

Miitta Somero

## **KUNNOSSAPIDON VÄRÄHTELYMITTAUSTEN KEHITTÄMINEN**

Opinnäytetyö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ala  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Kevät 2014



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikka
Tekijä(t) Miitta Somero	
Työn nimi Kunnossapidon värähtelymittausten kehittäminen	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Kunnossapito Tuotannon johtaminen Virtuaalituotanto	Toimeksiantaja Paroc Oy Ab
Aika Kevät 2014	Sivumäärä ja liitteet 57+2
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli kehittää kunnossapidon tekemiä värähtelymittauksia. Työn toimeksiantajana toimi Paroc Oy Ab, joka on kansainvälinen kivivillaeristeiden valmistaja. Työ suoritettiin Paroc Oy Ab:n Oulun kivivillatehtaalla. Työn tarkoituksena oli kartoittaa tämän hetkinen värähtelymittausten tilanne sekä tehdä kehityssuunnitelma.</p> <p>Värähtelymittaukset ovat kunnonvalvonnan mittausmenetelmä, joka antaa tietoja laitteiden kunnosta. Niiden avulla laitteiden vioista ja vikojen laadusta saadaan tietoja jo aikaisessa vaiheessa, jolloin kunnossapidon suunnitelmalliseen toimintaan jää enemmän aikaa käytettäväksi.</p> <p>Työn alussa tutustuttiin värähtelymittauksien tekemiseen. Tehtaan mittauspiirissä olevat laitteet selvitettiin, sekä tutustuttiin käytettävään mittauslaitteeseen ja mittaustulosten analysointiohjelmaan. Kehityssuunnitelmaa tehtäessä mittausten kohteiksi soveltuvat laitteet selvitettiin laitetietokannan, kriittisyysanalyysin ja henkilöhaastattelujen perusteella.</p> <p>Työn lopputuloksena mittausreittiä kehitettiin ja lisättiin reitille uusia laitteita. Condmaster Ruby analysointiohjelmaan tutustuttiin paremmin ja ohjelman laitekanta päivitettiin ajan tasalle. Lisäksi työssä selvitettiin analysointiohjelman käyttömahdollisuuksia yhdessä mittauslaitteen kanssa. Työssä selvitettiin myös uuden mittauslaitteen hankintaa, sekä sen ja analysointiohjelman yhteiskäytön mahdollisuuksia.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Värähtelymittaukset, mekaaninen värähtely, iskusysäysmenetelmä
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto



School School of Engineering	Degree Programme Mechanical and Production Engineering
Author(s) Miitta Somero	
Title Developing Vibration Measurements	
Optional Professional Studies Maintenance Production leadership Virtual Production	Commissioned by Paroc Oy Ab
Date Spring 2014	Total Number of Pages and Appendices 57+2
<p>The goal of this thesis was to develop the vibration measurements performed by the maintenance department of the commissioner for the thesis, Paroc Oy Ab, an international manufacturer for stone wool. The thesis was completed at the stone wool factory of Paroc Oy Ab, located in Oulu. The purpose was to map out the current situation of vibration measurements in the factory and to create a development plan.</p> <p>Vibration measurements are a method for monitoring the state of machinery. They are helpful in getting information about malfunctions and their quality at an early stage. This way, there is more time to perform designed maintenance and repair operations regarding the malfunction.</p> <p>At the beginning of the process performing vibration measurements was studied. The machinery to be measured at the factory was examined. The current measurement equipment being used, as well as the analyzing software for the results was also familiarized with. While creating the development plan, it had to be researched which machines qualified as targets for the measurements. The information for this was gathered by using the machine database, criticality analysis, and interviews.</p> <p>As a result, the route for performing the measurements was improved, and new machines were added to the route. More knowledge about the analyzing software Condmaster Ruby was gathered, and the software machine database was updated to the latest version. The possibilities for using the analyzing software together with the measurement equipment were examined. Purchasing new equipment for measuring was also looked into, as well as its compatibility with the analyzing software.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Vibration measurement, mechanical vibration, sbock pulse method
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## ALKUSANAT

Insinööriyön tekeminen tuli työharjoittelun jälkeen ajankohtaiseksi. Työhön aihe löytyi samasta työympäristöstä, jossa työharjoittelunkin suoritin. Tämä insinööriyö on ollut iso ja haastava kokonaisuus tehtäväksi.

Haluan kiittää Paroc Oy Ab:n Tapio Franttia mielenkiintoisesta ja haastavasta insinööriyön-aiheesta sekä ohjeista ja avusta opinnäytetyötä tehdessä. Haluan myös kiittää Paroc Oy Ab:n kunnossapidon työntekijöitä, jotka tutustuttivat minut värähtelymittauksiin sekä auttoivat värähtelymittausten kehitystyössä. Haluan kiittää opettaja Sanna Leinosta, joka toimi työni ohjaajana Kajaanin ammattikorkeakoululta ja on auttanut sekä ohjeistanut minua työn eri vaiheissa. Lisäksi haluan kiittää opettajaani Eero Soinista Kajaanin ammattikorkeakoululta kielellisestä ohjauksesta. Suuri kiitos myös kaikille muille, jotka ovat auttaneet ja kannustaneet minua tämän työn tekemisessä.

Kajaanissa, 24.4.2014

Miitta Somero

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 ERISTEVILLAN VALMISTUSPROSESSI	2
3 KUNNONVALVONTA	3
4 MEKAANINEN VÄRÄHTELY	6
4.1 Värähtely	6
4.2 Värähtelymittaussuureet	7
4.3 Värähtelymittausanturit	9
4.3.1 Siirtymäanturit	9
4.3.2 Nopeusanturit	10
4.3.3 Kiihtyvyyssanturit	11
4.4 Värähtelyä aiheuttavat tekijät	12
4.4.1 Epätasapaino	12
4.4.2 Linjausvirhe	13
4.4.3 Laakerivauriot	13
4.4.4 Mekaaninen väljyys	14
4.4.5 Koneen viallinen kiinnitys	15
5 VÄRÄHTELYMITTAUKSET	16
5.1 Matalataajuiset värähtelymittaukset	16
5.2 Korkeataajuiset värähtelymittaukset	18
5.3 Mittaussuureen ja anturin valinta	21
5.4 Värähtelymittausanturin kiinnityspaikat ja -tavat	22
5.4.1 Anturien kiinnityspaikan valinta	22
5.4.2 Anturien kiinnitystavat	25
5.5 Värähtelymittauslaitteet	26
5.6 Mittausaikaväli	28
5.7 Värähtelymittausten valvontamenetelmät	30
5.7.1 Tunnuslukuvalvonta	30
5.7.2 Spektrivalvonta eli taajuusanalyysi	31
5.8 Värähtelymittaustoiminnan suunnittelu	32

6 ALKUTILANNE OULUN TEHTAALLA	35
6.1 Mittauslaite, Shock Pulse Tester T2001	35
6.2 SPM:n analysointiohjelma, Condmaster Ruby	36
6.3 Mittauskohteet ja mittausmenetelmät	38
7 KEHITYSSUUNNITELMA	43
7.1 Mittausreitin ja mittausmenetelmien kehitys	43
7.2 Mittauslaitteen mahdollisuudet	46
7.3 Condmaster Ruby -ohjelman mahdollisuudet	48
7.4 Tulevaisuuden kehitystarpeet	50
8 TYÖN TULOKSET	53
9 YHTEENVETO	55
LÄHTEET	56
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Paroc Oy Ab on kansainvälinen kivivillaeristeiden valmistaja sekä pohjoismaiden johtava eristetoimittaja. Tehtaita yrityksellä on viidessä eri maassa: Suomessa, Ruotsissa, Liettuassa, Puolassa ja Venäjällä. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Helsingissä, ja myyntiyhtiöitä sekä edustustoa yrityksellä on 14 eri maassa. Paroc Oy Ab:illa on kolme liiketoiminta-aluetta: rakennuseristeet, tekniset eristeet ja paneeliratkaisut.[1.][2.]

Parocilla on Suomessa kolme tehdasta, jotka sijaitsevat Paraisilla, Lappeenrannassa ja Oulussa. Oulun tehdas on aloittanut toimintansa 1969. Tehtaalla on yksi tuotantolinja, jolla valmistetaan pääasiassa rakennuseristeitä.

Insinööriyön tavoitteena oli kehittää Paroc Oy Ab:n Oulun tehtaan kunnossapidon värähtelymittauksia. Työn tarkoituksena oli kartoittaa värähtelymittausten tämän hetkinen tilanne sekä luoda kehityssuunnitelma.

Alkutilanteen kartoituksessa tuli selvittää käytettävä värähtelymittausmenetelmä sekä mitattavat mittausparametrit. Alkutilanteen kartoituksessa tuli myös selvittää värähtelymittausjärjestelmän piirissä olevat mitattavat laitteet sekä mittausaikaväli. Aluksi työssä tuli kuitenkin tutustua yleisesti värähtelymittauksiin sekä ottaa selvää eri värähtelymittausmenetelmistä.

