehittyneisiin toimintoihin
kiinteät on-line-järjestelmät	helppo käyttää mittaukseen, ohjelmointi ja analysointi vaativat asiantuntemusta	ominaisuudet yleensä sovitettu kyseiselle kohteelle
PC-pohjaiset mittalaitteet	vaativia käyttää, vaatii syvempää asiantuntemusta	mahdollisuuksia kehittyneisiin toimintoihin, usein optioita ja moduuleja

Kun koneessa on havaittu vika, saattaa vian kehittymisen luotettava seuranta vaatia useamman erityyppisen värähtelymittalaitteen samanaikaista käyttöä tai muita kunnonvalvonnassa käytettyjä menetelmiä, kuten lämpötilan mittausta tai kulumishiukkas-analyysiä. [30, s. 3]

### 5.3.2 Yksinkertaiset käsimitarit ja kannettavat tiedonkeruulaitteet

Käsimittarit ovat yksinkertaisia käyttää eivätkä vaadi erityistä käyttökoulutusta. Mittauksia voidaan suorittaa vain muutaman käytännön asian hallinnalla. Peruslaitteissa värähtelyn suuruus ilmoitetaan yleensä vain yhdellä tunnusluvulla, joka tavallisimmin on värähtelyn nopeuden tehollisarvo  $v_{rms}$  tietyllä kiinteästi asetetulla taajuusalueella. Yksinkertaisella laitteella voidaan valvoa säännöllisin väliajoin koneen yleiskuntoa. [4, s. 63; 5, s. 259]

Tyypillisimpiä laitteita ovat kynänmalliset yksikanavaiset värähtelymittarit, joiden kärjessä oleva koetinpuikko painetaan kiinni mitattavaan kohteeseen. Mittausten toistettavuus ja luotettavuus ovat heikkoja ja mittatulosten tallennus- ja käsittelymahdollisuudet puuttuvat. Tämänkaltaiset mittarit ovat edullisia ja pienikokoisia kantaa mukana esimerkiksi rutiinikierröksellä prosessilaitoksessa. [5, s. 259]

Kehittyneemmät kannettavat mittalaitteet voivat sisältää myös vianmäärittelyn mahdollistavia ominaisuuksia. Ominaisuuksien käyttö voi tapahtua suoraan laitteen näytöllä tai tietokoneella, jonne usein samalla luodaan mittaustulosten tietokantarakenne. Paikan päällä tehtävää analysointia voivat vaikeuttaa laitteen näytön tarkkuus ja pieni koko sekä prosessilaitoksen epäsuotuisat olosuhteet, kuten likaisuus, meluisuus tai lämpötila. Laitteita voidaan käyttää joko itsenäisesti, tai mittausreitit ja muut toiminnot voidaan ladata laitteen muistiin tietokoneelta ennen kohteen mittauksia. Laitteissa on yleensä riittävästi muistikapasiteettia useamman koneen kunnonvalvonnan suorittamiseen ja tulosten tallentamiseen sekä mahdollisesti myös muita hyödyllisiä ominaisuuksia värähtelyn mittaamisen lisäksi, kuten tasapainotus-, ylös- ja alasajo- sekä iskukoe-työkaluja. [4, s. 95—97; 5, s. 260; 34]

### 5.3.3 Monikanavaiset analysaattorit ja PC-pohjaiset sovellukset

Vaativammissa kohteissa on usein tarpeen suorittaa monikanavaisia värähtelymittauksia. Kehittyneempien laitteiden ja ohjelmien käyttö vaatii perehtymistä itse laitteeseen ja aiheeseen liittyvään teoriaan, muuten mittausten suorittaminen ja tulosten analysointi voivat johtaa väärin tuloksiin. PC-pohjaiset toteutukset ovat usein hyvin joustavia, monipuolisia ja päivitettävyydeltään erinomaisia. Anturit liitetään joko ulkoiseen I/O-yksikköön tai suoraan PC:n kortteihin ja portteihin. Kiinteä ja monikanavainen PC-pohjainen järjestelmä säästää huomattavasti mittauksen suorittamiseen kulunutta aikaa, ja tulosten helppo tallennettavuus, erittely ja tarkastelu tekevät kunnonvalvonnasta tehokasta. [4, s. 94—95; 5, s. 261]

### 5.3.4 Kiinteästi asennettavat toteutukset ja suojausjärjestelmät

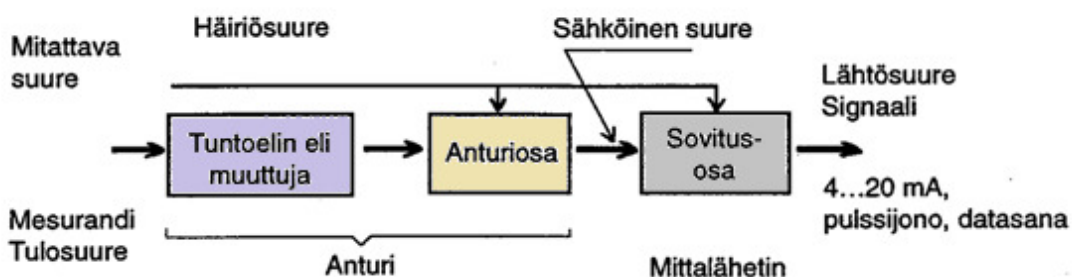
Kohteissa, joiden kriittisyys on arvioitu korkeaksi tai mittaustiheys on jostakin muusta syystä määritetty suureksi, käytetään kiinteästi asennettuja kunnonvalvontalaitteita. Valvontajärjestelmä suorittaa ennalta asetellun mittausjakson mukaiset mittaukset ja toimii näiden pohjalta esimerkiksi tallentaen mittausarvon tai lähettämällä hälytyksen järjestelmään. Erittäin kriittisissä kohteissa voi olla tarpeen käyttää reaaliaikaista mittauksia suorittavaa suojausjärjestelmää, joka tiettyjen raja-arvojen ylittyessä joko pysäyttää laitteen tai muuten ohjaa prosessin vaaraa aiheuttamattomaan tilaan. [5, s. 261—262; 30, s. 7]

Suojausjärjestelmiltä vaadittuja ominaisuuksia ovat nopea reagointi vakaviin vikatilanteisiin, jatkuva mittaus ja valmius toimia itsenäisesti, luotettavuus, hälytysten liitettävyyys prosessinohjausjärjestelmään sekä riippumattomuus sähköverkon häiriöistä ja prosessilaitoksen CPU:sta, PC:stä ja muista tietoverkoista. Yleinen vaatimus on myös järjestelmän aito monikanavaisuus eli kaikkien tulokanavien yhtäaikainen signaalien mittaaminen. Tällöin voidaan varmistua järjestelmän riittävästä reagointinopeudesta. Suojausjärjestelmä voidaan pienissä toteutuksissa koota erillisistä komponenteista, integroida hallitusti prosessin järjestelmään tai hajauttaa mittayksiköt kentälle lähelle valvottavia kohteita, esimerkiksi kenttäväylän avulla. Tyypillisiä kohteita joissa suojausjärjestelmää käytetään, ovat höyry- ja kaasuturbiinit, generaattorit, kompressorit, savukaasu- ja kantoilmapuhaltimet, syöttövesipumput sekä jauhimet. Kriittisinä kohteina voidaan pitää koneita, joiden mahdollinen vaurio aiheuttaa vaaraa ihmisille ja ympäristölle, merkittävän tuotannonmenetyksen tai suuria korjauskustannuksia. [4, s. 474; 35, s. 4—7]

## 6 Anturit

### 6.1 Anturit yleisesti

Anturit keräävät tietoa mitattavasta kohteesta. Anturilla tarkoitetaan tavallisesti laitetta, joka muuntaa mitattavana suureen arvon siihen verrannolliseksi, yleensä sähköiseksi viestiksi. Anturin tuntoelin määrittää suureen arvon, minkä jälkeen anturiosa muuttaa tuloksen halutuksi viestiksi. Anturin antama suure muunnetaan lähettimessä standardi-viestiksi, joka yleensä on 4...20 milliampeeria. Useimmiten anturi ja lähetin on rakennettu kiinteästi yhteen, ja ne kuuluvatkin yhdessä tavanomaisen anturikäsitteen tulkinnan alle. Viesti muunnetaan digitaaliseen muotoon A/D-muuntimessa. Esimerkki perinteisestä anturin rakenteesta on kuvassa 14. [36, s. 187]



Kuva 14. Esimerkki anturin lohkokaaviosta [37, s. 1].

Teollisuudessa mitataan lukuisia eri suureita, esimerkiksi lämpötilaa, painetta, virtausta, kiihtyvyyttä tai voimaa, laajalla valikoimalla eri valmistajien erilaisia antureita. Pyörivien koneiden kunnonvalvonnassa oleellisia tietoja ovat värähtelyn kokonaistaso, laakereiden lämpötilat ja virtaus kiertovoitelujärjestelmässä.

### 6.2 Värähtelyanturin valinta

Kunnonvalvonnassa värähtelyä mitataan yleensä sähköisillä antureilla kolmen eri suureen avulla. Koneisiin voidaan kiinnittää joko siirtymää, nopeutta tai kiihtyvyyttä mittaavia antureita. Kaikilla eri anturityypeillä on omat etunsa ja haittansa. Oikean anturityypin ja kiinnitystavan valinta on tärkeää, sillä epätarkoista mittaustuloksista voi aiheutua suurta haittaa. Anturien asennuspaikat valitaan esimerkiksi standardin PSK 5702 ja anturien kiinnitystavat standardin PSK 5703 ohjeiden mukaisesti. Siirrettäville



antureille voidaan käyttää kaikkia mainittuja kiinnitystapoja, mutta kiinteiden anturien asennuksessa käytetään aina ruuvikiinnitystä. [11, s. 47; 38, s. 4]

Anturityyppiä valittaessa kannattaa miettiä, missä yksikössä tulokset halutaan esitettäviksi. Nopeus, kiihtyvyys ja siirtymä voidaan matemaattisesti integroida ja derivoida toisistaan, mutta tarkin tulos saadaan silloin, kun mitataan suoraan haluttua suuretta. [11, s.48]

Anturityypin, kiinnitystavan ja paikan valintaan vaikuttavat erityisesti pyörivän koneen nopeus ja laakerointi [4, s. 50]. Koneen rakenne saattaa asettaa myös rajoituksia anturin valinnan suhteen, jos halutussa mittapisteessä on vain vähän tilaa. Kustannukset saattavat nousta vaikuttavaksi tekijäksi varsinkin silloin, kun antureita tarvitaan useita. Anturin valinnassa on tärkeää ottaa huomioon eri vikatyypit ja värähtelyn taajuusalue. Anturin herkkyyden on oltava mitattavan värähtelytason mukainen ja lineaarinen koko taajuusalueella. Vierintälaakereiden kunnonvalvonnassa käytetään yleisimmin kiihtyvyyssantureita ja mittaussuure muutetaan nopeudeksi. [38, s. 1–2]

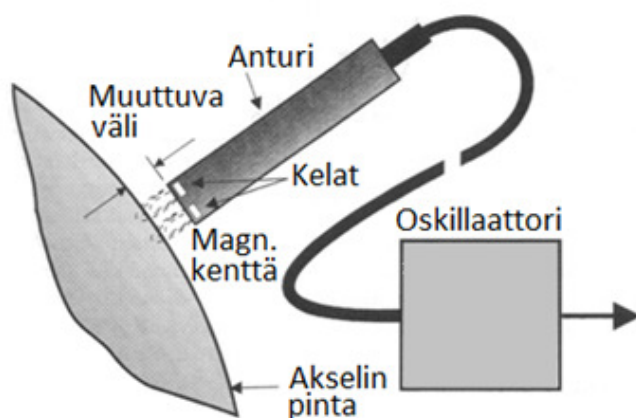
Anturin valintaan vaikuttavat luonnollisesti myös mittalaitteen ominaisuudet. Mittalaitte voi olla suunniteltu tietyn tyyppiselle suurelle tai liitännälle tai se voi olla konfiguroitu käytettäväksi vain saman valmistajan antureiden kanssa. Toiset anturit saavat käyttöjännitteensä mittalaitteen kautta, kun taas toiset eivät tarvitse ollenkaan ulkoista tehoa.

### 6.3 Värähtelymittauksen anturityypit

#### 6.3.1 Siirtymäanturi

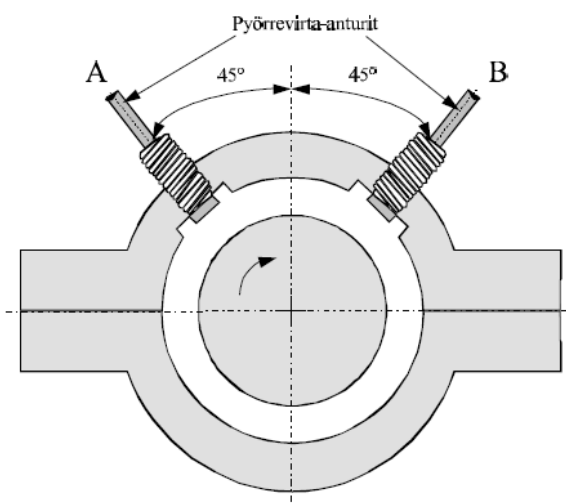
Yleisin siirtymää mittaava anturi kunnonvalvonnassa on pyörrevirta-anturi, jota käytetään erityisesti liukulaakereilla toteutetuissa kohteissa. Siirtymää mittaavat anturit havainnoivat kohteen etäisyyttä suhteessa anturin sijaintiin. Toiminta perustuu anturin kelan muodostamaan magneettikenttään, joka indusoi pyörrevirtoja ferromagneettisen kohteensa pintaan. Pyörrevirrat muuttuvat, kun anturin ja kohteen välimatka muuttuu, ja tämä aiheuttaa siirtymään verrannollisen muutoksen anturin kelan jännitteessä. Ku-

vassa 15 on tyypillisen akselin siirtymää mittaavan pyörrevirta-anturin esimerkki. [4, s. 49; 5, s. 235]



Kuva 15. Pyörrevirta-anturin toiminta ja rakenne. [5, s. 235].

Pyörrevirta-anturien taajuusalue on rajoittunut verrattuna muihin anturityyppeihin. Anturi tarvitsee toimintaansa oskillaattori demodulaattorin eli eräänlaisen esivahvistimen, joka voi olla sijoitettuna anturin kotelon sisään. Anturi ja esivahvistin on tavallisesti kalibroitu tietylle kaapelipituudelle, ja muutoksia tehtäessä on järjestelmä kalibroitava uudelleen, ei kuitenkaan silloin kun komponentteja korvataan samantyyppisillä. Usein antureita kiinnitetään kaksi kappaletta 90 asteen kulmaan toisistaan, jolloin voidaan mitata kohteen liikettä kaikkiin suuntiin ja tulokset esitetään usein akselin ratakäyränä (kuva 16). [5, s. 235]



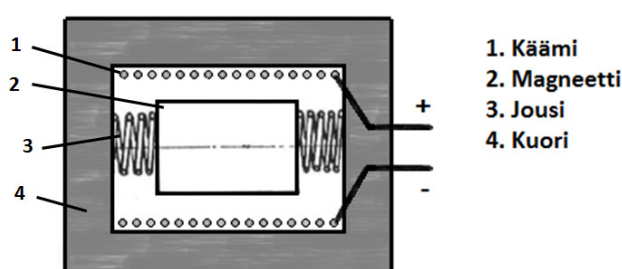
Kuva 16. Pyörrevirta-anturien sijoittelu. [14, s. 8].

Siirtymäanturin haasteena on sen kiinnitys, koska anturi mittaa suhteellista etäisyyttä kohteesta. Jos mittauspinta ja kiinnityskohta värähtelevät lähes samassa vaiheessa, saadaan liian pieniä mittaustuloksia. Jos kiinnityspinta ja mitattava kohde värähtelevät vastakkaisessa vaiheessa, ovat tulokset liian suuria. Siirtymäantureiden käyttöä vaikeuttaa myös niiden vaatima kalibrointi ennen käyttöönottoa. [4, s. 49; 6, s. 12]

Pyörrevirta-antureita käytetään liukulaakerien kunnonvalvonnassa, koska liukulaakereissa akseli ei kosketa laakerin pidikettä pyöriessään ohuen öljykalvon pinnalla. Ilman mekaanisia kosketuksia ei synny jaksollisia metallikosketuksiakaan, joita voitaisiin mitata kiihtyvyyss- tai nopeusantureilla. Kun pyörrevirta-anturi on kiinnitetty laakeripesään eikä esimerkiksi koneen alustaan, saadaan mitattua akselin ja laakeripukin suhteellinen etäisyys. Laakeripukin värähtelyä voidaan mitata erikseen kiihtyvyyssanturilla. Tulos muunnetaan siirtymäksi ja lasketaan yhteen akselin ja laakeripesän suhteellisen liikkeen kanssa. Näin saadaan selville haluttu arvo eli akselin absoluuttinen liike. [39, s. 3]

### 6.3.2 Nopeusanturi

Nopeusanturien toiminta perustuu yleensä kuoren sisällä olevaan käämiin ja sen sisällä jousilla kiinnitetyn magneettisen massan liikkeeseen värähtelyn voimasta. Magneettinen massa aiheuttaa käämiin anturin nopeuteen verrannollisen jännitteen, jota mitataan. Kuvassa 17 on esimerkki seismisestä nopeusanturista. [4, s. 47–48].



Kuva 17. Nopeusanturin rakenne [4, s. 47].

Nopeusanturit ovat usein suurempia kooltaan kuin kiihtyvyyssanturit. Ne ovat myös häiriöalttiimpia sekä sähkömagneettisille kentille että lämpötilan vaihteluille. Nopeusanturit ovat rakenteestaan johtuen monesti optimoitu joko vaaka- tai pystysuuntaisiin mittauksiin, jolloin suunta ilmoitetaan valmistajan toimesta. Kattaviin mittauksiin kaikista halutuista suunnista nopeusanturilla tarvitaan tällöin kaksi erillistä anturia. [4, s. 48].

Nopeusanturien mittausalue on parhaimmillaan noin 5—2000 Hz. Nopeusantureiden hyviä puolia ovat hyvä signaali-häiriösuhde ja se, ettei ulkopuolista virtaa tarvita toimintaan. Eduksi voidaan lukea myös se, että ne mittaavat suoraan nopeutta eikä signaalia yleensä tarvitse integroida eikä derivoida. Ne eivät ole myöskään kovin herkkiä ulkoisille iskuille verrattuna kiihtyvyyssantureihin. Nopeusantureita ei tutkita eikä kehitetä enää aktiivisesti, ja usein kunnonvalvonnassa päädytäänkin valitsemaan kiihtyvyyssanturi nopeusanturin sijaan. [4, s. 48; 11, s. 51—52]

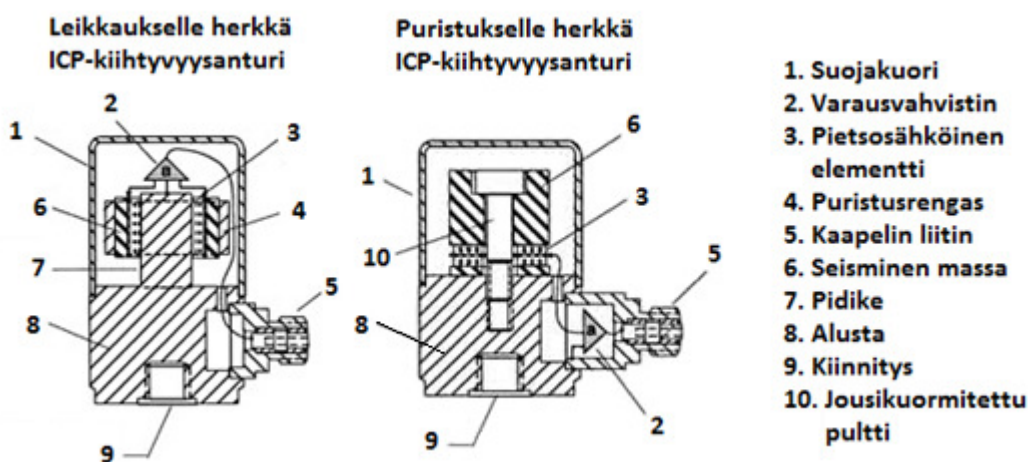
### 6.3.3 Kiihtyvyyssanturi

Tänä päivänä koneiden värähtelyä mitataan useimmiten pietsosähköisten kiihtyvyyssanturien avulla. Pietsosähköiset anturit ovat suosittuja erityisesti pienen koon, laajan taajuusalueen ja helpon asennettavuuden ansiosta. Nämä anturit eivät myöskään ole kovin herkkiä ympäristöolosuhteille. [5, s. 238]

Kuvassa 18 on esitelty tyypillisten pietsosähköisten kiihtyvyyssanturien tärkeimmät rakenneosat. Teollisuusoloja kestävä kuoren sisällä on seisminen massa, johon kohdistuu värähtelyn ansiosta Newtonin toisen lain mukainen kiihtyvyyteen verrannollinen voima. Newtonin toinen laki on

$$F = ma \quad (13)$$

jossa  $F$  on voima,  $m$  on massa ja  $a$  kiihtyvyys. Pietsoelementtiin muodostuu varaus, joka on verrannollinen voimaan. Varauksen johdetaan joko suoraan tai varausvahvistimen kautta anturin ulostuloon sähköisenä suureena. [5, s. 238]



Kuva 18. ICP-kiihtyvyyssanturien rakenne [40].

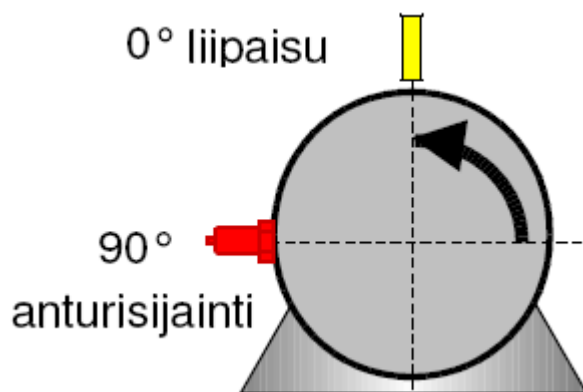
Kiihtyvyyssantureiden mittausalue on tyypillisesti noin 2 – 14000 Hz, mutta tähän vaikuttaa huomattavasti anturin ominaisuudet, kiinnitystapa ja kiinnitysalusta. Magneettikiinnityksellä voidaan päästä tasaisella pinnalla 4000 Hz:iin ja ruuvikiinnityksellä jopa 20000 Hz:iin saakka. [4, s. 46]

Pietsosähköisten kiihtyvyyssantureiden etuina voidaan pitää niiden pientä kokoa ja keveyttä nopeusantureihin verrattuna. Ne ovat suhteellisen edullisia ja laajan taajuusalueensa ansiosta sopivat moniin kohteisiin. Kiihtyvyyssantureita myös tutkitaan ja kehitetään vielä eteenpäin. [4, s. 46–47; 11, s. 54–55]

Haittoina ajatellaan niiden herkkää rakennetta, joka altistaa ne rikkoutumiselle, alhaista signaali-häiriö-suhdetta ja pitkää asettumisaikaa (1–600 s) ennen mittauksen aloittamista. Kiihtyvyyssanturin suure täytyy usein myös integroida yleisimmin käytetyksi suureksi eli nopeudeksi. Integrointi suoritetaan joko mittalaitteessa tai suoraan anturiin rakennetussa elektroniikassa. Integrointi korostaa matalia taajuuksia. [4, s. 47–48; 11, s. 55–56]

#### 6.4 Pyörimisnopeus ja vaihekulma

Useimmat värähtelyn analysointi- ja tasapainotuslaitteet mittaavat myös koneen pyörimisnopeutta. Kuvassa 19 on akselin kehälle piirretty sekä tärinä- että liipaisuanturi. Näin voidaan verrata todellista pyörimisnopeutta värähtelysignaaliin ja määrittää värähtelyn vaihekulman. Moniin laitteisiin nopeus voidaan syöttää myös käsin, mutta tasapainotuksessa tarvitaan niin kutsuttua liipaisusignaalia eli tarkkaa tietoa siitä, missä vaiheessa koneen akseli on pyörähtänyt täyden kierroksen. Yleisimmät anturit pyörimisnopeuden eli yhden kerran kierroksen aikana tapahtuvan liipaisun mittaamiseen ovat optinen ja magneettinen takometri. [11, s. 99–100; 23, s. 84]



Kuva 19. Esimerkki liipaisu- ja värinäanturien sijoittelusta [8, s. 21].

Takometrin liipaisusignaalia ja koneen värähtelysignaalia vertaamalla voidaan määrittää, missä asteluvussa yhden pyörähdyksen aikana on värähtelyn huippukohta. Vaihekulma antaa tiedon mittauspisteen pyörimistäajuisen värähtelyn tai sen monikerran huipun sijainnista pyörivässä akselissa olevaan liipaisumerkkiin verrattuna. [4, s. 73]

#### 6.5 Pyörimisnopeuden anturityypit

Optista anturia varten pyörivään koneeseen kiinnitetään heijastava teippi. Anturi lähettää lasersäteen, vastaanottaa sen ja muuttaa sen viestiksi anturin ulostulossa. Teippi ja anturi ovat helppoja asentaa, mutta heijastus riippuu pyörivän kohteen pinnasta. Heijastinteippi voi likaantua ja anturi saattaa lukea väärän heijastuksen kohteesta, jos se on kiiltävää metallia. [8, s. 26]

Induktiivinen anturi muodostaa jatkuvan magneettikentän kohteeseen ja tunnistaa tämän kentän muutokset. Kohteeseen tarvitaan metallinen kolo tai uloke anturia varten, mutta usein pyörivässä koneessa on valmiita kohtia joita voidaan käyttää hyödyksi, esimerkiksi kytkimen kiila tai pidätinruuvi. Induktiivinen anturi ei toimi luotettavana liipaisuna hitailla pyörimisnopeuksilla. [8, s. 27]

## 6.6 Anturien ominaisuudet

### 6.6.1 Herkkyys ja erotustarkkuus

Anturin herkkyydellä tarkoitetaan sen lähtösuureen suhdetta tulosuureeseen eli näytämän suhdetta mittaussuureeseen. Herkkyiden on oltava sopiva vallitsevan värähtelytason suhteen, ja herkkyiden tulee olla lineaarinen koko mittausalueella [10, s. 3; 38, s. 2].

Anturin valmistajan ilmoittama nimellisherkkyys pätee anturin akselin suuntaiselle värähtelylle. Esimerkiksi jos anturin nimellisherkkydeksi ilmoitetaan 100 mV/g, se tarkoittaa yhden g:n kiihtyvyyden muutoksen vaikutusta anturin lähdössä 100 mV:n muutoksena. Joskus valmistajat ilmoittavat herkkyiden myös poikittaiselle värähtelylle. Poikittainen värähtely saattaa vaikuttaa tuloksiin värähtelyn osuessa anturin poikittaisresonanssialueelle. [5, s. 240]

Erotustarkkuus tarkoittaa anturin pienintä askelmuutosta. Anturin erotuskyky eli resoluutio tarkoittaa pienintä mittauslaitteella erottuvaa mittaussuureen muutosta. Erotuskynnykseksi kutsutaan pienintä mittausarvon muutosta, joka saa aikaan muutoksen lähtöviestissä. [10, s. 3; 41, s. 1]

### 6.6.2 Taajuusalue, amplitudialue ja signaali-kohinasuhde

Anturin taajuusalueella eli dynaamisella mittausalueella tarkoitetaan pienimmän ja suurimman taajuuden väliä, jolla anturin toiminta on lineaarista. Siirtymäanturilla taajuusalue on parhaimmillaan 0 – 1000 Hz, nopeusanturilla 5 – 2000 Hz ja kiihtyvyydellanturilla 2 – 14000 Hz. Taajuusaluetta rajoittavat anturien yksilölliset ominaisuudet sekä ulkoiset tekijät kuten kiinnitystapa ja lämpötila. Anturien lineaarinen taajuusalue ilmoitetaan valmistajien toimesta. [4, s. 46 – 48; 11, s. 49 – 55]

Amplitudialue eli mittausalue on anturin pienimmän ja suurimman mitattavan amplitudin välinen alue. Amplitudialue ilmoitetaan anturien toimittajien ohjeistuksissa. Anturin nimellisen mittausalueen ylärajan tulee olla vähintään yhtä suuri kuin mitattavan kohteen suurin arvo [41, s. 1].

Signaali-kohinasuhde tarkoittaa kohinattoman signaalin tehon suhdetta kohinatehoon. Signaali-kohinasuhde kertoo käytännössä, kuinka paljon kohina vääristää varsinaista mittasignaalia. [42, s. 24]

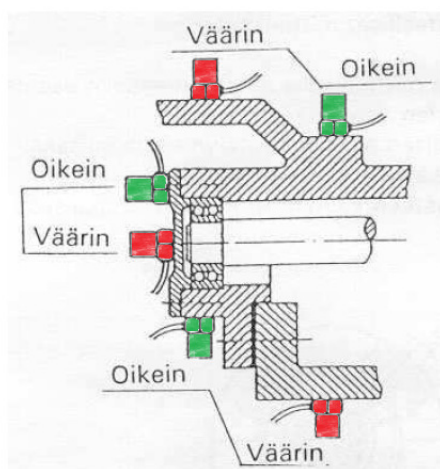
### 6.6.3 Värähtelyanturien kalibrointi

Anturien mukana toimitetaan yleensä valmistajan kalibrointitodistus. Anturien kalibrointi käyttöönoton jälkeen riippuu mittausjärjestelmälle määritellystä kalibrointisuunnitelmasta, johon vaikuttavat mittalaitteen tyyppi, valvottava kohde, tarkkuusvaatimukset, mittalaitteiden toimittajan suositukset sekä järjestelmän häiriöalttius. [43, s. 1].

## 6.7 Mittapistet

### 6.7.1 Mittapisteiden valinta

Anturien kiinnityspaikat valitaan siten, että värähtelylähde ja mittaukseen käytettävä anturi ovat mahdollisimman lähellä toisiaan ja niiden välissä on mahdollisimman vähän fyysisiä rajapintoja (kuva 20). Pyörivissä koneissa värähtely siirtyy laakerien kautta runkoon, joten mittauspisteet valitaan laakerointien kohdalta. Kohteen rakenteellisten ominaisuuksien takia antureita ei aina päästä kiinnittämään optimaalisiin mittapisteisiin, jolloin anturille joudutaan valitsemaan paras mahdollinen kiinnityskohta, tai kyseinen mittaus jätetään kokonaan suorittamatta. [4, s. 53; 32, s. 1–2]



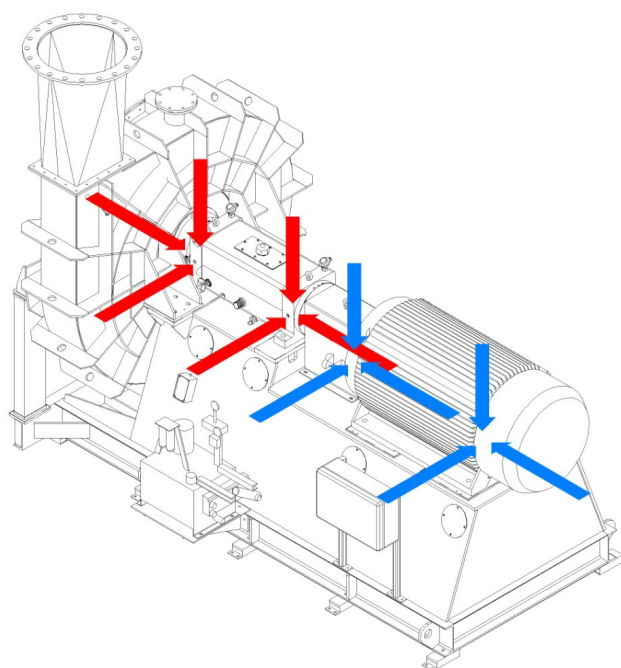
Kuva 20. Esimerkkejä mittauspisteen valinnasta [32, s. 2].



Mittauspisteiden minimäärä on yksi jokaisen laakerin kohdalta, mutta kattavan kunnonvalvonnan kannalta olisi pyrittävä suorittamaan mittaukset kolmesta keskenään kohtisuorasta suunnasta. Tyypillisestä puhaltimesta löytyy neljä laakeria, kaksi laakeripesästä ja moottorista, eli mittapisteitä on kaksitoista. [4, s. 53]

#### 6.7.2 Laakeripesän ja moottorin mittapisteet

Laakeripesässä on kolme mittapistettä molempia laakereita kohden. Anturit asetetaan vaaka-, pysty- ja aksiaalisuuntaan pesän laakerien kodalle (kuva 21). Anturit pyritään saamaan laakerin keskilinjaan ja samoihin kohtiin kaikissa mittauksissa, mutta tämä ei ole aina mahdollista laakeripesän rakenteesta johtuen. Usein aksiaalisuuntainen anturi asetetaan laakeripesän jalkaan.



Kuva 21. Laakeripesän (punainen) ja moottorin (sininen) mittapisteet laakerien kohdalla puhaltimessa.

Moottorissa on myös kolme mittapistettä molempia laakereita kohden. Anturit asetetaan vaaka-, pysty- ja aksiaalisuuntaan moottorin laakerien kodalle (kuva 21). Anturit pyritään saamaan laakerin keskilinjaan myös moottorissa, mutta usein anturit joudutaan asettamaan moottorin jalustaan.

## 6.8 Kiinnitystavat

Käsikoetin on usein kiinni suoraan mittalaitteessa. Se on nopea ja kätevä käyttää mittauksissa, mutta sen toistettavuus on huono ja lukemavirheet tavallisia. Käsikoettimen käytössä on alhainen ylin mittaustaajuus, vain noin 500 Hz [4, s. 59; 9, s. 6].