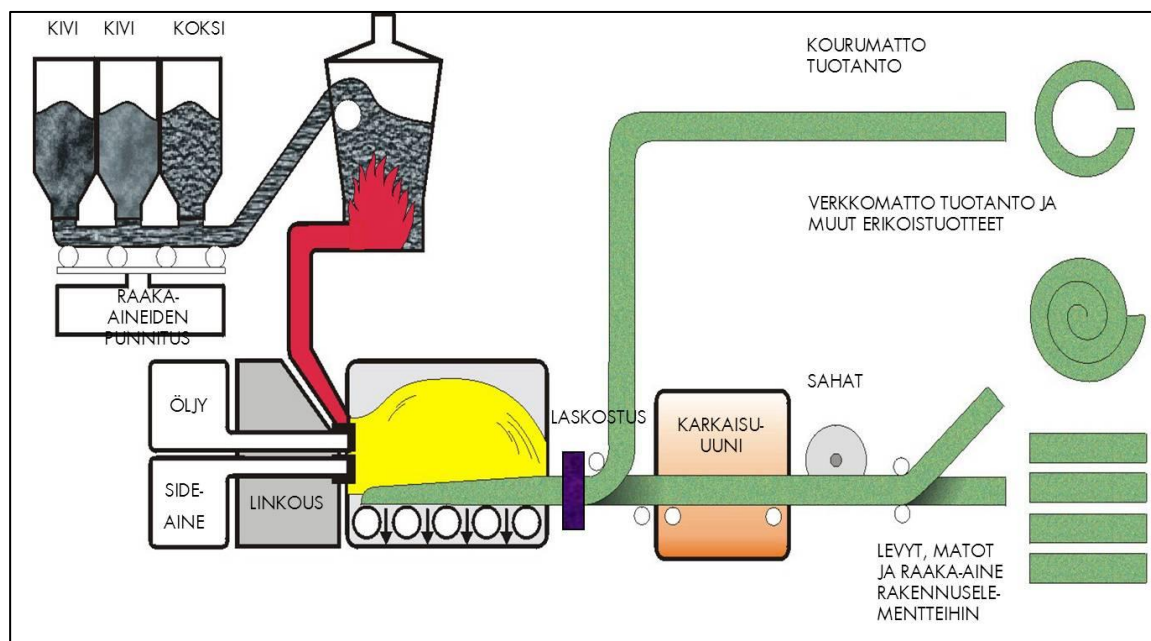
Työssä tutustuttiin käytettävään mittauslaitteeseen ja analysointiohjelmaan, sekä niiden käyttömahdollisuuksiin. Laitekartoitusta tarkasteltiin laitetietokannan ja tehtaalle tehdyn kriittisyysanalyysin avulla.

Kehityssuunnitelman tekeminen aloitettiin alkutilanteen kartoituksen jälkeen. Kehityssuunnitelmassa mietittiin, kuinka värähtelymittauksia tulisi tehdä sekä mitä parametreja mitata. Työssä selvitettiin, onko järkevää mitata tällä hetkellä mittauskohteina olevia laitteita ja onko syytä mitata muita laitteita, kuin jo mitattavat laitteet.

Lisäksi työssä selvitettiin, millaista analysointia tehtävät värähtelymittaukset tarvitsevat ja voidaanko nykyisellä mittauslaitteella ja analysointiohjelmalla suorittaa halutut mittaukset ja analysoinnit. Työssä selvitettiin myös uuden mittauslaitteen tarvetta sekä laitemalleja.

## 2 ERISTEVILLAN VALMISTUSPROSESSI

Kivivillan valmistuksessa raaka-aineena käytetään sopivassa suhteessa eri kivilajeja. Kivet sulatetaan uunissa korkeassa lämpötilassa koksien tai sähkön avulla. Muodostunut kivilava johdetaan lingon kehille, jotka pyörivät erittäin nopeasti. Lingolla keskipakovoiman vaikutuksesta muodostuu ohutta kivivillakuitua. Linkouksen eli kuidutuksen yhteydessä lisätään sideainetta. Sideaine koostuu muun muassa pölynsidontaöljystä, ammoniakista ja vedestä. Kuidut kerätään villamatoksi, joka laskostetaan haluttuun tiheyteen ja paksuuteen. Tämän jälkeen villamatto ohjataan karkaisu-uuniin, jossa villa karkaistetaan niin, että sideaine kovettuu. Villa sahataan määrämittäiseksi ja tarvittaessa uritetaan tai pinnoitetaan. Lopuksi villalevyt pakataan levypaketeiksi, lavapakkauksiksi tai mattorulliksi, sekä varastoidaan ennen kuljetusta asiakkaille. Eristyskourujen valmistuksessa villamatto ohjataan ennen karkaisua erilliseen kouruvalmistuslaitteeseen. Kuvassa 1 on esitetty kivivillan valmistuksen prosessikaavio. [3.][4.]



Kuva 1. Kivivillan valmistuksen prosessikaavio.[2.]



### 3 KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonta on kunnossapidon osa-alue. Kunnonvalvonnan havaintojen avulla voidaan selvittää koneiden toimintakunto ja voidaan etsiä oireilevia vikoja. Kunnonvalvonnan avulla kunnossapitotyöt pystytään suorittamaan oikea-aikaisesti eli silloin, kun koneiden kunto sitä vaatii. Kunnonvalvonnassa kohteen toimintaa tarkkaillaan ja mitataan määräajoin tai jatkuvasti. Kunnonvalvonnan tavoitteena on alkavan vikaantumisen havaitseminen ja korjaaminen toimintakyvyn ylläpitämiseksi. Kunnonvalvonnan avulla saavutetaan suunnitelmallisuutta kunnossapitoon, tuottavuuden kasvua, seisokkiaikojen parempaa hyödyntämistä ja koneiden pidentyneitä elinaikoja. [5, s. 11–13.] [6, s. 25, 32–33.] [7, s. 50.]

Kunnonvalvontaan kuuluu aistein ja mittauslaittein tehtyjä tarkastuksia, valvontaa sekä mitaustulosten analysointia. Aistihavaintoihin perustuvassa kunnonvalvonnassa voidaan kuunnella eri ääniä ja kokeilla kädellä esimerkiksi koneen osien lämpöä ja tärinää. Yleisin kunnonvalvonnassa käytetty mittausmenetelmä on värähtelymittaukset. Kunnonvalvonnan muita mittausmenetelmiä ovat muun muassa lämpötilamittaukset, kulumishiukkasanalyysit ja hyötysuhdemittaukset. [5, s. 13, 17–23.]

Mittaustoimintaan panostamalla pystytään säästämään kustannuksia, sillä oikea-aikaisella kunnonvalvonnalla voidaan vähentää suunnittele mattomia seisokkeja, pienentää varaosavaroja sekä välttää koneiden turhia avaamisia. Mittaavaa kunnonvalvontaa tehdään, koska tuotantolaitoksilla varaosavaraostot ovat nykyään niin vähäiset ja seisokkitunnit ovat kalliita suurista tuotantomääristä johtuen. Lisäksi tuotantolinjojen koneiden pyörintänopeudet ovat kasvaneet, joten viat kehittyvät entistä nopeammin. Laitteiden rakenteet myös valmistetaan nykyisin niin keveiksi, että tärinävalvonta on tärkeää rakenteiden kestojen kannalta, joten mittaava kunnonvalvonta on entistä tärkeämmässä asemassa. Tehtaissa aistienvaarainen kunnonvalvonta on vähentynyt huomattavasti huolto- ja käyttöhenkilökuntien vähenemisen myötä. Lisäksi työympäristöt ovat meluisia, likaisia ja vaarallisia, joten kunnonvalvonnan mittausmenetelmien käyttöönotto on yhä tärkeämpää. [5, s. 13.]

Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset ovat ennakoivan kunnossapidon kannalta tietoa antavin mittausmenetelmä. Värähtelymittausten avulla mahdollisesta viasta ja sen laadusta saadaan tieto jo aikaisessa vaiheessa. Kun tieto viasta saadaan jo aikaisessa vaiheessa, jää kunnossapidon suunnitelmalliseen toimintaan enemmän aikaa. Teollisuudessa käytetään värähtelymittauksia pyörivien laitteiden ja koneiden kunnonvalvonnassa, sillä kaikki pyörivät laitteet

värähtelevät käynnissä ollessaan ja laitteiden viat ilmenevät aiheuttaen lisävärähtelyä. Ajan saatossa voimistunut värähtely voi ilmentää, että viat ovat kasvaneet mekaanisiksi vaurioiksi [8, s. 2]. Erilaiset viat aiheuttavat erilaisia värähtelyjä. Värähtelymittauksia tekevän henkilön täytyy suhtautua värähtelyjen mittaamiseen huolellisesti, koska herätteitä tapahtuu myös normaalin käynnin aikana, kuten esimerkiksi erilaisten venttiilikoneistojen liikkeet eli laitteet aiheuttavat itsenäisesti normaalista poikkeavaa värähtelyä, jota kokematon mittaaja saattaa luulla viaksi. Herätteeksi kutsutaan sitä voimaa, joka saa rakenteen värähtelemään. Herätteet aiheutuvat laitteen normaalista toiminnasta, valmistuksen tai asennuksen epätarkkuuksista tai vikaantumisista. Värähtelymittauksissa vianmääritys perustuuakin herätteiden ja niiden muutosten selvittämiseen. Kunnonvalvonnan värähtelymittausten tuloksena syntyy paljon mittaus tuloksia, joiden analysointiin tarvitaan oikeanlaiset analysointiohjelmat ja osaava mittaushenkilöstö [5, s. 14]. [9, s. 223–225.][5, s. 17.]

Kunnonvalvonnan kannalta värähtelymittauksia tehdään kahdesta syystä: koneenosien kuntoa voidaan arvioida luotettavasti tulkitsemalla oikein koneista mitattavaa tärinää ja koska värähtelyn vaikutukset muihin laitteisiin ja rakenteisiin on haitallista. Värähtelyn haitallisuus näkyy esimerkiksi lisääntyneinä rasituksina, rakenteiden rikkoutumisina, käyttöiän alenemisenä, lopputuotteen laadun huononemisenä, meluna tai muuna ergonomisena häirtana. [5, s. 40.]

Värähtelymittaukset suoritetaan käyttäen joko kiinteästi asennettua valvontajärjestelmää tai mukana kannettavaa mittauslaitetta. Värähtelymittausmenetelmät voidaan jakaa matalataajuisiin ja korkeataajuisiin värähtelymittausmenetelmiin. Matalataajuisien värähtelymittausten avulla valvotaan koneiden yleistärinää ja korkeataajuiset värähtelymittaukset puolestaan keskittyvät koneiden tärinän yksityiskohtaiseen valvontaan sekä laakereiden kunnonvalvontaan. Taulukossa 1 on esitetty värähtelymittauksissa käytettävät taajuusalueet sekä niiden nimitykset. [9, s. 247.][5, s. 17–18.]

Taulukko 1. Taajuusalueet ja niiden nimitykset [9, s. 247].