Magneettikiinnitys mahdollistaa korkeampien taajuuksien mittaamisen kuin käsikoetin mutta vaatii myös huolellisuutta asettelussa. Magneettikiinnitys on yleisin kunnonvalvonnassa käytetty menetelmä. Pinnan epätasaisuus, epäpuhtaudet ja ei-magneettisen materiaalit vaikeuttavat magneettien käyttöä. Magneettia asetettaessa tulee myös huomioida mahdollinen anturin iskeytyminen mittapisteeseen ja asettumisaika. [4, s. 59; 9, s. 7]

Useat eri laitevalmistajat tarjoavat anturien kiinnityselimiin sopivia kiinnitysnippoja. Anturin asettaminen pikaliitännällä on nopeaa, ja menetelmä tarjoaa luotettavamman ja tarkemman mittauksen kuin käsikoetin. [4, s. 58]

Paras luotettavuus ja taajuusvaste saavutetaan, kun anturi asennetaan joko sen omalla tai erillisellä kierreruuvilla. Kierre on ensisijainen menetelmä kiinteässä asennuksessa, ja tätä varten kohteessa on tarpeen koneistaa tasainen, anturia hieman suurempi pinta, jonka keskellä on standardin PSK 5703 mukainen kierrereikä. [4, s. 57; 9, s. 8]

## **7 Valvontamenetelmät ja vianmääritys**

### **7.1 Valvontamenetelmät**

#### **7.1.1 Yleistä valvontamenetelmistä**

Yleisimpiä menetelmiä koneiden värähtelynvalvonnassa ovat kokonaistasovalvonta, trendiseuranta ja spektrianalyysiin perustuva valvonta. Valvontamenetelmän ja valvotavan suureen valintaan vaikuttavat koneen rakenne, odotettavissa olevat vikatyypit ja käytettävissä olevat mittaustekniikat. Kunnonvalvontajärjestelmä voi valvoa tunnuslukuja ja toimia ennalta määritettyjen raja-arvojen ylityttyä, mutta hyvin tärkeä osa-alue kunnonvalvonnassa ovat myös kannettavilla mittalaitteilla suoritettavat mittaukset ja niistä saatujen tulosten ja kuvaajien tulkinta [4, s. 94; 5, s. 282; 44, s. 1]

Tärinää valvotaan useimmiten nopeutena, koska se kattaa luotettavasti suurimman osan yleisimmin tarvittavasta taajuusalueesta. Siirtymä soveltuu valvottavaksi suureeksi matalilla, alle 10 Hz, taajuuksilla ja kiihtyvyys korkeilla taajuuksilla, kun ylärajataajuus on yli 1000 Hz. Liukulaakerisovellusten akselivärähtelyä ja akselin liikettä laakeripesän sisällä valvotaan siirtymänä. [44, s. 1]

#### **7.1.2 Tunnuslukuvalvonta**

Värähtelyn vakavuuden arvioiminen mittasignaalista laskettavien tunnuslukujen kautta on ollut pitkään värähtelyvalvonnan perustyökaluja. Seurattavaksi voidaan valita yksi tai useampia tunnuslukuja, joista yleisimpiä ovat pyörimistaajuuden ja sen monikertojen värähtelyn voimakkuus ja vaihekulma, vierintälaakerin vikataajuuksien ja niiden monikertojen värähtelyn voimakkuus, lapataajuuden ja sen monikertojen värähtelyn voimakkuus ja harmonisten, ei-harmonisten sekä aliharmonisten värähtelykomponenttien tehollisarvo. [4, s. 80; 44, s. 2]

Tunnuslukujen kehittymistä seuraavaa kunnonvalvonnan menetelmää kutsutaan trendiseurannaksi. Trendiseurannassa on erityisen tärkeää suorittaa mittaukset säännöllisesti ja toistaa ne aina samalla tavalla, jolloin mittausten perusteella voidaan luotettavasti seurata koneen kunnon kehittymistä. [5, s. 282]

### 7.1.3 Kokonaistason valvonta

Kokonaistason valvonta on yksinkertaisin valvontamenetelmä, mutta siinä jää havaitsematta useita, tarkempaa analyysia vaativia vikoja. Kokonaistason valvontaa ei yleensä käytetä ainoana valvontamenetelmänä, vaan sitä täydennetään muilla menetelmillä. [44, s. 2]

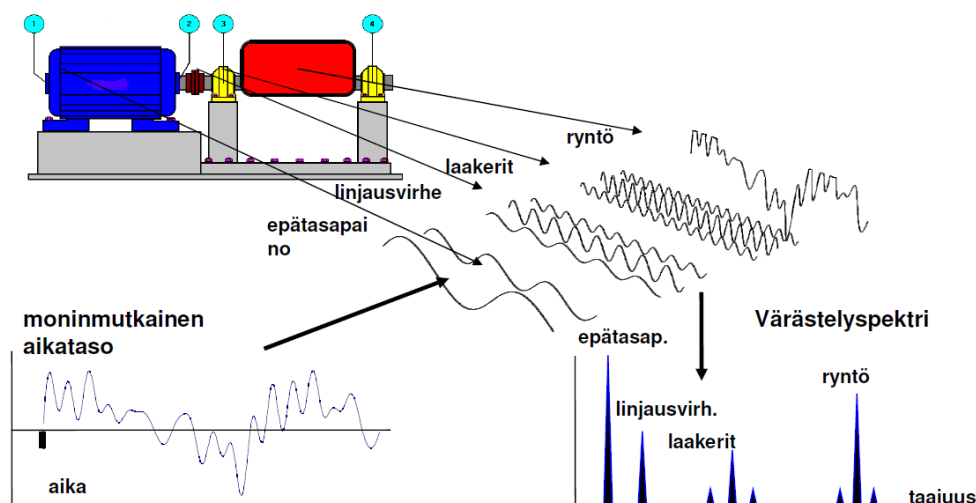
Kokonaistasovalvonnassa seurataan yleisimmin värähtelyn tehollis- tai huippuarvoa. Värähtelyn valvonnassa ylivoimaisesti yleisin suure on värähtelynopeuden tehollisarvo taajuusalueilla 2...1000 Hz tai 10...1000 Hz. Tehollisarvoa merkitään usein lyhenteellä rms, joka jättää epäselväksi, onko mitattu nopeutta, kiihtyvyyttä vai siirtymää. Huippuarvolla tarkoitetaan aikatasosignaalin itseisarvoltaan suurimman huipun arvoa. [5, s. 284]

### 7.1.4 Spektri, verhokäyrä ja PeakVue-valvonta

Spektrivalvonta eli spektrianalyysi on yleinen vianmäärityksen ja kunnonvalvonnan menetelmä, jossa värähtelyn mittatuloksista muodostetaan amplitudispektri, joka esittää värähtelyn voimakkuuden eri taajuuksilla. Taajuuksien perusteella järjestelmä tai analysoija voi päätellä mahdollisen vian sijainnin ja vakavuuden koneessa. Spektrissä saatetaan havaita aikaisessa vaiheessa vikoja, joita kokonaistason valvonnassa ei havaittaisi vielä pitkään aikaan. Näin mahdollistetaan koneen huollon tarkempi suunnittelu ja komponenttien keston ennustaminen. [5, s. 285]

Kunnonvalvontajärjestelmässä usein hyödynnetään kaistahälytyksiä tai hälytysraja-spektriä. Kaistahälytys voidaan asettaa tietyille tai tietyille kaistoille ja hälytysrajaspektri koko mitattavalle taajuuskaistalle. Amplitudin ylittäessä nämä asellut rajat aiheutuu hälytys. [4, s. 88; 5, s. 286]

Spektrin eli signaalin taajuustason laskeminen (kuva 22) perustuu Fourier-sarjojen käyttöön. Fourier-sarjoilla voidaan minkä tahansa signaalin osoittaa olevan eri amplitudit ja taajuudet omaavien sinimuotoisten signaalien summa. [4, s. 68]



Kuva 22. Värähtelyn signaali aikatasossa ja taajuustasossa [34, s. 23].

Tekniikassa Fourier-menetelmiä käytetään yleisimmin ajan funktioiden eli signaalien taajuussisällön tutkimiseen, ja menetelmä antaa mahdollisuuden tutkia myös muita kuin sinimuotoisia jaksollisia ja jopa jaksottomia funktioita. Diskreettiin Fourierin muunnokseen perustuvaa spektrianalyysiä sovelletaan laakerien ja muiden teollisuuden komponenttien ja koneiden kunnonvalvonnassa. FFT eli nopea Fourier-muunnos on diskreetin Fourier-muunnoksen erikoistapaus. [45, s. 183]

Digitaalisessa tietojenkäsittelyssä aikajatkuvista signaaleista muodostetaan näytejono, koska äärellisellä muistikapasiteetilla ei voida tallentaa aikajatkuvaa signaalia täydellisesti. Kun lasketaan jonon, jonka pituus on  $N$ , Fourier-muunnos, tarvitaan  $N$  potenssiin kaksi kertolaskua, ja tekijän  $N$  kasvaessa suureksi tulee laskutoimituksesta liian raskas jopa tietokoneen laskettavaksi. Nopea Fourier-muunnos ottaa signaalista näytteitä tietyn näytteenottotaajuuden mukaisesti ja auttaa näin vähentämään laskutoimitusten määrää sekä nopeuttaa toimintoa merkittävästi. [45, s. 211–212]

Vierintälaakerien alkavien vikojen kunnonvalvontaan käytetään verhokäyrä- ja PeakVue-valvontamenetelmiä, joissa erilaisilla ali- ja ylipäästösuodattimilla sekä tasasuuntauksella saadaan signaalista havaittua hyvin heikkoja iskumaisia värähtelyitä, jotka muuten jäisivät vallitsevan värähtelyn peittoon. [5, s. 286–287; 8, s. 31–32]

Muita valvontamenetelmiä ovat muun muassa aikataso-, vektori- ja kepstrivalvontamenetelmät. Aikatasovalvonnassa verrataan mitatun signaalin muotoa valittuun hälytysra-

jaan, joka pohjautuu joko itse valittuun amplitudin arvoon tai referenssimittauksella muodostettuun hälytysrajakäyrään. Vektorivalvonnassa seurataan pyörimistaajuisten tai sen monikerran värähtelyn amplitudin ja vaihekulman muodostamaa vektoria napa-koordinaatistossa. Kepstrivalvonta perustuu aikatazon signaalista muodostetun logaritmisin spektrin erilaisten epäsäännöllisyyksien havaitsemiseen. [4, s. 76; 5, s. 287–288]

## 7.2 Vikojen tunnistaminen

Automaattinen kunnonvalvonta laskettujen tunnuslukujen tai kokonaisvärähtelyn mukaan ei aina anna riittävän tarkkaa kuvaa oireiden aiheuttajasta. On tärkeää ymmärtää eri lähteiden aiheuttamien värähtelyjen voimakkuuksia, suuntia ja taajuuksia, jotta vikojen syyt voidaan korjata mahdollisimman nopeasti, eikä mahdollisilla turhilla komponenttien vaihdoilla aiheuteta turhia kustannuksia. Vianmäärityksessä käytettyjä lyhenteitä on listattu taulukossa 6. [4, s. 115]

Taulukko 6. Vianmääritykseen liittyviä lyhenteitä [16, s. 6]

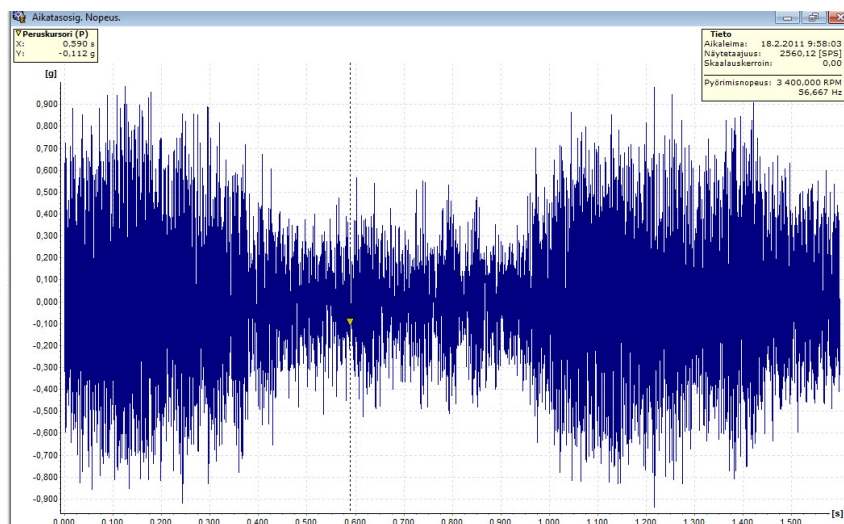
$n$	pyörimistaajuus	$A$	mittasuureen amplitudi
$N$	positiivinen kokonaisluku	$\phi$	vaihekulma
$f_o$	ominaistaajuus	$f_l$	lapataajuus
<i>Vierintälaakerien:</i>		$f_h$	hihnataajuus
$f_u$	ulkokehän vikataajuus	<i>Hammaspyörien:</i>	
$f_s$	sisäkehän vikataajuus	$Z$	hammasluku
$f_r$	vierintäelimen vikataajuus	$f_{jt}$	hampaiden kohtaamistaajuus
$f_p$	pidikkeen vikataajuus	$f_{rt}$	ryntötaajuus

Vikojen tunnistamisessa oleellisia tietoja ovat hetkellisten värähtelyarvojen lisäksi tahtauneet huomattavat värähtelyn muutokset ja konetiedot kuten koneen osat ja pyörimisnopeudet. Pyörimistaajuus on kaikkein tärkein taajuus, johon monet muut huomioitavat kohteet pohjautuvat. Puhaltimien siipipyörien siipien ja vaihdelaatikoiden hammaspyörien hampaiden lukumäärät vaikuttavat koneen seurattaviin taajuuksiin. [4, s. 115; 5, s. 290]

Liitteessä 1 on esimerkkikuvia aitojen tilanteiden spektreistä ja niiden tulkitsemisesta. Kuvia tarkasteltaessa täytyy huomioida, että värähtelyn vakavuuden määrittää vertailukohtana käytetty raja-arvo, joka pohjautuu esimerkiksi standardiin, eikä pelkästään kuvaajan dramaattinen muoto. Liitteessä 1 olevissa kuvissa on havainnollistavia esimerkkejä käsiteltävänä olevista ilmiöistä, eikä kuvissa näkyviä amplitudi-arvoja saa pitää raja-arvoina kuvien kohteille eikä yleisesti puhaltimille.

### 7.3 Aikatason kuvaaja

Aikatason kuvaajassa vaaka-akselilla on aika, ja pystyakselilla värähtelyn amplitudi. Aikatason kuvaajassa nähdään signaali sellaisena kuin se on mitattukin, esimerkiksi kuvassa 23 on erään puhaltimen värähtelyn nopeuden signaali aikatasossa.

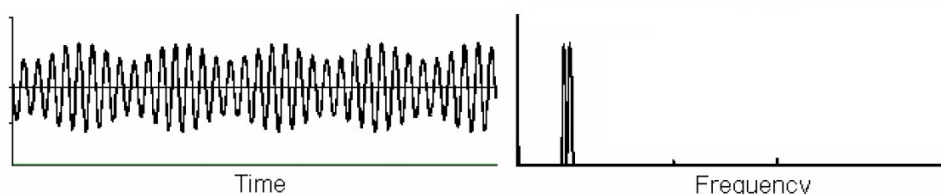


Kuva 23. Värähtelyn nopeuden tarkastelu aikatasossa FAG Trendline-ohjelmassa.

Aikatason pituus määräytyy näytepisteiden lukumäärän, joka voi esimerkiksi olla 1024, 2048 tai 4096 kappaletta, ja ylärajataajuuden mukaan. Aikatason signaalin muodosta voidaan päätellä mitattavan laitteen käynnin tasaisuus. Jakson epäsäännöllisyydet, hitaasti tapahtuvat muutokset ja yksittäiset iskumaiset huiput, jotka taajuustarkastelussa jäisivät huomiotta, ovat myös havaittavissa aikatason kuvaajasta. [4, s. 66; 16, s. 5; 34, s. 40]

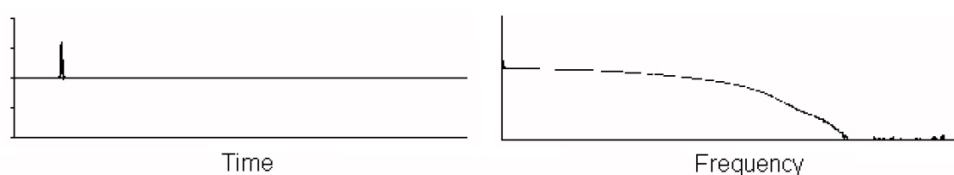
Aikatason signaalista voidaan joissakin tapauksissa havaita tiettyjä koneen vikoja. Tällöin tarkastellaan värähtelyn amplitudin lisäksi signaalista muodostetun kuvaajan muo-

toa. Esimerkiksi huojuntana (kuva 24) tunnettu signaalin muoto tarkoittaa tavallisesti sähkömoottorin sähkövikaa, värinän kantautumista toisesta koneesta rakenteita pitkin tai koneen nivelakselin virheellistä linjausta. Huojunta ei erotu spektrikuvaajasta, ellei spektrin erottelukyky ole riittävä. Muutoin nähdään vain yksi taajuuskomponentti, jonka amplitudi vaihtelee eri aikaan otetuissa näytteissä. [4, s. 84; 16, s. 32]



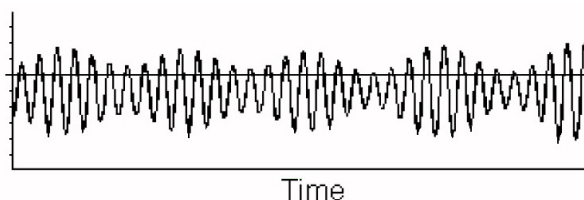
Kuva 24. Huojunta aika- ja taajuustasossa [46, s. 1].

Aikatazon kuvaajasta voidaan havaita myös iskumaisia vikoja (kuva 25), jotka ovat kehittymässä koneen komponentteihin, toisin kuin spektrissä, jossa näkyvät vain jaksollisesti toistuvat värähtelyn komponentit. Tutkimalla iskujen välillä kuluva aikaa voidaan päätellä, mikä koneenos on vaurioitumassa. [4, s. 84]



Kuva 25. Yksittäinen isku aika- ja taajuustasossa [46, s. 1].

Mittaussignaalin toispuoleisuutta aikatasossa (kuva 26) aiheuttavat linjausvirhe, roottorin hankaaminen sekä löysät ja irtonaiset liitokset.



Kuva 26. Toispuoleinen signaali [46, s. 1].

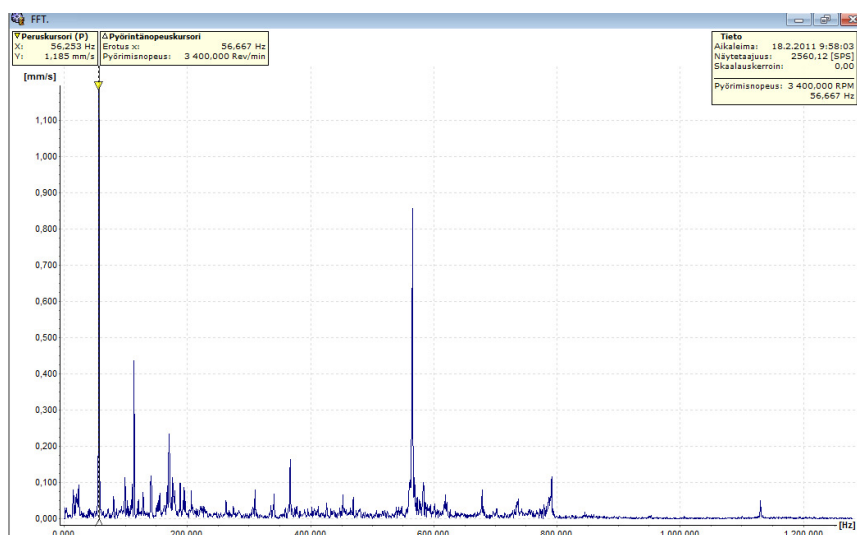
Usein kaikkia vikoja ei ole mahdollista havaita spektristä. Aikatazon signaalista havaittavia vikoja ovat esimerkiksi hammaspyörien murtuneet, muotoaan muuttaneet tai puuttuvat hampaat, vierintälaakerien viat hyvin alhaisilla (alle 0,17 Hz) taajuuksilla,



moottoreiden käynnistysviat ja mäntäkompressorien mäntien ja venttiilien viat. Aikata-son signaalin tutkiminen antaa lisää varmuutta, kun kyseessä ovat roottorin hankaus, linjauksen ja mekaanisen väljyyden erottaminen toisistaan ja akselien naarmut pyörre-virta-anturien kohdalla. [5, s. 355]

#### 7.4 Taajuustason kuvaaja

Taajuustasossa eli spektrikuvaajassa tarkasteltavia kohteita ovat esimerkiksi pyörimis-taajuuden amplitudi, eri komponenttien väliset amplitudisuhteet, perustaajuuden ja sen monikertojen amplitudi, sivunauhat, värähtelyn voimakkuus ja vaihe-erot eri mitta-suunnissa sekä yksittäiset spektrihuiput. Kuvassa 27 on esitetty nopealla Fourier-muunnoksella muodostettu spektrikuvaaja kuvan 23 aikata-son signaalista.



Kuva 27. Nopeuden signaali taajuustasossa FAG Trendline -ohjelmassa.

Jaksollisen funktion spektrit koostuvat ainoastaan peruskulmataajuuden monikerroista, minkä takia kuvaajat tällöin koostuvat erillisistä piikeistä, jotka joskus kuitenkin yhdis-tetään toisiinsa kuvaajissa. Spektrin taajuuserotuskyky, eli se, kuinka lähellä toisiaan piikit sijaitsevat, määräytyy spektriviivojen lukumäärän ja ylärajataajuuden kautta. Mitä enemmän spektriviivoja ja mitä matalampi ylärajataajuus, sitä parempi on spektrin erotuskyky. Lopullinen spektri lasketaan useamman näytteen keskiarvojen perusteella. [4, s. 69; 45, s. 198]

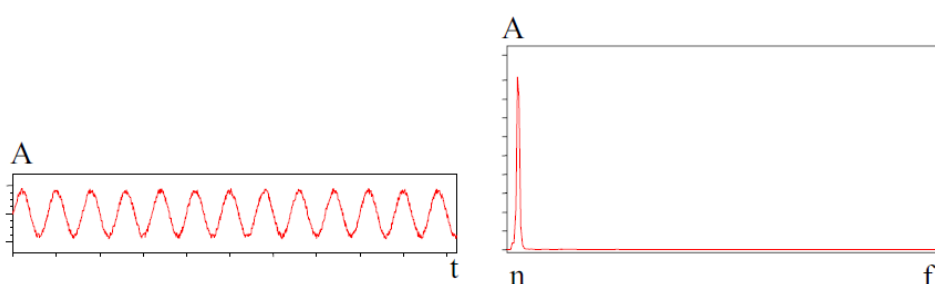
## 7.5 Signaalien tulkinta

### 7.5.1 Amplitudin taso

Koneen värähtelystä muodostettua spektrikuvaajaa tarkasteltaessa on aivan ensimmäisenä huomioitava värähtelyn amplitudi. Useissa analysointiohjelmissa kuvaaja skaalataan automaattisesti näytölle, jolloin värähtelyssä saattaa näkyä korkeita huippuja, joita kutsutaan myös piikeiksi. Kaikissa koneissa on tietty määrä epätasapainoa ja linjausvirhettä, jotka saattavat kuvaajassa näyttää vakavien vioilta, vaikka niiden aiheuttamat värähtelyt olisivatkin reilusti alle raja-arvojen. Spektristä havaitut ilmiöt tulee suhteuttaa kyseessä olevan koneen värähtelylle annettuihin raja-arvoihin. Tärkeimpänä arvona voidaan pitää koneen värähtelyn nopeuden tehollisarvoa, jonka mukaan standardien suositukset on laadittu. [16, s. 7; 17, s. 1]

### 7.5.2 Epätasapaino

Pyörivän koneen epätasapaino ilmenee spektrissä pyörimistaajuudella, eli värähtelyn vallitsevana taajuutena on  $n$  (kuva 28). Staattinen epätasapaino on eri laakereista mitattuna vakaa ja säteissuunnassa samassa vaiheessa. Pariepätasapaino on eri laakereista säteissuunnassa mitattuna vastakkaisessa vaiheessa ja aiheuttaa värähtelyä myös aksiaalisuunnassa. [16, s. 7–8]

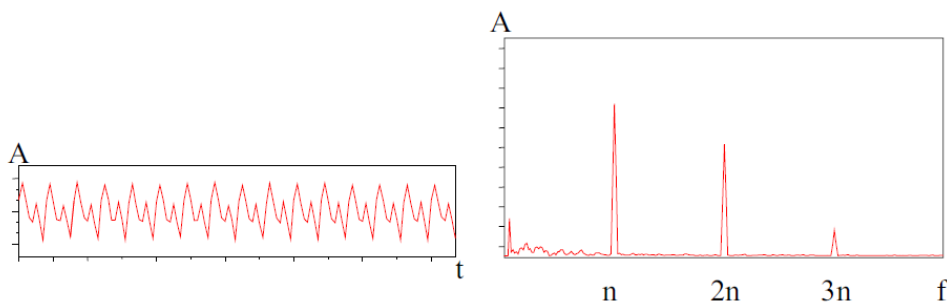


Kuva 28. Epätasapaino aika- ja taajuustasossa [16, s. 9].

Yhdeltä puolelta tuetuissa, niin sanotuissa roikkuissa roottoreissa epätasapaino aiheuttaa värähtelyä sekä aksiaali- että säteissuunnassa. Akselin suuntainen värähtely on eri laakereista mitattuna samassa vaiheessa, ja säteen suuntaisen värähtelyn vaihekulma on usein epävakaa. [16, s. 9]

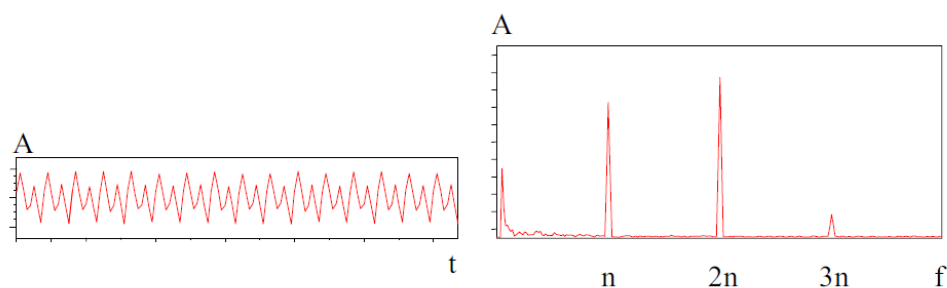
### 7.5.3 Linjausvirhe

Akselin linjausvirheet aiheuttavat voimakasta värähtelyä pyörimistaajuuden  $n$  monikerroilla. Linjausvirhettä on useimmiten sekä kulma- että säteissuunnassa. Kuvissa 29 ja 30 on esimerkit linjausvirheistä aika- ja taajuustasoissa. [16, s. 11]



Kuva 29. Kulmalinjausvirheen tunnistaminen [16, s. 11].

Kulmalinjausvirhe aiheuttaa pääasiallisesti akselin suuntaista värähtelyä ja kytkimen eri puolilta sijaitsevista laakereista akselin suuntaisesti mitatun värähtelyn vaihe-ero on noin 180 astetta. Tavallisimmin värähtelyä esiintyy taajuuksilla  $n$ ,  $2n$  ja  $3n$ , ja amplitudi pyörimistaajuudella  $n$  on suurempi kuin sen monikerroilla. [16, s. 11]

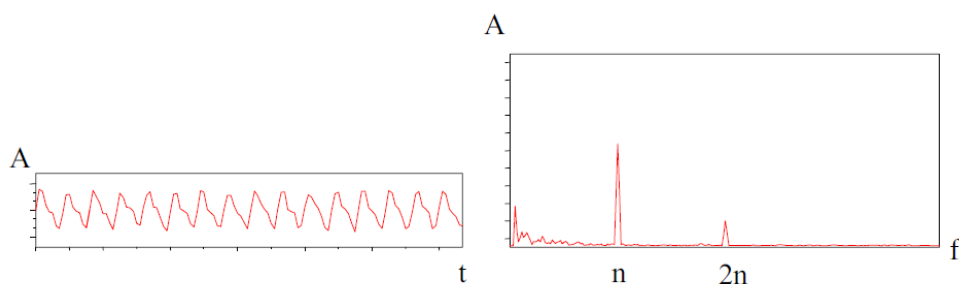


Kuva 30. Säteislinjausvirheen tunnistaminen [16, s. 12].

Säteislinjausvirhe aiheuttaa värähtelyä säteissuunnassa, ja värähtelyn vaihe-ero kytkimen eri puolilta sijaitsevista laakereista säteen suunnassa mitattuna on noin 180 astetta. Värähtely on yleensä voimakkaampaa taajuudella  $2n$  kuin  $n$ , mutta näiden keskinäinen suhde riippuu kytkimen rakenteesta. [16, s. 12]

#### 7.5.4 Taipunut akseli

Taipunut akseli aiheuttaa sekä säteis- että akselin suuntaista värähtelyä, jonka vaihe-ero taipuman eri puolilla sijaitsevista laakereista mitattuna on noin 180 astetta. Jos taipuma on lähellä akselin keskiosaa, vallitseva värähtelytaajuus on  $n$  (kuva 31), ja jos taipuma on lähellä kytkintä, niin vallitsevana taajuutena on  $2n$ . [16, s. 10]

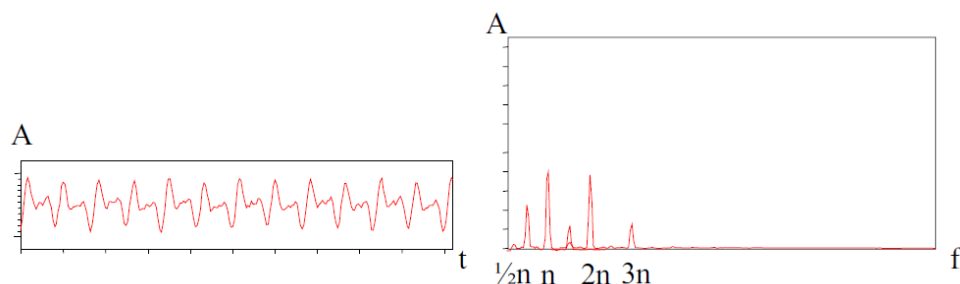


Kuva 31. Taipunut akseli [16, s. 10].

Ennen käyttöönottoa akselin valmistuksessa tai kokoonpanossa syntynyt taipuma ei poistu koneen käytön aikana. Pysähdyksissä olevan koneen roottorin massan aiheuttama taipuma voi suoristua konetta pyörittäessä. [16, s. 10]

#### 7.5.5 Mekaaninen väljyys

Mekaaninen väljyys (kuva 32) aiheutuu osien, kuten laakereiden, laakeritiivisteiden tai juoksupyörän ja akselin huonosta sovituksesta toisiinsa tai kiinnityspulttien löysästä kiinnityksestä. Samankaltaisia oireita aiheutuu myös koneen tukirakenteissa tai laakerituissa olevista halkeamista. Väljyys paikallistetaan vertaamalla eri kohdista mitattuja amplitudi- ja vaihe-eroja. [16, s. 12]

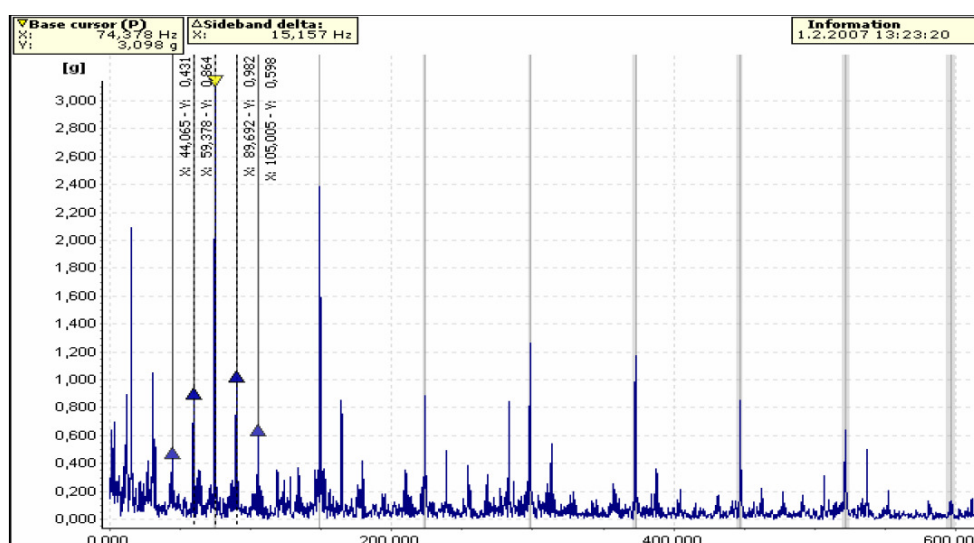


Kuva 32. Koneen osien väljä sovite [16, s. 13].