Nimitys	Taajuusalue
Mekaaninen värähtely	0–20 kHz
Ultraääni	20 kHz–80 kHz
Akustinen emissio	80 kHz–1 GHz

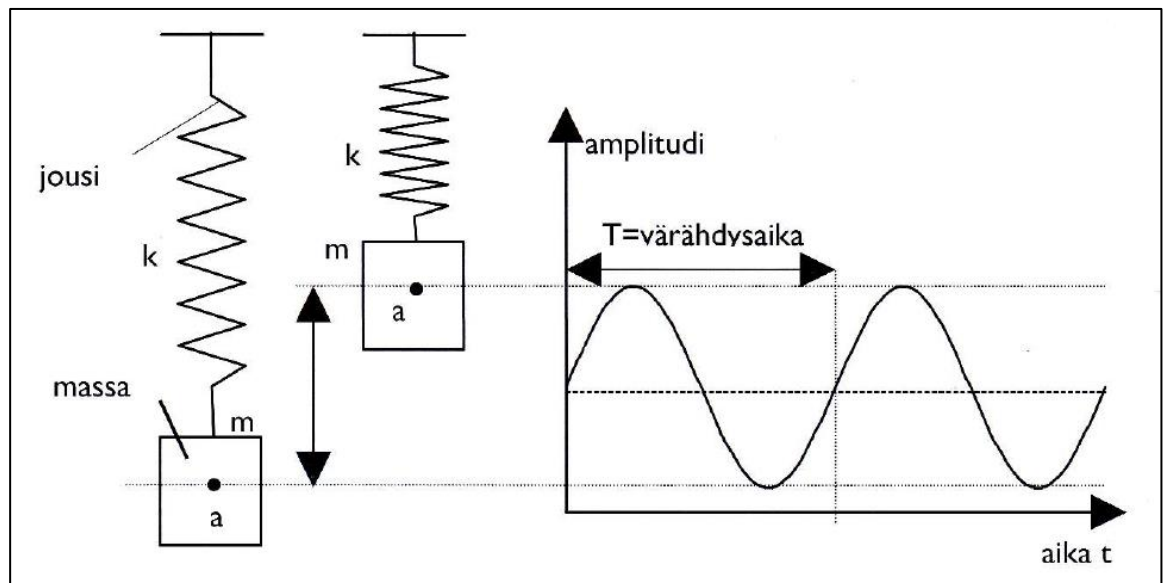
Matalataajuiset värähtelymittausmenetelmät kuuluvat mekaanisen värähtelyn taajuusalueelle. Korkeataajuiset värähtelymittausmenetelmät jakautuvat kahdelle värähtelytaajuudelle: ultra-ääneen ja akustiseen emissioon. [9, s. 247.]

## 4 MEKAANINEN VÄRÄHTELY

### 4.1 Värähtely

Värähtely on rakenteen, koneen tai koneenosan liikettä tasapainoasemansa ympärillä. Värähtely tarvitsee jatkuakseen voiman, joka vaihtelee koko ajan suuntaa ja/tai suuruutta. Vapaaksi värähtelyksi kutsutaan värähtelyä, johon ei vaikuta lainkaan ulkoisia voimia. Vapaa värähtely vaimenee ajan kuluessa ja lopulta katoaa. Pakkovärähtelyksi kutsutaan värähtelyä, johon vaikuttaa värähtelyä ylläpitävä voima. [5, s. 40–44.]

Värähdysliike on aaltoliikettä, joka toistuu jaksoittain. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertainen esimerkki värähdysliikkeestä. Esimerkissä on jousi, jonka päähän on kiinnitetty massa. Kuvassa esitetyn jousi-massasysteemin toteuttama värähdysliike on esitetty aikatasossa, jossa vaaka-akselilla on esitetty aika ja pystyakselilla amplitudi. Amplitudi kertoo sinimuotoisen käyrän maksimiarvon [10, s. 7]. [9, s. 226.]



Kuva 2. Jousi-massan toiminta aikatasossa [9, s. 226].

Värähdysliike toteutuu, kun massa  $m$  liikautetaan tasapainoasemastaan. Massaan on merkitty massapiste  $a$ , joka värähtelee massan tasapainoaseman molemmin puolin. Massa käy värähtelyliikkeen aikana kerran maksimissa positiivisella sekä negatiivisella puolella, jonka jälkeen värähtely jatkuu samanmuotoisena. [9, s. 226–227.]

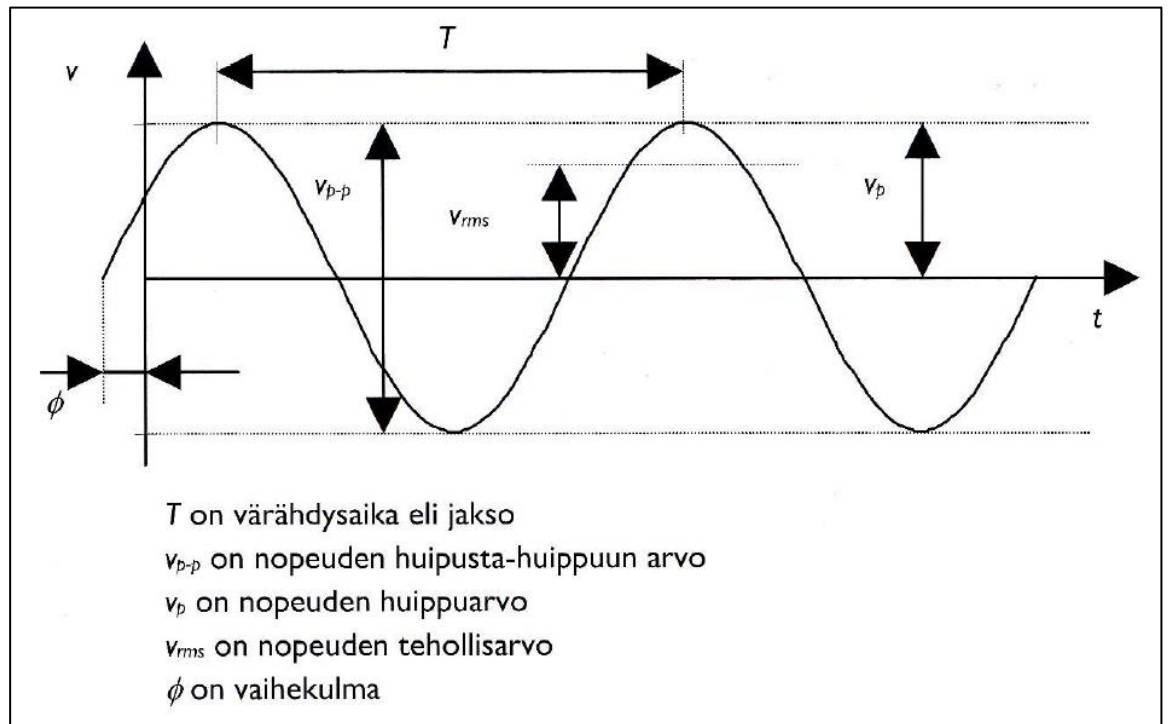
## 4.2 Värähtelymittaussuureet

Värähtelymittauksia voidaan tehdä kolmen eri mittaussuureen avulla: nopeus, kiihtyvyys ja siirtymä. Värähtelynopeus on yleisimmin käytetty värähtelymittaussuure. Siirtymänä mitattu värähtely ilmaisee kohteen sijainnin suhteessa vertailupisteeseen. Nopeutena mitattu värähtely ilmaisee kappaleen kulkeman siirtymän tietyn ajan kuluessa. Kiihtyvyytenä mitattu värähtely ilmaisee kappaleen nopeuden muutoksen tietyn ajan kuluessa. [9, s. 227, 292.][5, s. 18, 45.][10, s. 20.][11, s. 14, 59.] Taulukossa 2 on esitetty värähtelymittauksissa käytettyjä suureita ja mittayksiköitä.

Taulukko 2. Värähtelymittaussuureet ja mittayksiköt [10, s. 20].

Suure	Lyhenne	Käytännön mittayksikkö	SI-mittayksikkö
Siirtymä	s	$\mu\text{m}$	m
Nopeus	v	mm/s	m/s
Kiihtyvyys	a	$\text{m/s}^2$ tai $g = 9,81 \text{ m/s}^2$	$\text{m/s}^2$
Taajuus	f	Hz	Hz
Pyörimisnopeus	n	1/min, rpm, 1/s	1/s
Vaihekulma	$\phi$	Aste ( $^\circ$ ) tai radiaani ( $360^\circ = 2\pi\text{rad}$ )	rad
Jakso	T	ms	s

Jotta värähtelymittausten tuloksia pystytään ymmärtämään, tulee mittaussignaalista osata lukea eri perusparametreja. Kuvassa 3 on esitetty värähdysliikkeen eri mittaussuureita. Kuvan parametrit on esitetty nopeussignaalille, mutta samoja parametreja käytetään myös kiihtyvyydelle ja siirtymälle. [9, s. 231.]



Kuva 3. Mittausparametreja [9, s. 231].

Värähdysaika eli jakso  $T$  ilmaisee aikavälin, jonka jälkeen signaali alkaa toistaa itseään. Huippuarvo ilmaisee värähtelysuureen maksimi-arvon eli korkeimman huipun korkeuden verrattuna nollassa. Laakerivika ilmenee usein huippuarvon kasvuna. Huipusta huippuun -arvo ilmaisee positiivisen ja negatiivisen ääriarvon erotuksen. Huipusta huippuun -arvo on yleensä noin kaksinkertainen huippuarvoon verrattuna. Huipusta huippuun -arvoa käytetään yleensä mitattaessa siirtymää. Tehollisarvo eli RMS ilmaisee värähtelysignaalin suuruutta, ja se on yhteydessä värähtelyn sisältämään energiaan. Tehollisarvo lasketaan yleisimmin värähtelyn nopeudesta, jolloin sitä voidaan myös nimittää värähtelynopeudeksi. Nopeuden tehollisarvo on kunnonvalvonnan tunnuslukumittauksissa yleisimmin käytetty mittaussuure. Vaihekulma ilmaisee jakson kohdan, johon aaltoliike on edennyt vertailukohdasta. Huippukerroin puolestaan on suhdeluku, joka saadaan, kun huippuarvo jaetaan tehollisarvolla. Huippukerroin kuvaa signaalin piikkikyyttä. Kohonnut huippukertoimen arvo ilmaisee usein laakerivikaa. [9, s. 209–210, 231.][5, s. 51–52.][10, s. 6–17.]