Väljyys aiheuttaa usein aliharmonisia komponentteja eli pyörimistaajuutta pienempiä monikertoja (kuva 32). Oireiden voimakkuus ilmaisee mekaanisen väljyyden suuruuden. Väljyys pyrkii aina suurenemaan käytön aikana, ja tämä havaitaan pidempiaikaisessa seurannassa. [16, s. 12–13]

#### 7.5.6 Vierintälaakerien vikataajuudet

Normaalisti vierintälaakerien viat (kuva 33) ilmestyvät ensin vierintäradoille ja sen jälkeen vierintäelimiin ja pidikkeeseen. Samasta syystä laakerien ulko- ja sisäkehien vikataajuudet  $f_u$  ja  $f_s$  tulevat näkyviin ennen vierintäelimen ja pidikkeen vikataajuuksia  $f_r$  ja  $f_p$ . Ulkokehän vikaantuminen havaitaan voimakkaampana värähtelynä vikataajuudella kuin sisäkehän, koska värähtelyanturi on lähes aina lähempänä ulkokehää. Vierintäelinten viat aiheuttavat usein havaittavia taajuuskomponentteja myös pidikkeen taajuudella. [16, s. 16]

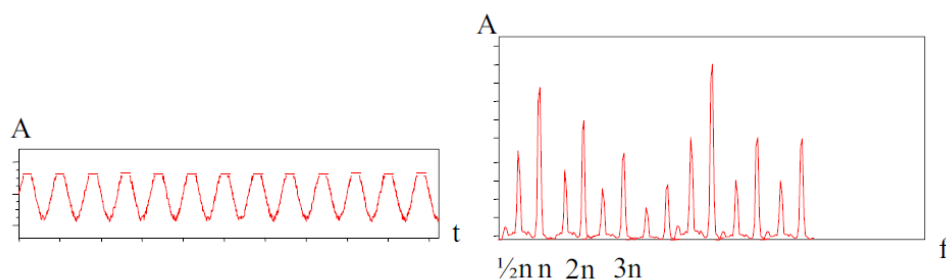


Kuva 33. Laakerin sisäkehävika sähkömoottorissa [47, s. 14].

Kuvassa 33 on esimerkki laakerin sisäkehän viasta, jossa spektrissä näkyvät piikit osuvat täysin kohdakkain verratessa tunnetun laakerin sisäkehän vikataajuuksiin. Vierintälaakerien vikataajuudet saadaan useisiin laitteisiin ja ohjelmiin suoraan laakerivalmistajilta valmiissa kirjastoissa, mutta ne voidaan myös määrittää itse laskentakaavoilla.

### 7.5.7 Roottorin hankaaminen

Koneen väärä kokoonpano tai linjausvirhe voi aiheuttaa roottorin hankaamista toista koneen komponenttia vasten (kuva 34). Hankaus voi olla jatkuvaa tai hetkittäistä, ja se saattaa herättää koneen ominaistajuuksia  $f_0$  värähtelemään. [16, s. 19]

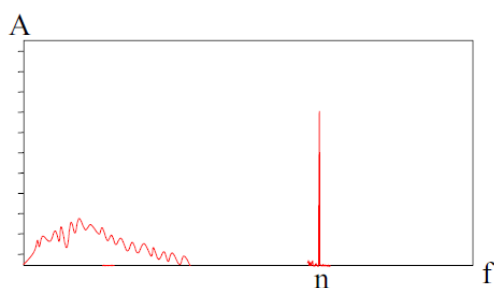


Kuva 34. Roottorin hankaaminen [16, s. 19].

Roottorin hankauksen yhteydessä esiintyy usein pyörimistaajuuden  $n$  aliharmonisia komponentteja. Hankaus saattaa myös aiheuttaa korkeataajuisia ja laajakaistaista värähtelyä. Aikatazon kuvaajasta voidaan yleensä havaita signaalin typistymistä. [16, s. 19]

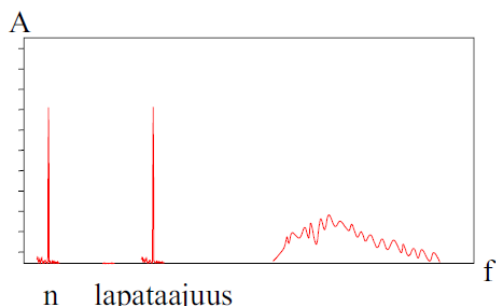
### 7.5.8 Lapataajuus, turbulenttinen virtaus ja kavitaatio

Pumppujen, puhaltimien ja kompressorien värähtely lapataajuudella  $f_l$  ei yleensä merkitse vikaa itse pyörivässä koneessa. Värähtelyn voimistuminen lapataajuudella saattaa johtua sen ja ominaistajuuksien  $f_0$  läheisyydestä, virtausta haittaavista tekijöistä putkissa ja kanavissa tai roottorin epäkeskeisyydestä pesässä. Tällaiset hydrauliset ja aerodynaamiset häiriöt saattavat aiheuttaa toimilaitteen ja siihen liittyvien putkien ja kanavien sisäosien kulumista. [16, s. 21]



Kuva 35. Turbulenttinen virtaus [16, s. 21].

Turbulenssi eli virtaavan nesteen tai kaasun pyörteily aiheutuu väliaineen paineen tai virtauksen nopeuden vaihteluista. Turbulenttinen virtaus aiheuttaa satunnaista värähtelyä matalilla, tyypillisesti alle 50 Hz taajuuksilla (kuva 35). [16, s. 21]



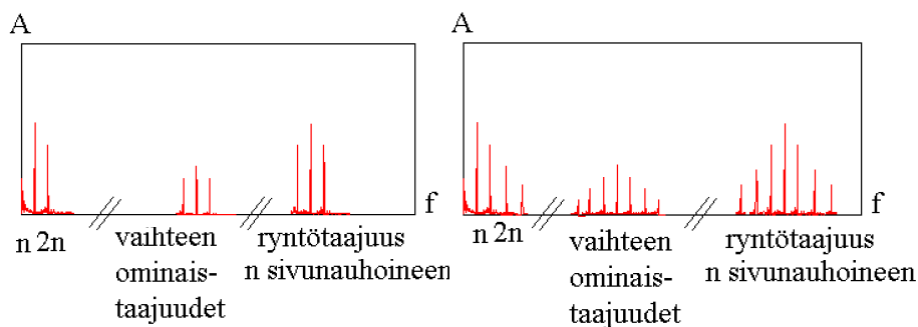
Kuva 36. Kavitaatio [16, s. 22].

Kavitaatio aiheuttaa normaalisti laajakaistaista ja korkeataajuisia satunnaista värähtelyä, jonka lisäksi värähtelyä esiintyy lapataajuudella  $f_l$  ja sen monikerroilla (kuva 36). Normaalisti kavitaatio aiheutuu liian pienestä imupaineesta ja se kuluttaa sekä siipiä, pesää että kanavia. Koneesta saattaa kuulua myös ääntä, joka muistuttaa soran kulkeutumista laitteen läpi. [16, s. 22]

#### 7.5.9 Vaihteisto ja hihnäkäyttö

Hammasvälitysten vikoihin vaikuttavat suuresti kuormitustekijät, joten amplitudin voimistuminen ryntötaajuudella  $f_t$  ei välttämättä tarkoita vian kehittymistä, vaan kuormituksen muuttumista. Normaalissa spektrissä näkyvät vaihteiston akselien pyörimis- ja hammaspyörien ryntötaajuudet sekä niiden mahdolliset monikerrat. Hampaiden kulussa ryntötaajuuden värähtelyn voimakkuus saattaa pysyä muuttumattomana, mutta kun ryntötaajuuden ympäristöön ilmestyy voimakkaita sivunauhoja hammaspyörän pyörimistaajuuden välein, on kulumisen jo vakavalla tasolla. [16, s. 23; 48, s. 10]

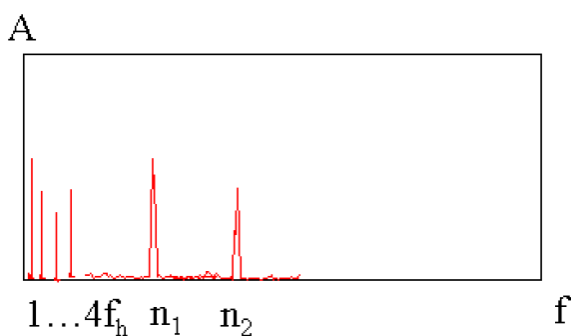
Kuvassa 37 vasemmalla on esimerkki spektristä, jossa nähdään hammaspyörän hampaan kulumista ja oikealla hammaspyörän epäkeskeisyyttä [16, s. 23–24].



Kuva 37. Vaihteiston ryntötaajuus ja sivunauhoineen [16, s. 23—24].

Useammat voimakkaat ryntötaajuuden  $f_r$  sivunauhat ilmaisevat yleensä hammaspyörin epäkeskeisyyttä, virheellistä välystä tai akselien linjausvirhettä. Virheellinen hammasvälys aiheuttaa myös värähtelyä rakenteen ominaistaajuudella, ja sen molemmille puolille muodostuu useita sivunauhoja. Epäkeskeisyyden ollessa vallitsevana vikana voimakkain värähtely esiintyy kyseisen akselin pyörimistaajuudella. [16, s. 23—24; 48, s. 14]

Kuluneet, löysät tai vääränmalliset hihnat aiheuttavat värähtelyä koneen hihnataajuudella  $f_h$  ja sen monikerroilla (kuva 38), ja värähtely on usein voimakkainta toisella monikerralla. Hihnapyörän linjausvirhe aiheuttaa pääasiallisesti värähtelyä akselin suunnassa molempien hihnapyörien pyörimistaajuuksilla. [16, s. 26—27]



Kuva 38. Kuluneiden, löysien tai sopimattomien hihnojen spektri [16, s. 26].

Hihnan resonanssi voi synnyttää voimakasta värähtelyä, jos hihnan ominaistaajuus on lähellä käyttävän tai käytettävän hihnapyörän pyörimistaajuutta, mutta tähän voidaan vaikuttaa muuttamalla hihnan kireyttä tai pituutta. [16, s. 26—27]



## 7.6 Sähkömoottorin osuus värähtelystä

Sähkömoottorin osuus koneen, esimerkiksi puhaltimen, kokonaisvärähtelystä voidaan määrittää suorittamalla kaksi tehollisarvon mittausta, kun järjestelmässä on kytkin, eli moottori ja itse pyörivä laite ovat eri akseleilla. Ensin mitataan värähtely koneen normaalissa kokoonpanossa. Toinen ajo mitataan kun moottorin akselia on käännetty 180 astetta. Mittauksista voidaan muodostaa yhtälöpari

$$\begin{cases} m + p = k_1 \\ -m + p = k_2 \end{cases} \quad (13)$$

jossa  $m$  on moottorin värähtelyn arvo,  $p$  on puhaltimen värähtelyn arvo,  $k_1$  on puhaltimen ja moottorin yhteisvärähtelyarvo ensimmäisessä ajossa ja  $k_2$  on puhaltimen ja moottorin yhteisvärähtelyarvo toisessa ajossa. Mittauksien perusteella tunnetaan molempien tilanteiden yhteisvärähtelyarvot, ja kun yhtälöpari ratkaistaan puhaltimen suhteen, saadaan yhtälö

$$p = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (14)$$

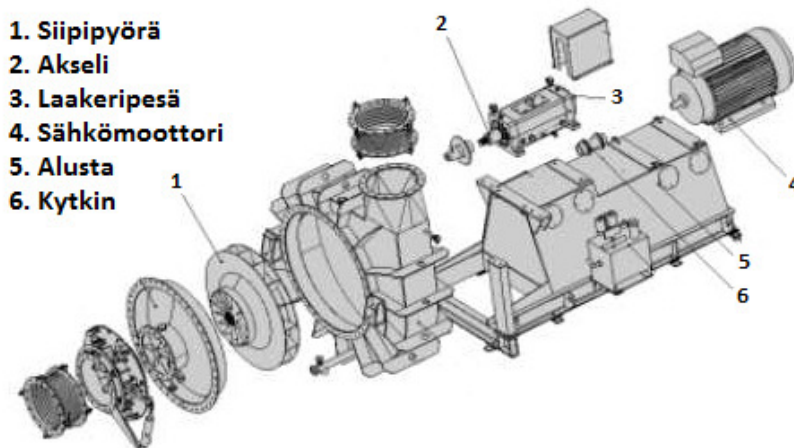
jossa  $p$  on puhaltimen värähtely ilman moottorin vaikutusta ja  $k_1$  sekä  $k_2$  ovat kahden mittauksen kokonaisvärähtelyt. [15]

## 8 Fläkt Woods Oy:n puhaltimien värähtelymittaukset

### 8.1 Teollisuuspuhaltimet

Fläkt Woods Oy:n Espoon tehtaalla valmistetaan teollisuuspuhaltimia moniin eri teollisuudenalojen tarpeisiin. Puhaltimien materiaalit, ominaisuudet ja varustelu suunnitellaan asiakkaan tarpeiden mukaan. Espoon teollisuuspuhaltimet voidaan jakaa karkeasti korkeapaine- ja prosessipuhaltimiin. Suurin osa tehtaalla suoritettavista koeajoista tehdään korkeapaine puhaltimille. Käyttöön otossa ja huoltokäynneillä suoritetaan värähtelymittauksia ja värähtelyn tasoa laskevia toimenpiteitä molemmille puhallintyypeille ja harvoin myös muiden valmistajien puhaltimille. [49]

Puhaltimien komponentit valmistetaan alihankkijoiden tuotantolaitoksissa ja toimitetaan Espooseen kokoonpanoa ja koeajoa varten. Puhaltimien laakeroinnit kootaan ja siipipyörät tasapainotetaan Espoon tehtaalla. Kaikkein tärkeimmät puhaltimen värähtelyn tasoon vaikuttavat komponentit on esitetty kuvassa 39. Yksittäisen puhaltimen värähtelyyn vaikuttavat suuresti siipipyörän tasapaino ja dynaaminen heitottomuus, akselin suoruus, laakerien kunto, sähkömoottorin aiheuttamat värähtelyt, alustan resonointi ja kytkimen linjaus.



Kuva 39. Korkeapaine puhaltimen rakenne [50, s. 6].

Kokoonpanossa puhaltimen värähtelyn kannalta tärkeimpiä vaiheita ovat laakeroinnin kokoaminen vaurioitta, siipipyörän kaavun imuosan asemoiminen ja sähkömoottorin sekä pääakselin yhdistävän kytkimen linjaaminen. Kaikissa yleisimmissä puhallinmal-  
leissa voidaan ajatella olevan neljä laakeria ja kaksitoista värähtelyn mittapistettä,

vaikka joskus laakereita asennetaankin useampia vierekkäin ottamaan vastaan eri suuntiin vaikuttavia voimia.

## 8.2 Puhallintyypit ja ominaisuudet

Korkeapainepuhaltimia toimitetaan maailmanlaajuisesti muun muassa meijeri-, lääke- ja petrokemianteollisuuden prosesseihin. Korkeapainepuhaltimille tyypillisiä ovat korkeat, jopa yli 4000 rpm, käyttöpyörimis- ja jopa lähes 300 m/s kehänopeudet, jotka aiheuttavat haasteita puhaltimen kokoonpanossa ja komponenttien valmistuksessa. Korkeampi käyttönopeus vaatii siipipyörän tasapainotukselta ja akselin linjaukselta tiukempia raja-arvoja, korkeapainepuhaltimet usein vaativat tasapainotusta koeajon yhteydessä. Laakeroinnit ovat useimmiten vierintälaakereita, mutta vaativimmissa sovelluksissa käytetään liukulaakereita. Puhaltimet ovat joko korkea- tai matala-alustaisia. Koeajossa tehtaalla matalat alustat tarvitsevat tilapäisen koeajoalustan alleen.

Prosessipuhaltimien tyypillisiä käyttökohteita ovat paperi-, sellu- ja kaivosteollisuuden sovellukset sekä voimalaitoskattilat. Prosessipuhaltimet ovat usein fyysiseltä kooltaan hyvin suuria ja ne kootaan ja koeajetaan yleensä vasta lopullisessa kohteessa. Prosessipuhaltimien käyttöpyörimisnopeus on huomattavasti korkeapainepuhaltimia alhaisempi eikä värähtelyn aiheuttamia ongelmia uusissa puhaltimissa juurikaan ole. Värähtelymittaukset ja mahdollinen puhaltimen tasapainotus suoritetaan yleensä jo käytössä olleille prosessipuhaltimille.

ComVel-i mallisten puhaltimien käyttöpyörimisnopeudet voivat olla jopa 12000 rpm. Siipipyörät valmistetaan komposiittitekniikalla kevyestä hiilikuidusta, ja ne asennetaan suoraan suurnopeusmoottorien akseleille. Tärkein käyttökohde on toistaiseksi jätevedenkäsittelylaitokset.

## 8.3 Koeajojen mittaukset ja raja-arvot

Koeajot suoritetaan mahdollisuuksien mukaan puhaltimen omilla komponenteilla. Usein koeajoissa joudutaan käyttämään tilapäisiä koeajoalustoja puhaltimien rakenteen takia ja orjamootoreita, koska varsinaiset moottorit toimitetaan kustannussyistä suoraan asiakkaalle. Puhaltimien imu- ja painepuolen aukot suljetaan tiiviisti ja kaapuun tuote-

taan pumpuilla alipaine, jotta siipipyörän ilmanvastus ja sen johdosta puhaltimen kuorma jäävät koeajossa siedettäviksi. Jos puhaltimeen ei voida imeä alipainetta, imu- ja painepuolien virtauksia kuristetaan, jotta puhallin voidaan koeajaa halutulla pyörimisnopeudella.

Puhallin ajetaan käyttöpyörimisnopeuteensa ja värähtelyarvot mitataan kahdestatoista mittapistestä sekä suoritetaan puhaltimen ylös- ja alasajomittaukset. Jos puhaltimen värähtelyarvot eivät alita sallittuja raja-arvoja, puhallinta tasapainotetaan siipipyörään asennettavilla painoilla ennen lopullisten tulosten tallentamista. Käytännössä koeajossa ei ole muita keinoja vaikuttaa puhaltimen värähtelyyn kuin tasapainotus, kun mekaaninen hankaus, kiinnitysten löysyys ja akselin linjausvirhe on eliminoitu. Resonanssia voi teoriassa yrittää hallita lisäämällä alustaan tukirakenteita, mutta tällöin on mahdollista myös pahentaa värähtelyä siirtämällä resonanssialuetta lähemmäksi käyttöpyörimisnopeutta.

Puhaltimen värähtelyn raja-arvot koeajotilanteessa pohjautuvat standardien SFS-ISO 2372 luokan IV (kuva 40) ja ISO 10816-3 ryhmän 1 raja-arvoihin. Ei ole olemassa erityisesti puhaltimille tarkoitettuja yleispäteviä raja-arvoja, joita voitaisiin soveltaa värähtelymittauksissa, mutta kokemus on osoittanut käytettyjen standardien arvot riittäviksi. Kuvassa 40 on standardin SFS-ISO 2372 raja-arvotaulukko, jonka luokan IV rajat ovat hieman väljemmät kuin standardin ISO 10816-3 mukaisen taulukon kiinteällä kiinnityksellä (kuva 12). Myös puhaltimen asennus jäykästi alustaan kiinteillä peruspulteilla tai joustavasti tärinänvaimentimilla vaikuttaa sekä värähtelyn suuruuteen että käytettäviin raja-arvoihin. [25, s. 87]

Tärinärasitusalueet Ranges of vibration severity		Esimerkkejä eri koneluokkien laatuluokituksesta Examples of quality judgement for separate classes of machines			
Alue Range	Nopeuden v rms-arvo (mm/s) kunkin alueen rajalla rms-velocity v (in mm/s) at the range limits	Luokka I Class I	Luokka II Class II	Luokka III Class III	Luokka IV Class IV
0,28	0,28	A	A	A	A
0,45	0,45				
0,71	0,71				
1,12	1,12	B	B	A	
1,8	1,8				
2,8	2,8	C	C	B	
4,5	4,5				
7,1	7,1	D	D	C	
11,2	11,2				
18	18				
28	28				
45	45				
71	71				

Kuva 40. Standardin SFS-ISO 2372 raja-arvot [51, s. 12].

Käytännössä aina kun puhaltimen värähtelyarvot ylittävät 2 mm/s, puhallinta tasapainotetaan. Kokemus on osoittanut, että puhaltimen värähtelyä saadaan yleensä kohtuullisella työmäärällä pudotettua 1 mm/s tuntumaan tai joskus jopa sen alle. Puhaltimen tasapainottaminen ei aina laske värähtelyn tasoa, koska värähtelyn syyt voivat olla puhaltimen komponenttien rakenteellisissa ominaisuuksissa eivätkä varsinaisessa epätasapainossa.

#### 8.4 Kunnonvalvonnan mittaukset

Käytön aikaisessa kunnonvalvonnassa käytettävät raja-arvot ovat teoriassa samoja kuin koeajossa, mutta käytännössä prosessin ominaisuudet ja asiakkaan tarpeet sanelevat värähtelyyn reagointitarpeet. Kunnonvalvonnassa oleellista on vianmääritys ja tulosten tallentaminen tilastollista seuranta varten. Kun puhaltimen oireita osataan tulkita oikein, saadaan mahdollinen vika paikallistettua puhaltimen ollessa vielä käynnissä ja voidaan tehdä ennuste ja päätöksiä korjauksen luonteesta ja ajankohdasta.

Puhaltimen kunnonvalvontamittaukset ja varsinkin huoltotoimenpiteet ovat usein hankalia suorittaa prosessilaitoksissa ajan, tilan ja työkalujen puutteen sekä epäsuotuisten lämpötila- ja puhtausolosuhteiden takia. Mitä nopeammin ja vähillä toimenpiteillä pää-

dytään vianmäärityksessä oikeaan diagnoosiin, sitä nopeammin ja helpommin korjaavat toimenpiteet voidaan suorittaa.

## 8.5 Käytössä olevat mittalaitteet

### 8.5.1 FAG Detector III ja Trendline

FAG on yksi suurimmista ja tunnetuimmista laakerien toimittajista maailmassa, se kuuluu nykyään Schaeffler Group -yhtymään ja sillä on yli 120 vuoden kokemus vierintälaakereiden valmistamisesta. Teollisuuden palvelut, mukaan lukien kunnonvalvonta ja sen mittalaitteet, on eriytetty yhtiössä FAG Industrial Services (FIS) -divisioonaan. [52]

FAG Detector III on kannettava kunnonvalvonnan ja tasapainotuksen työkalu, jota operoidaan tietokoneella Trendline-ohjelmalla. Detector-mittalaitteita ja Trendline-ohjelmaa käytetään Fläkt Woods Oy:n Espoon yksikössä värähtelynvalvontaan, tasapainotukseen, ylös- ja alasajomittauksiin sekä näiden tietojen tallentamiseen ja mittaustietokannan hallintaan. Kaikki puhaltimet niin koeajossa kuin asiakkaidenkin kohteissa mitataan Detectorilla ja tallennetaan tietokantaan mahdollista tulevaa tarvetta varten.

Trendline-ohjelmalla luodaan puhallinkohtaisille värähtelymittauksille reitti, joka käsittää 12 mittapistettä, ylös- ja alasajon sekä tasapainotustiedot, ja luotu konfiguraatio ladataan mittalaitteeseen. Mittauksissa käytetään samoja antureita ja parametreja toistettavuuden takaamiseksi. Laakeripesän mittapisteissä spektrin FFT-viivoja on 1600 kappaletta ja alipäästösuodatuksen raja eli spektrin korkein taajuus on vähintään 1000 Hz. Käytetyn kiihtyvyyssanturin herkkyys on 100 mV/g. Mittausten jälkeen tiedot ladataan tietokoneelle ja tallennetaan tietokantaan. Laitetta voidaan käyttää myös yksittäisiin mittauksiin.

Itse mittalaitteen käyttö on selkeää, kun reitti on luotu ja ladattu valmiiksi. Laite opastaa suomen kielellä vaihe vaiheelta mittauksen alusta loppuun, ja valikoissa voi tarvittaessa palata aikaisempiin vaiheisiin. Mittalaitteeseen voidaan kiinnittää kaksi kiihtyvyyssanturia, mutta laite ei lue molempia kanavia samanaikaisesti. Kunnonvalvontaa suorittaessa täytyy kiihtyvyyssanturia siirtää käsin jokaiseen ennalta määritellystä kah-

destatoista mittapisteestä koneen pyöriessä täydellä nopeudella. Tämä työvaihe sisältää riskin mittausten suorittajan tai anturin vahingoittumisesta. Tasapainotuksessa sekä ylös- ja alasajomittauksissa Detectoriin yhdistetään takometri vaihekulman määrittystä varten.

Tulosten analysointi suoritetaan tietokoneella Trendline-ohjelmalla. Myös mittalaitteen ruudulla saadaan näkymään jopa spektrikuvaaja, mutta ruutu on liian pieni ja epätarkka mittausten arviointiin, muuten kuin värähtelyn numeroarvojen osalta. Vianmäärittystä varten tutkitaan nopeuden, kiihtyvyyden ja verhokäyrän aika- ja taajuustason kuvia. Analysointia helpottaa laakerien valmistajien toimittama päivittyvä laakeritietopankki, josta laakerien vikataajuudet saadaan näkyviin samoihin kuvaajiin puhaltimien mittausten kanssa.

#### 8.5.2 VIKON Miva®, PEMAC® ja ROBAL®

VIKON Vibrationskonsult AB valmistaa ja markkinoi Miva®-kunnonvalvontatuotteita sekä PEMAC®- ja ROBAL®-kunnonvalvonta- ja tasapainotusohjelmia. VIKON Miva® Master on pyörivien koneiden valvontaan tarkoitettu tehdastasoinen kokonaisratkaisu joka käsittää keskusyksikön Windows XP-käyttöjärjestelmällä, kunnonvalvonnan ohjelmat, Ethernet-yhteyden ja valmiuden yhdistää lukuisia koneiden luokse hajautettuja tiedonkeruuyksiköitä. Miva® Machine Protector (MMP) on kunnonvalvontayksikkö, joka valvoo koneiden värähtelyä, hälyttää ennalta asetettujen parametrien mukaisesti ja tallentaa mittaustietoa muistikortille mutta ei sisällä käyttöliittymää, sitä operoidaan ulkoisen tietokoneen avulla. MMP on mahdollista yhdistää Ethernet-kaapelilla tehtaan verkkoon tai internetiin etäyhteyttä varten. PEMAC® Report on kunnonvalvontalaitteiden tulosten tarkasteluun tarkoitettu käyttöliittymä ja ROBAL® pyörivien koneiden tasapainotukseen ja tasapainotustietojen tallentamiseen käytettävä ohjelma. [53; 54, s. 4; 55]

Fläkt Woods Oy:n Espoon tehtaalla käytetään MIVA® Master-yksikköä kunnonvalvontaan ja tasapainotukseen. Toimiva järjestelmä tarvitsee tietoa puhaltimen normaalista käyttäytymisestä, johon mahdollisia vikatiloja voidaan verrata, ja tämän takia Espoon tehtaalla koeajosta mahdollisimman suuri osa tallennetaan myös VIKON:in laitteilla ja

ohjelmilla. Laitteeseen saa yhdistettyä kahdeksan nopeusanturia, joiden herkkyys on 29 mV/mm/s. [54; 55]

PEMAC® Report-ohjelman hakemistossa näkyvät tehdas-, kone- ja anturitason tulokset ja mahdolliset hälytykset värikoodeilla. Jokaisen yksittäisen anturin tuottamaa dataa voidaan tarkastella aika- ja taajuustasossa. Laitteen vakioparametrit määrittävät 4096 mittausta 2000 Hz saakka. Ohjelmaan luotua puhallinkohtaista k-mallia, joka sisältää normaalilla tavalla toimivan puhaltimen käyttötiedot, verrataan mittapisteistä saadun tiedon pohjalta laskettuihin tunnuslukuihin. K-mallit luo VIKON Vibrationskonsult AB yhteistyössä valvottajan koneen valmistajan ja asiakkaan kanssa. [54, s. 6—14]

Tasapainotusohjelma ROBAL® sisältää tavallisten tasapainotustyökalujen lisäksi käytännöllisiä toimintoja, kuten ylös- ja alasajon kuvaajan reaaliaikaisen näytön, josta puhaltimen resonanssitaajuuDET voidaan päätellä ajon aikana, ja mahdollisuuden tasapainottaa käyttäen itse valitsemaa lukumäärää sen kahdeksasta mahdollisesta mittapistestä, tuottaen sovitettun tasapainotuksen ratkaisun kaikkien haluttujen kanavien pohjalta. Mittausten yläraja on 2000 Hz. [55, s. 6—33]

### 8.5.3 SPM VibChecker

SPM VibChecker on pienikokoinen, kannettava värähtelymittauslaite 10—1000 Hz taajuusalueelle. Laitteessa on pieni näyttö mittaustuloksille ja vihreä, keltainen ja punainen valo osoittamassa värähtelyn vakavuutta standardeihin ISO2372 tai ISO 10816 verraten. Mittaukset suoritetaan joko laitteen kiinteällä tai kaapelin avulla liitettävällä ulkoisella kiihtyvyyssanturilla. Tulokset voidaan esittää siirtymänä, nopeutena tai kiihtyvyytenä ja valita voi myös tehollis-, huippu- ja huipusta huippuun -arvon. Laitteita käytetään koeajoissa ja kunnonvalvonnassa puhaltimien tärinän tason yleisluonteiseen mittaamiseen, johon ne soveltuvat hyvin nopean toimintansa ja helpon käyttöliittymän ansiosta. [56]



## 8.6 Mittaustoiminnan kehittäminen

### 8.6.1 Mittalaitteet ja koulutus

Mittaustoiminnan suunnittelua ja toteutusta vaikeuttavat käytössä olevat eri toimittajien laitteet, jotka eivät toimi yhdessä toistensa kanssa, paitsi muutamien anturien osalta. Kunnonvalvonnan mittausten kannalta paras tilanne saavutettaisiin, jos käytössä olisi vain yksi mittalaitemalli kaikissa toimenpiteissä. Tällä varmistettaisiin mittaustulosten vertailukelpoisuus ja toistettavuus, helpotettaisiin laitteiden käyttökoulutuksen toteutusta, kalibrointien ja huoltojen hallintaa sekä mahdollistettaisiin tiiviimpi yhteistyö laitteen toimittajan asiantuntijoiden kanssa. Hyvä vaihtoehto voisi olla myös se, että saman toimittajan laitteita olisi käytössä useampaa mallia käyttötarkoituksesta riippuen, mutta ohjelmisto ja mittatietokanta olisivat yhteisiä ja yhteensopivia kaikille laitteille. Laitteiden toimittaja tulisi valita kokonaisuuden kannalta, eli laitteiden hankintahinnan edullisuuden lisäksi toimijan luotettavuus, laitteiden ja ohjelmien saatavuus, toimittajan tunnettavuus asiakkaiden parissa sekä kattava kokemus alalta, paikallisuus eli läsnäolo sekä Suomessa että lähellä asiakkaita ja tukipalveluiden hyvä saatavuus ovat erinomaisen tärkeitä perusteita. Loppuasiakkaiden omat tehdasstandardit tulee myös huomioida.

Kunnonvalvontatoiminnan helpottamiseksi kaikilla kunnonvalvontaa suorittavilla tulisi olla henkilökohtaiset mittalaitteet ja niihin liittyvät anturit sekä kaapelit. Nimikoidut laitteet olisivat käytettävissä aina tarvittaessa ja niiden kalibrointien ja huoltojen järjestäminen helpottuisivat. Omaan käyttöön osoitettuihin mittalaitteisiin perehtyminen ja laitteiden konfigurointi omalta kannalta parhaalla tavalla tukisivat laitteiden tehokkaampaa käyttöä.

Mittalaitteiden ja ohjelmien käyttökoulutusta tulisi myös lisätä huomattavasti ja laatia koulutussuunnitelma, jossa arvioitaisiin koulutuksen tarve jokaiselle laitteiden parissa työskentelevälle henkilökohtaisesti. Ulkoisen koulutuksen lisäksi tulisi painottaa sisäistä toimintaa laatimalla tavanomaisten käyttöohjeiden lisäksi yrityksen omaan käyttöön tarkoitettuja, tuotteiden ja käyttökohteiden mukaan räätälöityjä käytännön toimintaan paneutuvia oppaita. Ohjeiden päivittäminen ja laitteiden kattava käyttökoulutus voidaan ajoittaa tuotannon kannalta rauhallisempiin ajankohtiin. Kun peruskäyttö on hy-

vällä tasolla, voidaan koulutuksessa ottaa mukaan syvällisempää tietoa laitteiden ja niiden perustana olevien suureiden luonteesta.

### 8.6.2 Koeajojen kehittäminen

Matala-alustaisten puhaltimien koeajoissa käytettävät tilapäiset alustat aiheuttavat mitaustilanteissa resonoidessaan, värähtelyjä jotka eivät kuulu varsinaiseen tuotteeseen. Käytettyjen onttojen teräsalustojen rakenne ei vastaa asiakkaiden prosessien tilannetta, jossa puhaltimet valetaan kiinni betoniseen alustaan. Tuotantoon hankittujen modulaaristen, betonilla täytettyjen alustojen käyttöönotto kesällä 2011 saattaa korjata tilannetta, mutta johtopäätöksiä voidaan tehdä vasta kattavien käyttökokemusten pohjalta.