Taajuus ilmaisee värähdysten lukumäärän tietyssä ajassa eli aikayksikössä. Taajuuden yksikönä käytetään hertsiä, Hz. Hertsi kertoo värähdysten lukumäärän sekunnissa ( $1/s$ ). Koneen perustaajuuden pystyy määrittämään koneen kierrosnopeuden avulla. Esimerkiksi puhaltimen kierrosnopeus on 1500 rpm eli 1500  $1/min$ , joten perustaajuus  $1500 \text{ 1/min} / 60 = 25 \text{ Hz}$ . [11, s. 59.]

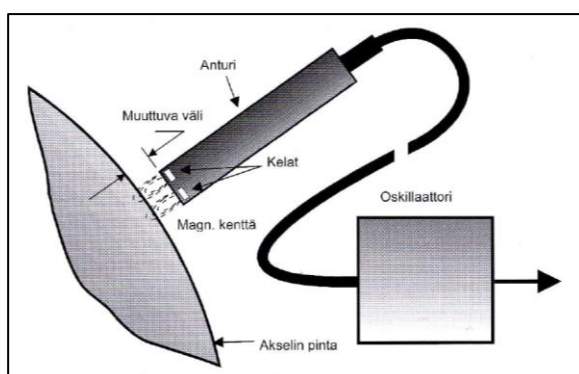
Taajuusalueella 10–1000 Hz käyttökelpoisin mittaussuure on nopeus. Kun taajuusalue on matalampi, käytännöllisempää on käyttää mittaussuurena siirtymää, ja puolestaan korkeammilla taajuusalueilla kiihtyvyys on käytännöllisin mittaussuure. [9, s. 228.]

### 4.3 Värähtelymittausanturit

Värähtelymittauksissa kolme yleisimmin käytettyä anturia ovat siirtymä-, nopeus-, ja kiihtyvyysanturi. Lisäksi iskusysäysmenetelmässä käytetty iskusysäysanturi kuuluu yleisimpien värähtelymittausantureiden piiriin. Jokainen anturi mittaa omaa mittaussuuretaan. Kullakin anturilla on omanlainen rakenteensa ja toimintaperiaatteensa. Yleisimmin käytetty mittaussuure on kiihtyvyysanturi ja käytetyt mittauslaitteet muuttavat yleensä kiihtyvyyden nopeudeksi. [9, s. 237.][5, s. 45.] [10, s. 25.]

#### 4.3.1 Siirtymäanturit

Siirtymäanturien toiminta perustuu siihen, että anturi mittaa kohteen etäisyyttä suhteessa mittauspisteeseen eli anturin sijaintiin. Siirtymäantureita käytetään useimmiten akselien aseman ja värähtelyn mittaamiseen. Siirtymäanturien teoreettinen taajuusalue on 0–10 000 Hz, mutta käytännössä taajuusalue rajoittuu 200 Hz:iin. Yleisin siirtymäanturityyppi on pyörrevirtaanturi. Pyörrevirta-antureita käytetään tavanomaisesti liukulaakerien kunnonvalvonnassa [10, s. 26]. [9, s. 235.] Kuvassa 4 on esitetty siirtymäanturi.



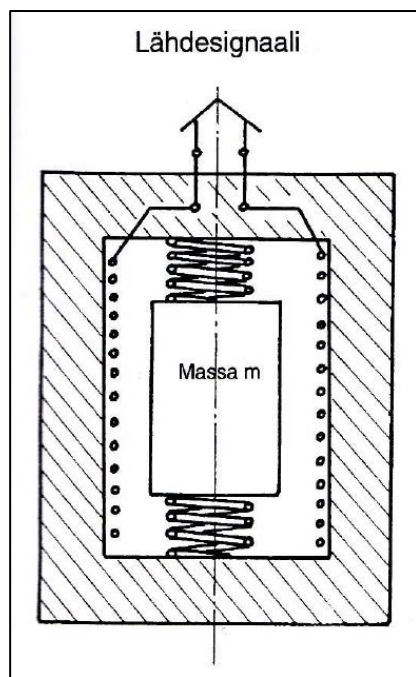
Kuva 4. Siirtymäanturi [9, s. 235].

Siirtymäantureissa anturin päässä oleva kela muodostaa magneettikentän [5, s. 49]. Kelan ja mittauskohdan muuttunut etäisyys muuttaa anturin induktanssia ja samalla muuttuu ulostulojännite. Ulostulojännite on suoraan verrannollinen etäisyyden muutokseen. [9, s. 235.]

Siirtymäantureilla voidaan mitata värähtelyn lisäksi myös pinnanmuotojen muutoksia, asemaa ja akselin ratakäyriä. Lisäksi siirtymäantureita voidaan käyttää linjaustilan sekä liukulaakerien kunnonvalvonnassa. Siirtymäanturin hyviä puolia ovat pieni koko ja keveys. [5, s. 49–50.]

#### 4.3.2 Nopeusanturit

Nopeusanturi on toimintaperiaatteeltaan seisminen. Nopeusanturin taajuusalue on yleensä 10–1000 Hz. Nopeusanturi sisältää liikkuvia osia. Anturin kuoren sisällä on käämi, jonka sisällä anturin päätyihin on jousilla kiinnitetty magneettinen massa. Nopeusanturin toimintaikä on varsin lyhyt, liikkuvien osiensa takia. Mitattaessa nopeusanturilla mittaustulos on nopeuteen verrannollinen jännite, jonka magneettinen massa aiheuttaa anturin käämiin liikkeellään. Nopeusanturit ovat herkkiä magneettikentille sekä lämpötilan vaihteluille. Lisäksi anturin asento mitattaessa saattaa vaikuttaa mittaustulokseen aiheuttaen virheellisiä tuloksia. Nopeusantureita on kuitenkin helppo käyttää. Kuvassa 5 on esitetty nopeusanturi. [9, s. 236–237.][5, s. 47–48.]

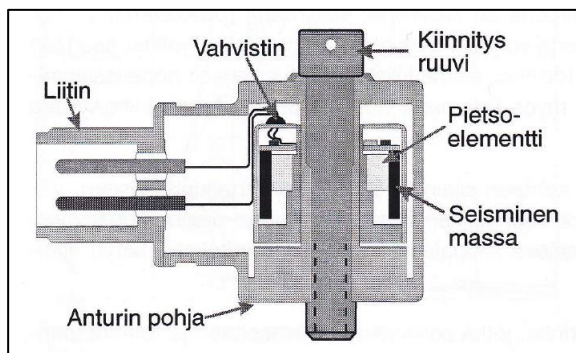


Kuva 5. Nopeusanturi [5, s. 47].



### 4.3.3 Kiihtyvyyssanturit

Nykypäivänä kiihtyvyyssantureita käytetään yhä useimmin värähtelymittauksissa. Kiihtyvyyssanturit ovat pietsosähköisiä. Pietsosähköiset kiihtyvyyssanturit kattavat laajan taajuusalueen, ja niiden käyttöikä on pitkä. Anturit eivät sisällä liikkuvia osia, joten mittaustarkkuus ei heikkene käytössä. Kyseiset anturit ovat helppoja asentaa. Lisäksi kiihtyvyyssanturit eivät ole epäherkkiä ympäristöolosuhteille. Kiihtyvyyssanturit ovat pienikokoisia sekä rakenteeltaan kevyitä. Anturin rakenteeseen kuuluu runko, seisminen massa ja niiden välissä oleva pietsoelementti. Pietsosähköinen kide on tehty joko keraamista tai kvartsista. [9, s. 237.][5, s. 46.][10, s. 13, 26.] Kuvassa 6 on esitetty kiihtyvyyssanturi.



Kuva 6. Kiihtyvyyssanturi [5, s. 46].

Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate perustuu Newtonin toiseen lakiin  $F = ma$ . Mittauskohteeseen kiinnitetty anturi liikkuu kohteen mukaisesti. Tällöin anturiin kohdistuu voima, joka on verrannollinen kiihtyvyyteen. Näin ollen anturin pietsoelementtiin muodostuu voimaan verrannollinen sähkövaraus ja anturin ulostulo on kiihtyvyyttä vastaava signaali. Kiihtyvyyssanturin mittaussuure muunnetaan yleensä nopeudeksi, koska yksikkönä nopeus on helpommin ymmärrettävissä. [10, s. 26.][9, s. 238.]

Kiihtyvyyssanturien suosio johtuu niiden monipuolisuudesta. Kiihtyvyyssantureilla voidaan mitata niin matalia kuin korkeitakin taajuuksia. Kiihtyvyyssanturin taajuusalue on tyypillisesti noin 2–20 000 Hz. Anturin ylä- ja alataajuuksiin vaikuttavat kuitenkin anturin kiinnitystapa ja anturin ominaisuudet. Juuri oikeanlaisella anturilla ja kunnollisella kiinnityksellä kiihtyvyyssanturilla voidaan mitata jopa yli 20 000 Hz:n taajuudella. Mikäli anturin kiinnitys tapahtuu käsin painamalla mittauskohtaan, on taajuusalue paljon normaalia taajuusaluetta matalampi. [5, s. 46–47.]

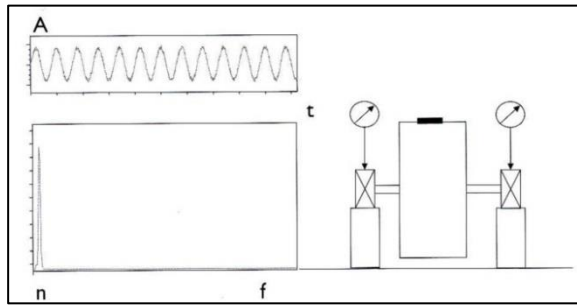
#### 4.4 Värähtelyä aiheuttavat tekijät

Värähtelyä aiheuttavat useat eri tekijät. Laitteen värähtely saattaa aiheutua laitteiden pyörivien akselien ja roottoreiden epätasapainosta, valmistuksen tai asennuksen epätarkkuudesta, akselien linjausvirheestä, hammaspyörien kosketuksesta, hihnojen liikkeestä, hankauksesta ja kuluneesta, vioittuneesta tai irtonaisesta osasta. Laitteen voimakkaan värähtelyn syynä voi olla myös koneen suuri liikkuvuus. Liikkuvuuteen syynä voi puolestaan olla koneen osan tai koneen tukirakenteen joustavuus tai keveys. Värähtelyn aiheuttajan selvittäminen on tärkeää, jotta mahdolliset korjaustoiminnot pystytään ajoittamaan sekä valmistelemaan tehokkaasti ja taloudellisesti järkevästi. Värähtelyn aiheuttajaa selvitettäessä apuna voidaan käyttää yleistä vianhakutaulukkoa, jossa on esitetty yleisimmät värähtelyä aiheuttavat tekijät ja niiden esiintymistajuuudet. Yleinen vianhakutaulukko on esitetty liitteessä 1. [9, s. 224, 297.][11, s. 14]

##### 4.4.1 Epätasapaino

Yksi yleisimmistä syistä pyörivien koneiden liialliseen värähtelyyn on koneen epätasapaino. Epätasapaino voi johtua esimerkiksi huonosta valusta, materiaalin tiheyden vaihtelusta, työstöstä, irtonaisesta materiaalista tai monesta muusta eri syystä, jotka aiheuttavat sen, että pyörivän kappaleen painopiste ei ole yhtenevä koneen oman pyörimispisteen kanssa. Epätasapainon aiheuttama värähtely ilmenee koneen pyörimistajuuudella. Epätasapaino aiheuttaa normaalista poikkeavaa voimakkaampaa värähtelyä. Epätasapaino voi johtaa koneen mekaaniseen vaurioitumiseen tai mahdollisiin häiriöihin koneen käydessä. Mahdollisia syitä liialliseen epätasapainoon ovat laitteen epätasainen likaantuminen ja kuluminen. Koneen osista voi myös irrota kiinnittynyttä massaa, esimerkiksi pölyä, joka voi aiheuttaa koneeseen epätasapainoa. Koneen epätasapainoon voi myös olla syynä riittämätön tasapainotus tai tasapainotusmassoja on voinut irrota tai roottorin siipi on voinut katketa. [9, s. 297–299.]

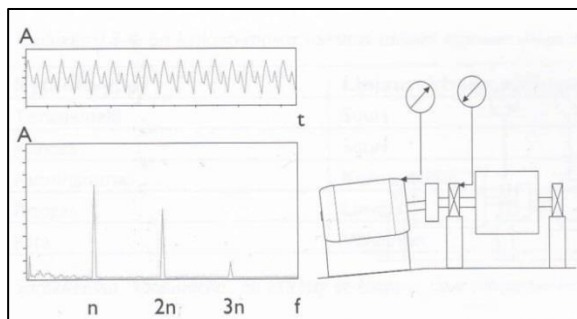
Epätasapainon kehitys saattaa vaihdella, sillä esimerkiksi likaantumisen johtuva epätasapaino saattaa välillä laskea, koska tasapainotila saattaa tilapäisesti myös parantua [10, s. 79]. Kuvassa 7 on esitetty epätasapaino ja epätasapainon ilmeneminen spektrissä.



Kuva 7. Epätasapaino [9, s. 299].

#### 4.4.2 Linjausvirhe

Linjausvirheiden yleisimmät syyt ovat asennusvirheet ja lämpöliikkeet. Linjausvirheen aiheuttama värähtely näkyy spektrissä akselin pyörimistaajuuden monikertoina. Linjausvirheitä ovat esimerkiksi vinossa oleva akseli ja vinoon linjattu komponentti, esimerkiksi hihnapyörä. Linjausvirheet aiheuttavat muun muassa melua, tiivistevaurioita ja laakerien eliniän lyhenemistä lisäkuormituksesta johtuen. [9, s. 303–304.] Kuvassa 8 on esitetty linjausvirhe ja sen esiintyminen spektrissä.

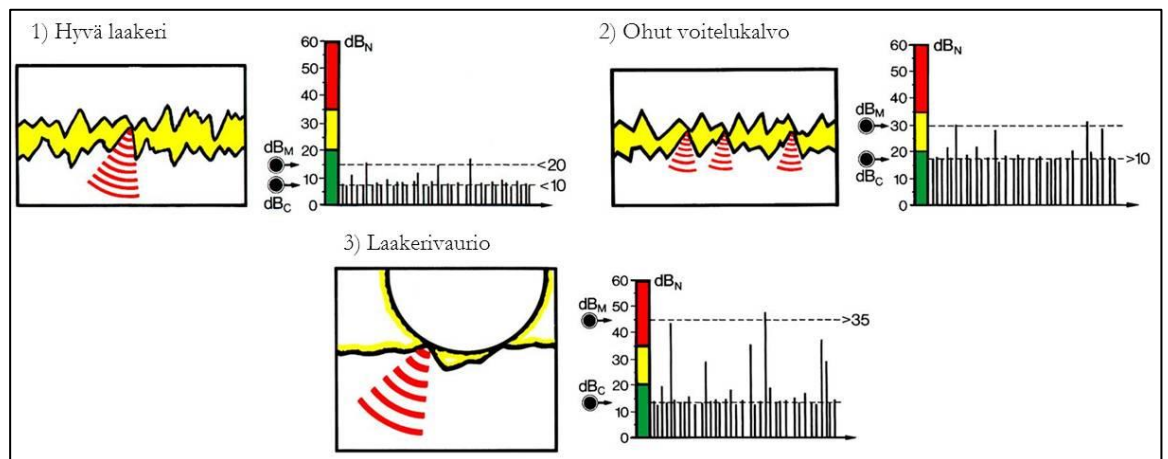


Kuva 8. Linjausvirhe [9, s. 305].

#### 4.4.3 Laakerivauriot

Mahdollisia vierintälaakerivikoja ovat voiteluviat, metallikosketus, kehien kuluminen ja virusti asennettu vierintälaakeri. Laakerivaurioiden syitä ovat lika, kosteus, ylikuormitus, voitelun puute ja valmistuksen jälkeen aiheutuneet vauriot. Edetessään vika voi johtaa vierintälaakerin tai jopa akselin vaurioitumiseen. Metallikosketus vierintälaakereissa aiheuttaa korkea-

taajuista, tyypillisesti yli 2000 Hz:n värähtelyä. Metallikosketus voi johtua liiallisesta kuormituksesta, virheellisestä asennuksesta tai riittämättömästä voitelusta. Värähtely sysäystaajuuksilla voi johtua liiallisesta laakerin kuormituksesta tai virheellisestä asennuksesta. Laakerin kehien kulumisen edetessä sysäystaajuuksien monikertojen määrä lisääntyy. Sysäystaajuuksilla ilmennyt värähtely ei aina ilmaise kuitenkaan laakerivauriosta. Amplitudi nousee pyörimistaajuudella ja sen monikerroilla, kun vaurioituminen lähenee. Vainoon asennettu vierintälaakeri aiheuttaa akselin suuntaista värähtelyä pyörimistaajuudella. [9, s. 311–316.][10, s. 86–89.] Kuvassa 9 on esitetty iskusysäysmenetelmällä mitattujen laakerien iskusysäyskuvioita.

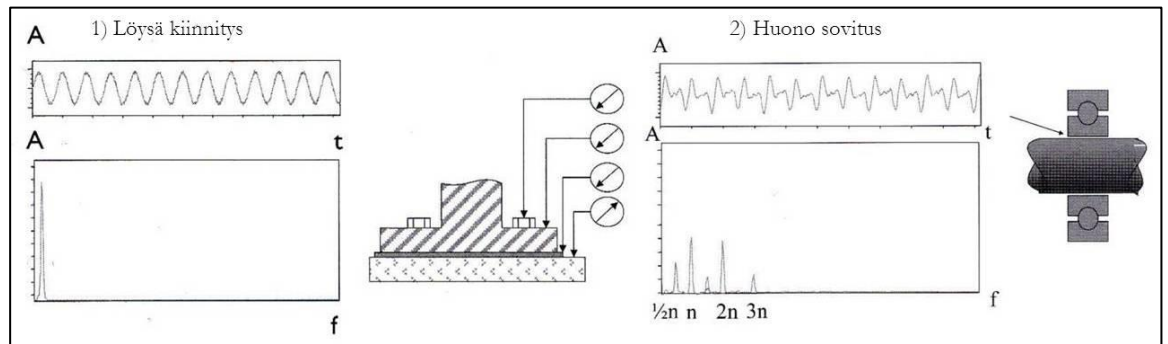


Kuva 9. Hyvän laakerin, ohuen voitelukalvon omaavan laakerin ja vaurioituneen laakerin iskusysäyskuviot [12].

Liukulaakerien vauriot ovat tyypillisesti kulumis- ja välysvikoja, jotka johtuvat epäpuhtauksista, puutteellisesta voitelusta, voiteluöljyn väärästä tyyppistä tai asennusvirheestä. Normaalisti liukulaakerin kehittyvä kulumisen aiheuttaa pyörimistaajuuden monikertojen kasvua. Värähtelyspektrissä kulumis- ja välysviat ilmenevät yleensä kohonneena kohinatasona. [9, s. 316.][10, s. 89.]