Koeajotilanteissa käytettävät raja-arvot tulisi määrittää yksiselitteisesti, eikä puhaltimia tulisi markkinoida asiakkaille tiukemmilla värähtelyn raja-arvoilla, kuin mitä yleiset standardit suosittavat. Puhaltimista mitataan usein parempia värähtelyarvoja lopullisessa prosessissa kuin koeajossa, kun oikea alusta ja kanavat ovat paikoillaan ja prosessin paine on suunnitellun suuruinen. Koeajoissa Espoon tehtaalla ei kannata tuhlaa liikaa aikaa värähtelyarvojen paranteluun, koska arvot muuttuvat kuitenkin varsinaisen puhallinasennuksen yhteydessä. Standardien SFS-ISO 2372, ISO 10816-3 ja PSK 5704 A-luokan raja-arvojen alittaminen on riittävä laadun taso. Standardeissa PSK 5704 ja ISO 10816 annetaan Espoon tehtaan toimintaan hankalasti sovitettavia ohjeita mittauksen suorittamisesta, esimerkiksi koneen yhtäjaksoisesta käyttämisestä ennen mittauksia ja kiinnitettävistä komponenteista, ja näiden standardien suositusten pohjalta voitaisiin laatia Espoon omat, koeajotilannetta koskevat ja puhaltimien ominaisuudet sekä rajoitteet huomioon ottavat kirjalliset ohjeet. [24, s. 5; 31; 51, s. 12]

Koeajotilanteissa käytetyt mittapisteen tulisi merkitä puhaltimeen mittauksen toistettavuuden takaamiseksi. Puhaltimien laakeripesien, kaapujen ja moottorien vaihtelevat rakenteet ja mitta-antureiden fyysinen koko vaikeuttavat mittapisteiden vakioimista yhteisten sääntöjen mukaan kaikille puhaltimille, mutta ensimmäisessä mittauksessa merkityt mittapisteen säilyttävät tämän tärkeän tiedon yksittäisten puhaltimien mukana. Merkintöjä varten voitaisiin teettää helposti tunnistettavia ja mittapisteen selkeästi osoittavia tarroja, joiden alla mittapisteen pinta säilyisi puhtaana seuraavaan mittauk-

seen saakka. Seuraavan mittauksen jälkeen tarra voidaan vaihtaa uuteen. Tarrojen puuttuessa mittapisteet voidaan merkitä tussikynällä tai maalilla, mutta näiden merkintöjen tulkittavuus ja tunnistettavuus ovat huonoja.

### 8.6.3 Kunnonvalvonnan kehittäminen

Puhaltimien käytön aikainen valvonta antaa mahdollisuuksia kunnonvalvontalaitteiden myyntiin osana puhallintoimitusta ja palveluiden myyntiin huoltotoiminnan kautta, mutta toimitetun puhaltimen valvonta on käytännössä asiakkaiden vastuulla. Takuun aikana ilmenevät ongelmat saattavat aiheuttaa kustannuksia myös valmistajalle, mikäli ei voida osoittaa ongelmien johtuvan puhaltimen väärästä käytöstä. Puhaltimien myyntisopimuksissa pitäisi varmistaa, että puhaltimen käyttäjä joko hankkii käytön aikaisen valvonnan puhaltimen toimituksen yhteydessä tai suorittaa valvontaa ja tallentaa mitausten tietoja omatoimisesti. Ongelmatapauksissa asiakkaan tulee osoittaa keräämässään käyttöpyörimisnopeuden, värähtelyn kokonaisarvojen, moottorin käytön ja laakerien lämpötilojen sekä muiden prosessin arvojen datasta puhaltimen oikea käyttöhistoria. Jos asiakas ei voi osoittaa käyttäneensä puhallinta asianmukaisella tavalla, ei takuukaan voi kattaa korjauksesta aiheutuvia kustannuksia.

Toinen tapa seurata puhaltimien käyttöä niille suunnitellulla tavalla vähintään takuajan umpeutumiseen asti, on asentaa puhallintoimittajan kustannuksella omat mittalaitteet, joiden tallentamia tietoja voidaan käyttää tarvittaessa ongelmatilanteiden selvittelyyn. Käytön aikaisen mittatiedon hankkimiseen kuluneet kustannukset maksavat itsensä varmasti takaisin, kun voidaan välttää turhia reklamaatiokustannuksia.

## 9 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tarkasteltiin värähtelyä ja sen mittaamista pyörivissä koneissa, erityisesti teollisuuspuhaltimissa. Työn alkuosassa käsitellään aihetta yleisesti esittelemällä laitteiden, toimintatapojen sekä raja-arvojen teoriaa ja annettuja suosituksia. Työn lopussa tutustutaan Fläkt Woods Oy:n Espoon yksikön mittaustoimintaan ja pohditaan sen kehittämistä.

Tietoa koneiden värähtelymittauksista on saatavilla runsaasti ja aihe on valtavan laaja. Standardien suositukset ovat hyvin yleisluonteisia, ja alan yritykset soveltavatkin niitä omiin tarpeisiinsa muokaten. Puhallin yksikkönä sisältää myös paljon erilaisia komponentteja, joiden kunnonvalvontaan ja huoltoon ei värähtelyllä ole joko suoraa tai edes välillistä vaikutusta.

Työssä ongelmia aiheutti tarkan puhaltimia koskevan tiedon löytäminen laajasta kunnonvalvontaa käsittelevästä aineistosta. Haastavaa oli myös huomioida teollisuuspuhaltimien vaihtelevat käyttökohteet ja olosuhteet. Puhaltimet suunnitellaan ja räätälöidään erilaisten asiakkaiden prosesseihin, joten liian yksityiskohtaisten yleisten toimintatapojen määrittäminen kunnonvalvontaan ei ole käytännöllistä.

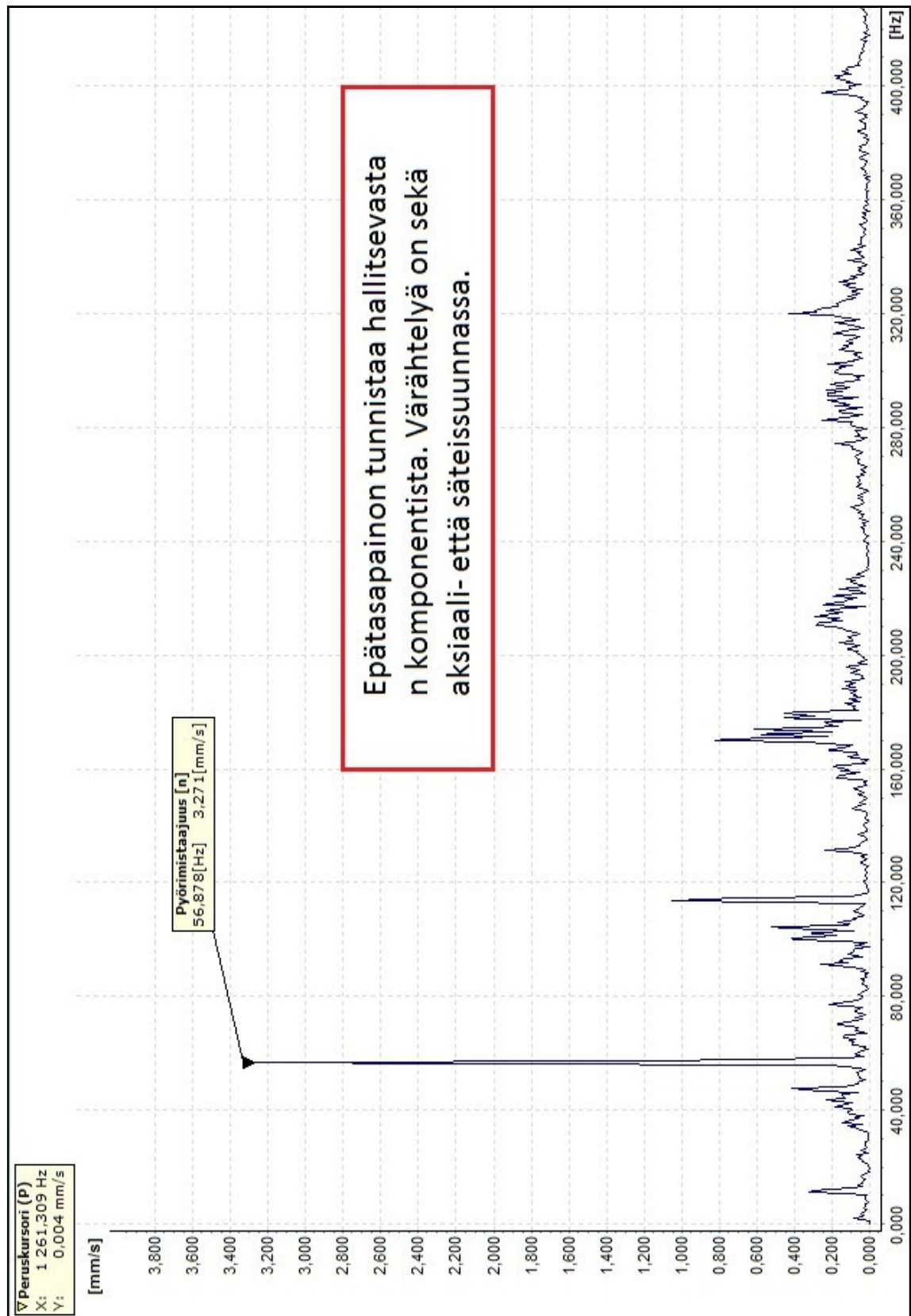
Värähtelyn perusasioden edes kohtalainen hallitseminen auttaa kaikkia puhaltimen valmistusprosessissa mukana olevia tahoja ymmärtämään tuotetta ja sen käyttäytymistä paremmin. Tätä työtä voidaan hyödyntää näiden värähtelyn pohjatietojen omaksumisessa tuotannon eri vaiheissa sekä pohjana syvemmän, tuotekohtaisen tiedon keräämisessä tulevaisuudessa.

## Lähteet

1. Järviö, Jorma – Piispa, Taina – Parantainen, Timo – Åström, Thomas. 2007. Kunnossapito. 4. uudistettu painos. Helsinki. KP-Media Oy.
2. SFS-EN 13306. 2010. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia. 2.painos. Metaliteollisuuden Standardisoimisyhdistys ry.
3. PSK 6201. 2003. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. 2. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
4. Nohynek, Petri – Lumme, Veli Erkki. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Rajamäki. KP-Media Oy.
5. Mikkonen, Henry – Miettinen, Juha – Leinonen, Pertti – Jantunen, Erkki – Kokko, Voitto – Riutta, Erkki – Sulo, Petri – Komonen, Kari – Lumme, Veli Erkki – Kautto, Juha – Heinonen, Kari – Lakka, Sami – Mäkeläinen, Risto. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. 1 painos. Helsinki. KP-Media Oy.
6. ABB:n TTT-käsikirja 2000-7. Luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. ABB Oy, 2000. [http://heikki.pp.fi/abb/230\\_0007.pdf](http://heikki.pp.fi/abb/230_0007.pdf). Luettu 29.5.2011.
7. Asp, Risto – Tuominen, Timo – Hyppönen, Heikki. Kunnossapito menestystekijä. Kunnonvalvonta. Opetushallitus. Verkko-oppimateriaalit. Kunnossapitoyhdistys ry. <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet.html>. Luettu 27.6.2011.
8. Hautala, Juha. Detector III: Tasapainotuskoulutus. Opetusmoniste. 2011. FAG Industrial Services.
9. Hoikkanen, Juhani. 2007. Värähtelyanalyysi taso-1. Värähtelyn mittausanturit. Opetusmoniste. SKF Reliability Maintenance Institute.
10. PSK 5701. 2002. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. 5. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
11. Crawford, Arthur. 1992. The Simplified Handbook of Vibration Analysis Volume 1: Introduction to Vibration Analysis Fundamentals. Knoxville, TN. Computational Systems, Inc.
12. Peltonen, Hannu – Perkkiö, Juha – Vierinen, kari. 2007. Insinöörin (AMK) FYSIKKA OSA II. 7. painos. Lahti. Lahden Teho-Opetus Oy. 2001.
13. Suomen standardoimisliitto. SI Opas Suureet ja yksiköt. SI-mittayksikköjärjestelmä. 5. painos. Helsinki. SFS.
14. Villanen, Ari – Luukkanen, Pekka. 1998. Kunnossapitokoulu. Kunnossapito –lehden erikoisliite. Liukulaakerien kunnonvalvonta. 2/1998, N:o 44.
15. Larsson, Lars Ove. 2011. President. Vikon Vibrationskonsult AB. Käyttöönottokoulutus Fläkt Woods Oy:n tehtaalla Espoossa 27.4.2011.
16. PSK 5707. 2011. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. 5. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
17. SFS 4968. 1983. Jäykät pyörivät kappaleet. Tasapainotustarkkuus. Suomen standardisoimisliitto.
18. SKF. 2009. Linjaus. <http://www.skf.com/files/872463.pdf>. Luettu 7.6.2011.
19. PSK 8301. 2007. Akselin linjaus. PSK Standardisointiyhdistys ry.
20. PSK 5708. 2003. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Rakenteelliset värähtelyominaisuudet. 2. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
21. Impact Bearings. 2009. Engineering Data. Radial & Axial Play, Raceway Curvature & Contact Angle. <http://www.impactbearing.com/engineeringdata.html>. Luettu 9.6.2011.
22. Hoikkanen, Juhani. 2007. Liukulaakerien kunnonvalvonta. Liukulaakerin viat ja niiden havaitseminen. Opetusmoniste. SKF Reliability Systems.
23. Taylor, James. 2003. The vibration analysis handbook. 2. painos. Liverpool. VCI

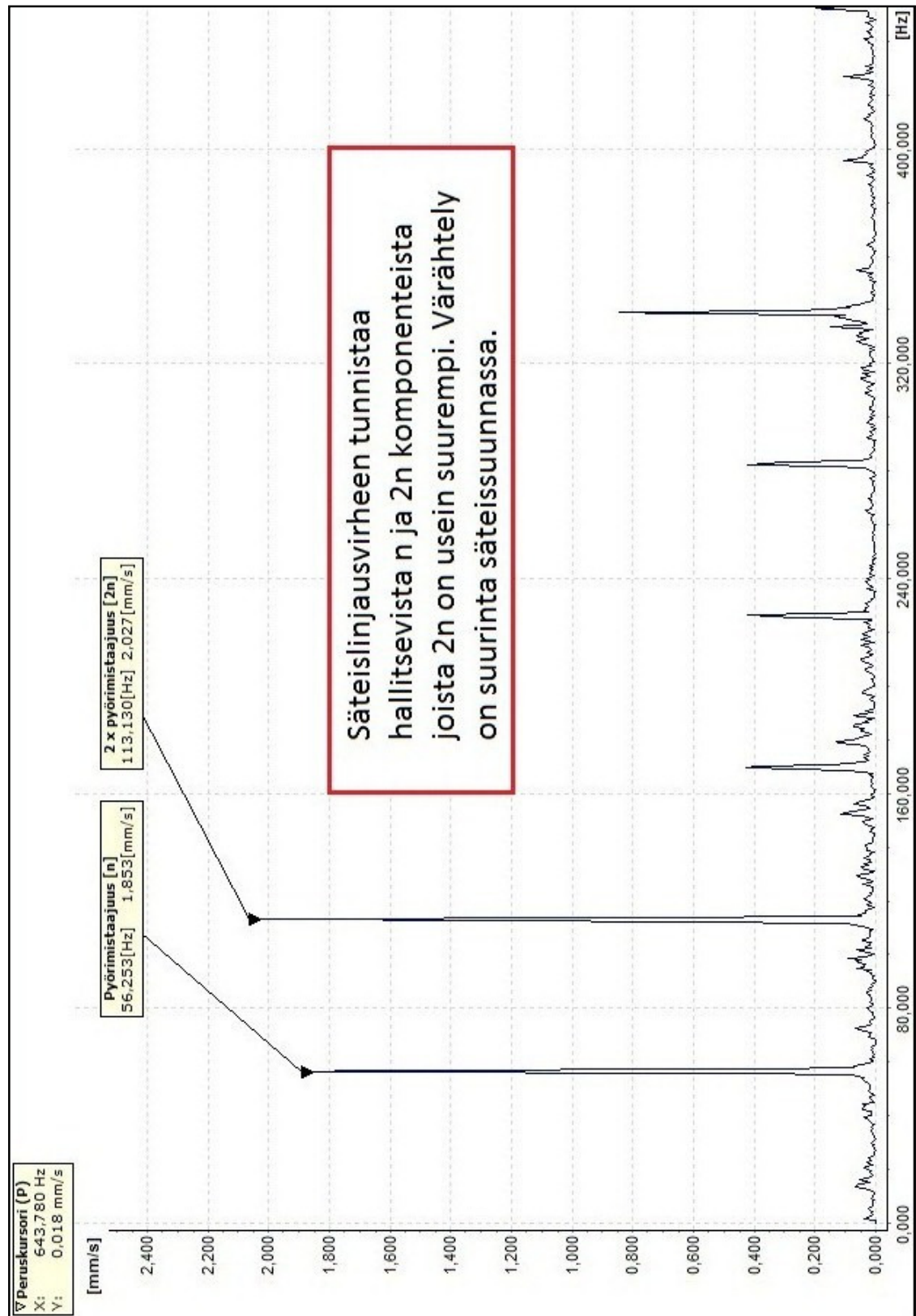
24. PSK 5704. 2002. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Vastaanottotarkastus ja tärinärasitusrajat. 6. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
25. Puhallintekninen käsikirja. 2008. Fläkt Woods Oy.
26. Lahti, Tapio – Nevala, Kalervo – Vähänikkilä, Aki – Järviluoma, Markku. 2002. Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneissa. Liite 2: Kuljetusvälineiden vaimennusratkaisut. Espoo. VTT.
27. AALTO yliopisto Sähkötekniikan korkeakoulu / Systeemitekniikka. 2011. Analogisen säädön verkkokurssi. Siirtofunktio.  
<http://autsys.tkk.fi/pub/control.tkk.fi/Kurssit/Verkkokurssit/AS-74.2111/mallit/oppitunti3/siirtofunktio.html>. Luettu 15.6.2011.
28. Hoikkanen, Juhani. 2007. Värähtelyanalyysi taso-1. Rakenteiden dynaamiset ominaisuudet. Opetusmoniste. SKF Reliability Maintenance Institute.
29. PSK 5714. 1998. Kunnonvalvonta, värähtelyvalvonnan huomioonotto konehankinnassa. PSK Standardisointiyhdistys ry.
30. PSK 5705. 2006. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. 5. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
31. ISO 10816-3. 2009. Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3. International Organization for Standardization.
32. PSK 5702. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. 3. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
33. PSK 5710. 2010. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittalaitteiden tyypit ja valinta. 3. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
34. Hautala, Juha. Tuotekoulutus Detector III. Opetusmoniste. 2011. FAG Industrial Services.
35. Lepistö, Einari. 2011. AEL – Kunnossapidon mekaniikan värähtelymittaukset - seminaari. Suojausjärjestelmät – teknologia ja käyttökohteet. SKF Reliability Systems.
36. Keinänen, Toimi – Kärkkäinen, Pentti – Lähetkangas, Markku – Sumujärvi, Matti. 2007. Automaatiojärjestelmien logiikat ja ohjaustekniikat. 1. painos. Helsinki. WSOY Oppimateriaalit Oy.
37. Liljaniemi, Antti. 2008. Anturit automaatiossa. Opetusmoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
38. PSK 5703. 2006. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. 4. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
39. Hoikkanen, Juhani. 2007. Liukulaakerien kunnonvalvonta: värähtelyn mittausanturit. Opetusmoniste. SKF Reliability Systems.
40. PCB Group. 2011. Introduction to Piezoelectric Accelerometers. PCB Piezoronics.  
[http://www.pcb.com/techsupport/tech\\_accel.php](http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.php). Luettu 28.6.2011.
41. Honkanen, Harri. 2011. Anturit. Käsitteitä. Oppimateriaali. Kajaanin Ammattikorkeakoulu.  
[http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/ELE\\_A%20N%20T%20U%20R%20I%20T.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/ELE_A%20N%20T%20U%20R%20I%20T.pdf). Luettu 18.5.2011.
42. Kärhä, Petri. 2006. Luento 2: Kohina mittauksissa. Oppimateriaali. Aalto-yliopisto. Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos. [https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/s-108.2010/luennot/S-108\\_2010\\_luentokalvot\\_-\\_kohina.pdf](https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/s-108.2010/luennot/S-108_2010_luentokalvot_-_kohina.pdf). Luettu 21.5.2011.
43. PSK 5713. 1998. Kunnonvalvonta, värähtelymittaus. Mittausjärjestelmän kalibrointi. PSK Standardisointiyhdistys ry.
44. PSK 5706. 2002. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Valvontamenetelmät. PSK Standardisointiyhdistys ry.