#### 4.4.4 Mekaaninen väljyys

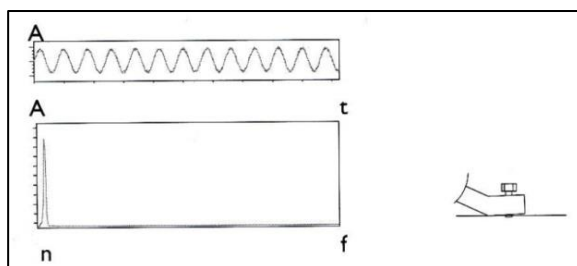
Mekaaninen väljyys voi johtua osien huonosta sovituksesta, liiallisesta välkystä vierintä- tai liukulaakereissa tai juoksupyörän löysästä kiinnityksestä akseliin. Värähtelyn spektrissä amplitudi ja vaihekulma ovat yleensä epävakaita ja saattavat muuttua eri käynnistyksillä. [9, s. 309–310.] [10, s. 84.] Kuvassa 10 on esitetty kaksi esimerkkiä mekaanisen väljyyden aiheuttamista värähtelyistä.



Kuva 10. Mekaanista väljyyttä aiheuttavat tekijät 1) Löysä kiinnitys, 2) huono sovitus [9, s. 309–310].

#### 4.4.5 Koneen viallinen kiinnitys

Koneen viallinen kiinnitys tarkoittaa sitä, että laite ei ole tasaisesti ja tukevasti kiinnitetty kaikkien jalkojensa varaan. Kiinnitysvirheet voivat johtua koneiden tai perustusten valmistuksessa tapahtuneista epätarkkuuksista. Kiinnitysvirhe ilmenee usein värähtelyn kasvuna koneen pyörimistaajuudella, värähtelyä voi ilmetä myös pyörimistaajuuden monikerroilla. [9, s. 310.] Kuvassa 11 on esitetty koneen viallinen kiinnitys sekä sen esiintyminen spektrissä.



Kuva 11. Koneen viallinen kiinnitys [9, s. 311].

## 5 VÄRÄHTELYMITTAUKSET

### 5.1 Matalataajuiset värähtelymittaukset

Matalataajuisilla värähtelymittauksilla mitataan laitteen yleistärinää sekä voidaan keskittyä vierintälaakerien kunnonvalvontaan. Tärinärasitusmittausten avulla saadaan tietoja koneen yleiskunnosta. Tärinänmittausmenetelmä on epäherkkä useille eri vioille, joten menetelmä ei sovi ainoaksi menetelmäksi vierintälaakerien kunnonvalvontaan. Tärinämittauksissa tärinän nopeus RMS mitattuna taajuusalueella 3–1000 Hz on käytännöllinen yleiseen koneen kunnonmääritykseen. Uusimmilla värähtelymittauslaitteilla mittausten taajuusalue on 3–1000 Hz ISO 10816 -standardin mukaisesti, ja vanhemmat tärinänmittauslaitteilla taajuusalue on 10–1000 Hz ISO 2372 -standardin mukaisesti, jolloin alimmilla taajuusalueilla tapahtuvaa värähtelyä ei saada mitattua. Tärinänmittausta olisi hyvä tehdä kahdella toisistaan poikkeavalla mitaussuureella. Toisella mitataan koneiden kokonaistärinää taajuusalueella 3–1000 Hz, joka kertoo karkeasti akselin pyörimiseen liittyvien vikojen olemassaolosta. Toinen mittaus tehdään yli 2000 Hz:n taajuudella, ja sillä selvitetään pääasiassa vierintälaakerien kuntoa. [9, s. 292.][5, s. 18.][11, s. 59.][13.]

#### Koneiden tärinärasitusrajat

Koneiden kunnonvalvonnassa tärinärasitusrajojen suositukset erityyppisille laitteille määritellään standardeissa. Standardeissa määritellään tärinän raja-arvot uuden koneen vastaanotolle, sallitulle värähtelytasolle käynnin aikana, hälytysraja sekä vaurioraja. Teollisuuskoneille Suomessa käytetään standardia PSK 5704, joka vastaa standardia ISO 10816-3. PSK 5704 koskee koneita, joiden pyörimisnopeus on 120–15 000 rpm ja käyttöteho on yli 15 kW. Kyseinen standardoitu tärinärasitus kattaa taajuusalueen muutamasta hertsistä noin tuhanteen hertsiin. Koneen hyväksyttävään tärinätasoon vaikuttaa koneen koko, rakenne, käyttö ja alustan jäykkyys [11, s. 14]. [9, s. 292.]

Teollisuuskoneiden tärinärasitusrajoja määritettäessä koneet ryhmitellään ottaen huomioon käyttöteho, akselikorkeus ja -liitos sekä alustan jäykkyys [10, s. 42]. Koneet jaetaan neljään ryhmään. Taulukossa 3 on esitetty koneryhmät ja niihin kuuluvat koneet.

Taulukko 3. Tärinärasitusrajojen määrittelyssä käytetyt koneryhmät [10, s. 42].

Ryhmä 1	Suuret koneet, joiden nimellisteho $> 300$ kW ja sähkökoneet, joiden akselikorkeus vähintään 315 mm
Ryhmä 2	Keskikokoiset koneet, joiden nimellisteho on enintään 300 kW ja sähkökoneet, joiden akselikorkeus on välillä 160–315 mm
Ryhmä 3	Pumput, puhaltimet ja kompressorit, joilla on erillinen akseli moottorin kanssa ja nimellisteho $P > 15$ kW
Ryhmä 4	Pumput, puhaltimet ja kompressorit, joilla on yhteinen akseli moottorin kanssa ja nimellisteho $P > 15$ kW

Kuvassa 13 on esitetty koneille sallitut tärinärasitusarvot. Kuvassa 13 jokaiselle koneluokalle on määritetty tärinärasitusalueet, jotka on esitetty kirjaimin A, B, C ja D. Alla olevassa taulukossa 4 on esitetty selitykset tärinärasitusalueille.

Taulukko 4. Tärinärasitusalueiden selitykset [10, s. 43].

A	Koneen vastaanotossa sallittu tärinärasitusalue.
B	Koneen sallittu tärinärasitusalue takuuajan jälkeen. Alueen ylärajaa voidaan käyttää alustavana hälytysrajana, jota tulee myöhemmin tarkentaa.
C	Hälytysalue. Alueen ylärajaa voidaan käyttää alustavana vauriorajana, jota tulee myöhemmin tarkentaa.
D	Vaurioalue.

Kuvassa 12 esitetyt tärinärasitusalueiden raja-arvot ovat kuitenkin suuntaa-antavia ja todelliset tärinärasitusrajat saadaan määritettyä koneiden käyttökokemuksen perusteella [10, s. 41].

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				D 11,0
10				
9		D	D	C
8				
7		7,1	7,1	7,1
6				
5	D 4,5	C 4,5	C 4,5	B
4				3,5
3	C 2,8	B 2,3	B 2,3	
2	B 1,4			
1	A	A	A	A

Kuva 12. Koneiden sallitut tärinärasitusarvot [10, s. 43].

Koneista mitattuja tärinöitä tulkittaessa tulee tärinän kasvuun kiinnittää erityistä huomiota. Tärinän kasvaessa tasaisesti tulee sitä seurata mittauksilla. Mikäli tärinän kasvu on nopeaa ja se kasvaa niin voimakkaasti, että taulukon ruutuja jää väliin, tulee heti ottaa selvää, mistä tärinän suuri kasvu johtuu, vaikka tärinä edelleen olisi sallitulla alueella.

## 5.2 Korkeataajuiset värähtelymittaukset

Korkeataajuisissa värähtelymittausmenetelmissä taajuusalue on 20 kHz–1 GHz [9, s. 247]. Iskusysäysmittaus, ultraäänen mittaaminen kappaleen pinnalta, akustinen emissio ja verhoikäyrämenetelmä ovat yleisimpiä korkeataajuisia värähtelymittausmenetelmiä. Lisäksi on olemassa SEE- ja PeakVue-menetelmät. Mekaanisen värähtelyn ja ultraäänen taajuusalueilla värähtely vaikuttaa koko laitteen rakenteeseen ja värähtely ilmenee laitteen osan, esimerkiksi



seinämän, liikkeenä. Akustinen emissio puolestaan ilmenee materiaalin pinnan aaltoiluna ja akustisella emissiolla tutkitaan korkeataajuisia värähtelyjä. Verhokäyrä- ja Vue -menetelmien värähtelyt tapahtuvat pääosin mekaanisen värähtelyn taajuuksilla, vaikka niitä kutsutaankin korkeataajuisiksi menetelmiksi. Akustisen emission värähtely ja ultraääni-värähtely syntyvät pintojen vierintä- ja liukukosketuksista. Korkeataajuisien värähtelymittauksien käyttökohteita ovat vierintälaakerien, hammasvaihteiden ja liukulaakerien kunnonvalvonta sekä voitelutilanteen valvonta. Korkeataajuisilla värähtelymittauksilla pystytään muun muassa havaitsemaan vierintälaakerien alkavat viat. Värähtelyvoimakkuuteen vaikuttaa todella paljon voitelun tilanne sillä hetkellä. [9, s. 247–248.][5, s. 18, 82.]

### Iskusysäysmittaus

Iskusysäysmittaus on värähtelymittausmenetelmä, jota käytetään laakerien ennakoivassa kunnonvalvonnassa. Iskusysäysmittausta käytetään erityisesti vierintälaakerien kunnonvalvonnassa [10, s. 26.] Iskusysäysmenetelmä on helppokäyttöinen ja antaa nopeasti tiedon vierintälaakerin kunnosta. Vierintälaakerin vaurioituessa syntyy korkeataajuisia värähtelyä. Korkeataajuinen värähtely johtuu vierintäelimen osumisesta vierintäradassa olevaan vauriokohtaan tai vierintäelinvaurion osumisesta vierintärataan. Aiheutunut värähtely on iskumaista, ja isku-kohtaan syntyy paikallinen kiihtyvyys, joka on verrannollinen vaurion suuruuteen, laakerin kokoon ja pyörimisnopeuteen. Iskusysäysmittauksissa käytetään siihen tarkoitettua iskusysäysanturia. Iskusysäysanturin ominaistajuus on 32 kHz, joten anturi vahvistaa korkeataajuisia iskusignaalia ja muut koneen tärinätaajuuudet suodattuvat pois. Iskusysäysmenetelmä antaa tarkkaa tietoa laakeripintojen mekaanisesta kunnosta ja voitelutilasta koko niiden käyttöajan. Menetelmän avulla pystytään havaitsemaan vaivatta useiden laakerivikojen perussyt, kuten asennusvirheet ja huono voitelu. [9, s. 249.][11, s. 10][14.][15, s. 10.][16, s. 3.]

Iskusysäyskuvio muodostuu heikoista ja vahvoista sysäyksistä. Iskusysäysten vahvuus ilmaistaan desibelien avulla. Iskusysäysmittauksissa mittaussignaalista lasketaan kaksi arvoa: huippuarvo dBm ja mattoarvo dBc. Huippuarvo dBm ilmaisee iskujen arvon, joka muodostuu signaalin korkeimmista piikeistä. Signaalin äänimatossa muodostuu paljon heikkoja sykäyksiä, joista muodostuu mattoarvo dBc. Huippuarvon ja mattoarvon mittayksikkö on dBn, joka on normalisoitu iskuarvo. Mittausarvo dBn kertoo suoraan laakerin kunnon, sillä dBn arvo on yhteydessä laakerin kokoon ja pyörimisnopeuteen. Mittausarvo dBn on jaettu kolmeen kuntoalueeseen. Kuntoalueiden perusteella laakerin kunnosta saa tiedon helposti. Kuntoalueet on värikoodattu. Laakerin ollessa hyvässä kunnossa mittausarvot asettuvat vihreälle kunto-

alueelle. Laakerin kunnan heikentyessä mittausarvot asettuvat keltaiselle alueelle. Laakerin ollessa huonossa kunnossa mittausarvot asettuvat punaiselle alueelle. [9, s. 249.][12.] Taulukossa 5 on esitetty kuntoalueet värikoodeineen.

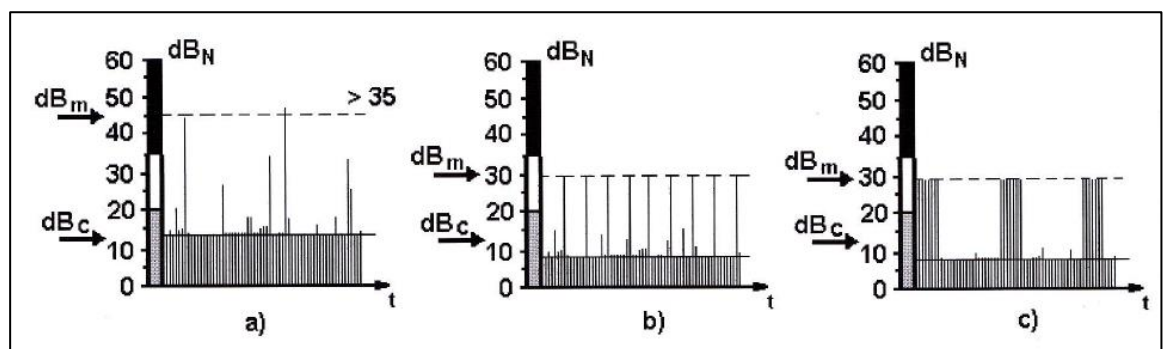
Taulukko 5. Iskusysäysmittausten kuntoasteikko [11, s. 5].

Mittausarvot, dBn	Värikoodi	Laakerin kunto
0–20	Vihreä	Hyvä
21–34	Keltainen	Heikentynyt
35–	Punainen	Huono

Mattoarvo on suoraan verrannollinen voitelutilaan. Mattoarvo on alhainen, kun laakerin voitelutila on hyvässä kunnossa. Mattoarvo nousee, kun voiteluöljyn tiheys kasvaa sekä laakerin ja laakeripesän pinnoilla syntyy metallikosketuksia. Huonolle laakerin voitelulle on myös tyyppistä, että huippuarvon ja mattoarvon välinen ero on pieni. [12.]

Laakerin ollessa hyvässä kunnossa huippuarvon dBm tulisi olla alle 20 dB ja mattoarvon dBc tulisi olla noin 5–10 dB pienempi. Huippuarvon dBm ja mattoarvon dBc välinen ero on suhteellisen pieni, kun laakerin pinnat ovat hyvässä kunnossa. Korkea huippuarvo ja suuri ero mattoarvon ja huippuarvon välillä on merkki laakerin vauriosta tai vieraista partikkeleista laakerin ja laakeripesän välillä. [12.]

Kuvassa 13 on esitetty eri vioista aiheutuvia iskusysäyskuvioita. Kuvassa esitetty kohta a on vaurioituneen laakerin iskusysäyskuvio, kohdan b iskusysäyskuvio muodostuu, kun pyörivät osat koskettavat eli iskeytyvät toisiinsa ja kohta c on hankaavista osista muodostuva iskusysäyskuvio. [9, s. 249.]



Kuva 13. Iskusysäyskuvioita: a) vaurioitunut laakeri, b) toisiinsa iskevät osat ja c) toisiaan hankaavat osat. [9, s. 249.]

Laakeri on vaurioitunut, kun dBm-arvo ylittää 35 dB sekä huippuarvon ja mattoarvon välinen ero on suuri. Lisäksi vaurioituneen laakerin iskukuviossa esiintyy satunnaisia voimakkaita iskusysäyksiä. Huippuarvon maksimiarvo on verrannollinen vaurion suuruuteen: mitä suurempi arvo, sitä vakavampi vaurio laakerissa on. Huippuarvon ylittäessä 45 dB laitteella on suuri rikkoutumisvaara. Säännöllinen iskukuvio muodostuu esimerkiksi, kun pyörivät tai muut osat koskettavat toisiinsa. Samankaltainen iskukuvio muodostuu myös huonosti kiinnitetystä tai väljästä osasta, esimerkiksi akseliholkista. Iskusysäyskuvio, jossa on leveitä signaalien maksimiarvoalueita, muodostuu, kun osat hankaavat toisiaan, kuten esimerkiksi suojaletkien hankaus tai akselin hankaus laakeripesään. Kuitenkin tulosten tulkintaa vaikeuttaa, kun saman desibeliarvon antavan mittaustuloksen aiheuttaja voi olla erilainen ilmiö. Mitatuissa arvoissa voi myös tapahtua huomattavaa alenemista. Mikäli iskusysäystaso putoaa monen normaalin mittauksen jälkeen, kyseessä on joko vakava laakerivaurio tai vika voi olla myös mittarissa. Laakerivaurion ollessa kyseessä laakerin sisä- tai ulkokehä todennäköisesti luistaa laakeripesässä tai akselilla. [9, s. 249.][11, s. 51.]

### 5.3 Mittaussuureen ja anturin valinta

Anturin valinnassa ensimmäinen vaihe on miettiä värähtelysuureen valintaa. Värähtelysuureen tulisi olla riittävän herkkä havaitsemaan koneen kunnan muutoksen aiheuttamat värähtelyt. Luotettavuutta vikojen löytymiseen voidaan parantaa käyttämällä useampia eri mittaussuureita, esimerkiksi siirtymän lisäksi kiihtyvyyttä. Mikäli laitteen pyörimisnopeus on alle 300 rpm tai viat ilmenevät alle 100 hertsin taajuuksilla, on siirtymä mahdollisesti järkevin käytettävä mittaussuure. Nopeakäyntisissä koneissa, joissa on liukulaakerointi, on järkevintä käyttää pyörrevirta-anturia ja mittaussuureena siirtymää, sillä ne antavat parhaimmat tiedot roottoriin liittyvistä ongelmista. Mikäli koneen oletettavat viat ilmenevät yli 1000 hertsin taajuuksilla, on mahdollisesti järkevintä käyttää kiihtyvyyttä mittaussuureena. Mikäli kiihtyvyys ei ole käytettävä mittasuure, on sitä järkevää käyttää myös apumittaussuureena eli täydentämässä muuta mittausta. [5, s. 50.]

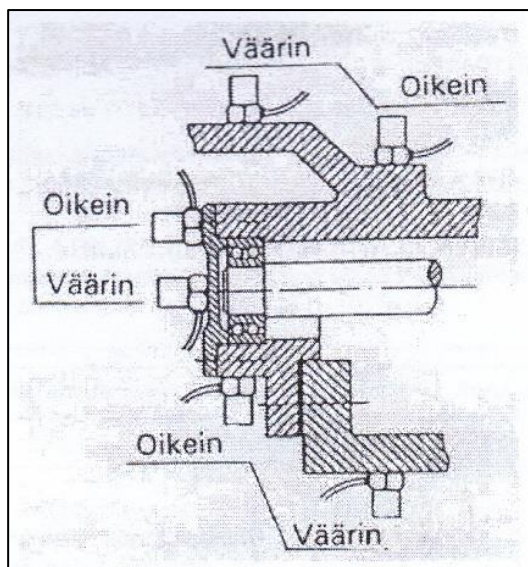
Anturityyppejä valittaessa tulee ottaa huomioon mahdolliset vikatyypit ja taajuusalue, josta värähtelyä mitataan. Anturin herkkyys tulee siis olla värähtelytason mukainen. Anturia valittaessa tulee ottaa huomioon ympäristöolosuhteet. Ympäristöolosuhteissa tulee ottaa huomioon käytettävä tila, kosteus, likaisuus ja sähkömagneettiset häiriöt. Anturia valittaessa tulee ottaa myös huomioon anturin lämpötilan kesto, iskunkestävyys, korroosionkesto, tiiveys ja

kiinnitys. Anturin amplitudialue tulee ottaa huomioon, sillä amplitudialuetta ei saa ylittää mitauksissa. Mikäli värähtely on voimakkaampaa ja ylittää amplitudialueen, on valittava vähemmän herkkä anturi. Kiihtyvyyssantureissa keraamiset kiteet ovat kvartsikiteitä pienikohinaisempia, joten niillä pystytään mittaamaan pienempiä amplitudeja. Lisäksi anturia valittaessa on otettava huomioon taajuusalue, sillä anturin taajuusalueen tulee kattaa mitattavat taajuudet. Tarvittaessa voidaan käyttää useampaa erilaista anturia, jotta koko taajuusalue saadaan mitattua. [10, s. 25–27.]