45. Henttonen, Juhani – Peltomäki, Jaana – Uusitalo, Seppo. 2006. Tekniikan matemaattikka 2. 2. painos. Helsinki. Edita Publishing Oy.
46. DLI Engineering. 2011. Vibration Reference Guide. AZIMA DLI.  
<http://www.dliengineering.com/downloads/vibrationreferenceguide.pdf>. Luettu 25.6.2011.
47. Hautala, Juha. Case tapauksia. Opetusmoniste. 2011. FAG Industrial Services.
48. Hoikkanen, Juhani. 2007. Värähtelyanalyysi taso-1. Hammasvaihteiden kunnonvalvonta. Opetusmoniste. SKF Reliability Maintenance Institute.
49. Fläkt Woods Oy. Tuotteet. Teollisuuspuhaltimet.  
<http://www.flaktwoods.fi/tuotteet/teollisuuspuhaltimet/>. Luettu 28.6.2011.
50. Puttonen, Mikko. 2009. 21. Tietoa Exvel puhaltimesta. Työohje. Fläkt Woods Oy.
51. SFS-ISO 2372. 1992. Pyörimisnopeusalueella 10...200 Hz toimivien koneiden värähtely. Värähtelyn arvioinnin perussäännöt. Metalliteollisuuden standardisoimiskeskus.
52. Schaeffler Technologies GmbH & Co. 2011.  
<http://www.fag.de/content.fag.de/en/index.jsp>. Luettu 29.6.2011.
53. VIKON Vibrationskonsult AB. 2011. <http://www.vikon.se/index.php>. Luettu 29.6.2011.
54. VIKON Vibrationskonsult AB. 2005. PEMAC® Report Users manual. Version 1.1.
55. VIKON Vibrationskonsult AB. 2009. ROBAL® Rotor Balancing Software. Users Reference Manual. Version 5.3.
56. SPM Instrument AB. 2010. VibChecker. Technical specifications.  
<http://www.spminstrument.fi/data/pdf/td/TD308B.pdf>. Luettu 29.6.2011.

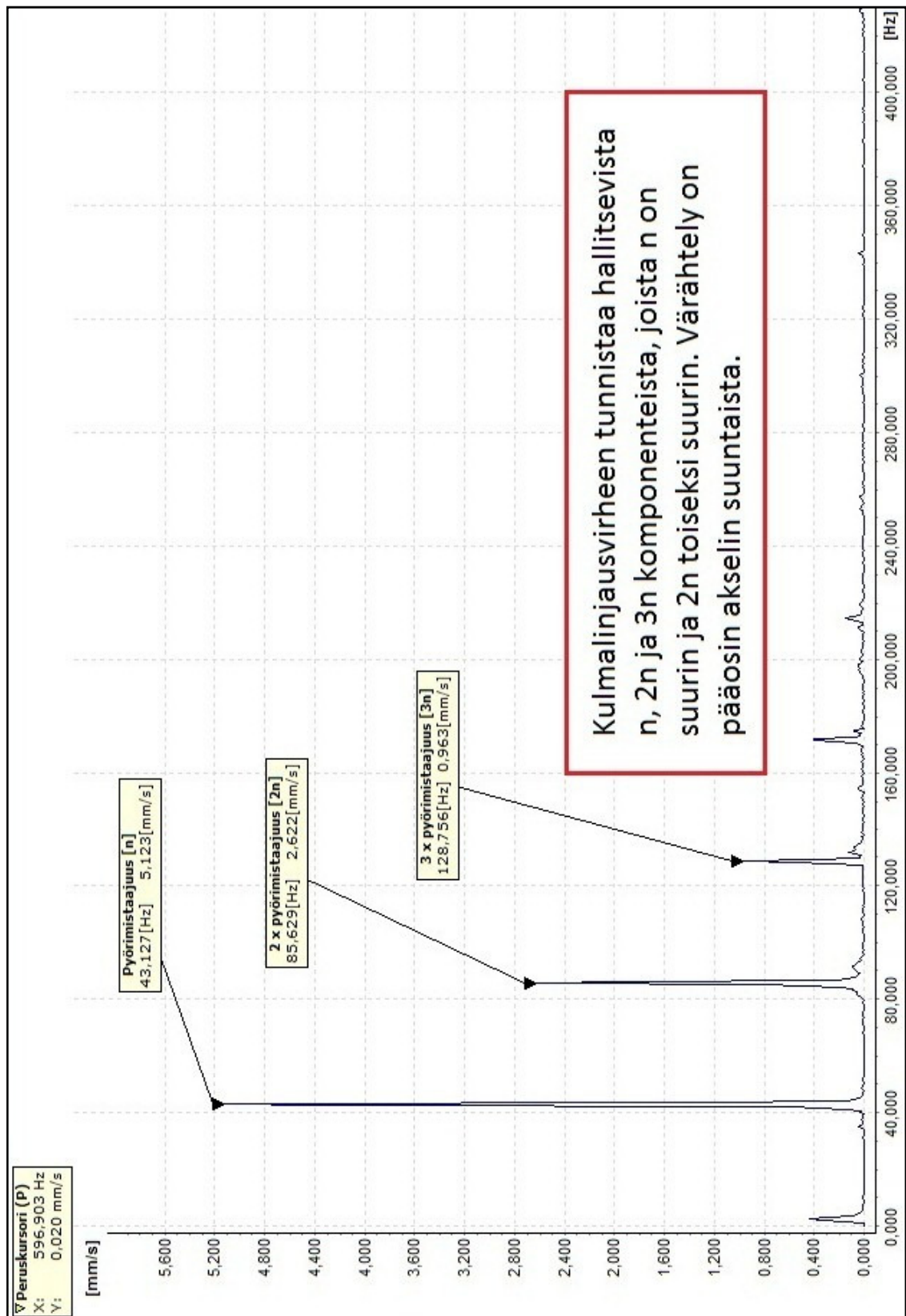
**Liite 1: Vianmäärityksen esimerkkejä****Epätasapaino**



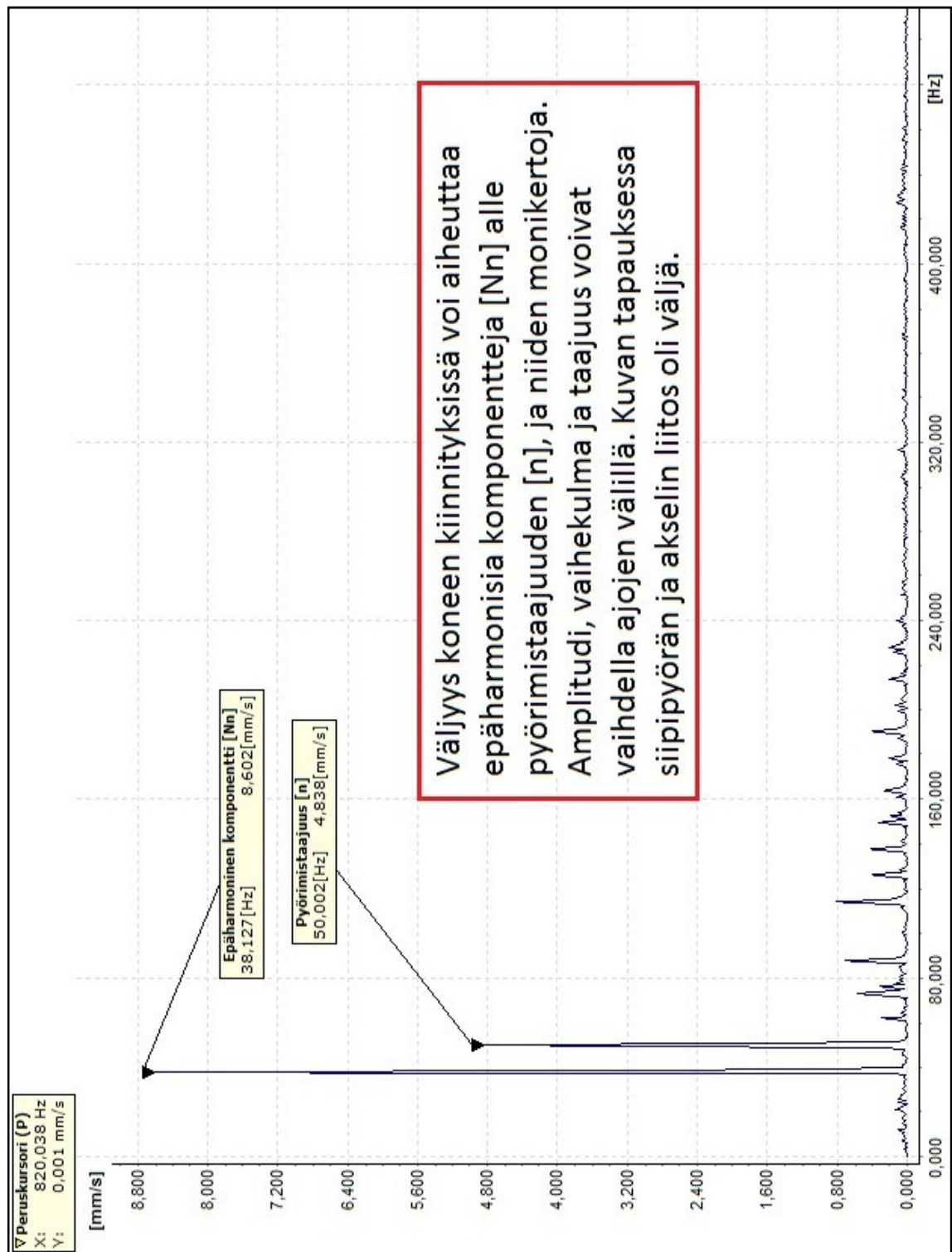
## Säteislinjausvirhe



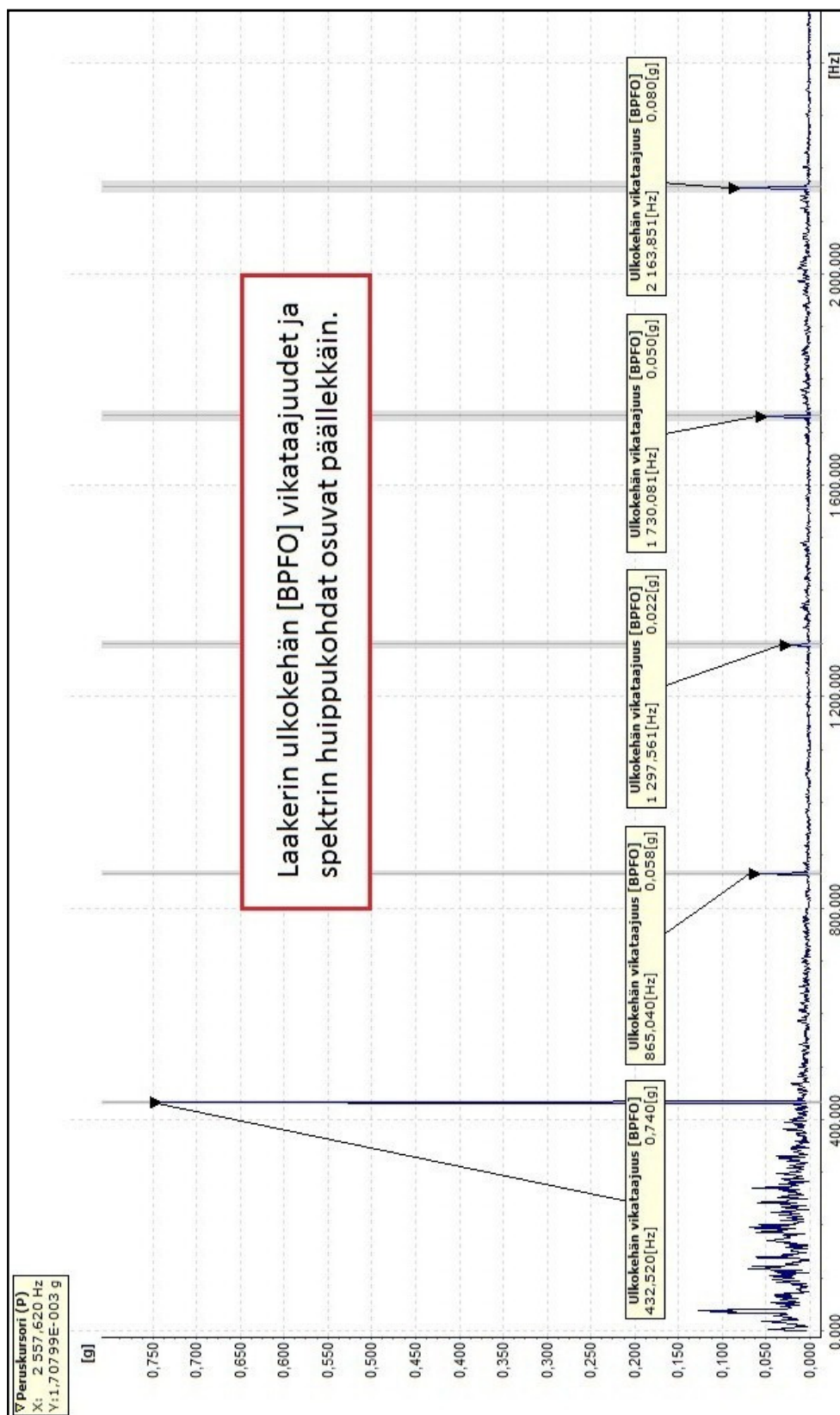
## Kulmalinjausvirhe



## Mekaaninen väljyys



Laakerivika (ulkokehällä)





## Lapataajuus