#### 5.4 Värähtelymittausanturin kiinnityspaikat ja -tavat

##### 5.4.1 Anturien kiinnityspaikan valinta

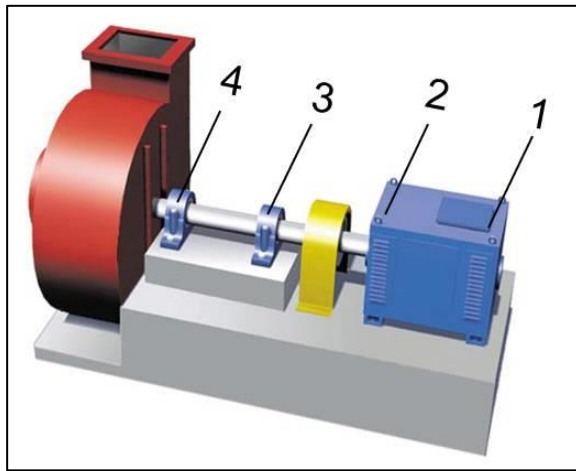
Värähtelyn mittauspaikka valitaan yleensä laitteen kiinteästä osasta, esimerkiksi rungosta. Mittauspiste tulee valita niin, että värähtelyn lähde ja mittausanturi ovat mekaanisesti niin lähellä toisiaan kuin mahdollista. Lisäksi mittauspiste tulee valita siten, että anturin ja värähtelylähteen välillä ei ole rajapintoja tai niitä olisi mahdollisimman vähän, sillä värähtely menettää osan energiastaan kohdatessaan rajapinnan. Tavallisesti rakenteen värähtelyn aiheuttavat liikkeessä olevat koneen osat, joista sitä ei yleensä suoraan päästä mittaamaan, esimerkiksi roottorit, männät tai akselit. [9, s. 224.][5, s. 54.][10, s. 21.] Kuvassa 14 on esitetty esimerkkejä oikeista ja vääristä anturin kiinnityspaikoista.



Kuva 14. Anturien kiinnityspaikat [10, s. 22].

Anturin kiinnityspaikalla on ratkaiseva merkitys mittaustuloksiin ja mittauksen toistettavuuteen. Anturia kiinnitettäessä tulee ottaa huomioon, että kiinnitys ei rajoita taajuus- eikä amplitudialuetta. Anturin massa ei saa kuormittaa mitattavaa kohdetta ja mittauspiste tulee valita niin, että mittaus on luotettavasti toistettavissa. [9, s. 244.]

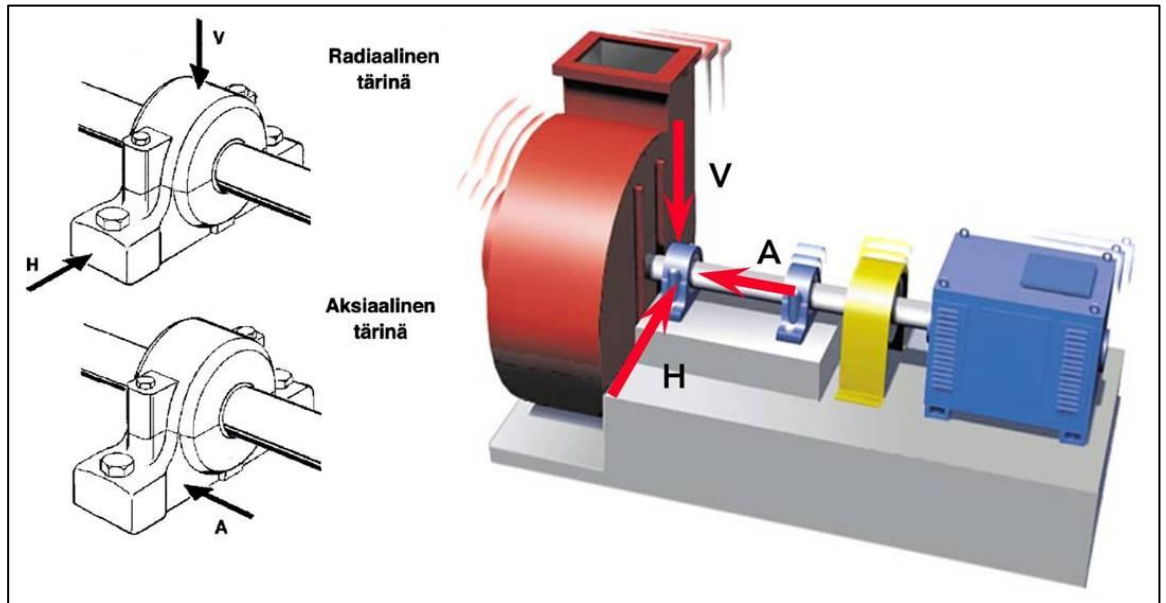
Pyörivissä laitteissa värähtely siirtyy laitteen runkoon laakerien kautta, joten mittauspisteet tulee valita laakerointikohdista. Kuvassa 15 on esitetty teoreettinen kuva Puhaltimesta, johon on merkitty laakerikohdat, joihin mittauspisteet tulee sijoittaa. Mittauspisteet on numeroitu 1–4, sillä mittauspisteiden numerointi aloitetaan yleensä sähkömoottorin n-pään laakerista.



Kuva 15. Puhaltimen värähtelyn mittauspisteet [13].

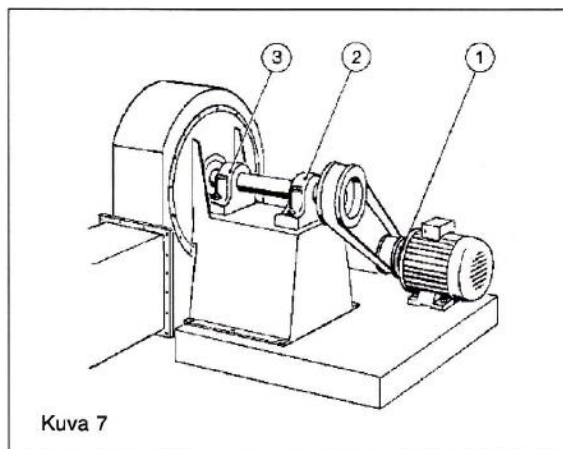
Mittauspisteen valinnassa tulee ottaa huomioon, että tila sallii anturin asentamisen ja suojaamisen, sillä anturiin ei saa kohdistua ympäristöstä minkäänlaisia rasituksia. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että mittaustaikalla on tarpeeksi tilaa anturin vaihtamiseen. Lisäksi anturi ei saa olla sellaisella paikalla, että se vaikeuttaa käyttö- ja huoltotoimenpiteitä. Mittauspistettä valittaessa on myös otettava huomioon, ettei mittaustulokseen vaikuta mitattavan kohteen muoto tai materiaalin vaihtelu. Mittausanturi tulee asentaa laitteeseen tai tarpeeksi jäykkään rakenteeseen. [5, s. 54.] [10, s. 22.]

Tärinämittauksia on suositeltavaa mitata koneen kunkin laakerin kohdalta kolmesta keskenään kohtisuoraan olevasta suunnasta. Mittaussuunnat ovat vertikaalinen V, horisontaalinen H ja aksiaalinen A. Horisontaalinen suunta kertoo koneen epätasapainotilan, vertikaalinen mittaussuunta kertoo perustan kunnon tilan ja aksiaalinen suunta kertoo akselin kunnon sekä linjauksen tilan. Aksiaalinen värähtely on usein merkki akselin linjauksivirheestä [13]. [5, s. 53] [11, s. 61.][13.] Kuvassa 16 on esitetty eri mittaussuunnat.



Kuva 16. Värinän mittaussuunnat. [11, s. 61.][13.]

Värinää mitattaessa vika on helpompi paikallistaa, mikäli mittauspisteitä on useampia. Kuvassa 17 on hihnavetoisen puhaltimen ja moottorin mittauspisteitä.



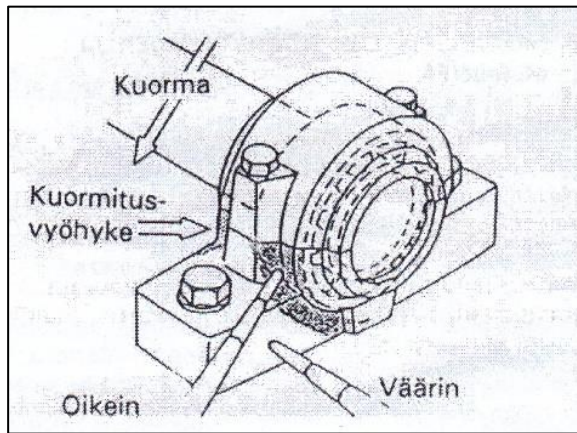
Kuva 7

Kuva 17. Puhaltimen mittauspisteet [11, s. 61].

Mittauspisteestä 3 eli laakerista saadaan ensisijaisesti tietoa puhaltimen epätasapainosta. Mikäli halutaan saada tietoa koko koneen kunnosta eikä vain puhaltimen epätasapainosta, tulee mitata akselin hihnapyörän laakeri (piste 2) ja moottori (piste 1). [11, s. 61.]

Iskusyösmenetyksessä, kun mitataan vierintälaakerien kuntoa ja voitelutilannetta, tulee mittauspiste valita laakerin kuormitusvyöhykkeeltä, sillä rajapinnoissa ja terävissä kulmissa vä-

rähtely vaimenee voimakkaasti. Eli mittaukset tulee suorittaa laakeripesän kuormitetulta alueelta.[10, s. 22.][15, s. 10.] Kuvassa 18 on esitetty iskusysäysmittauksen mittauspaiikat.



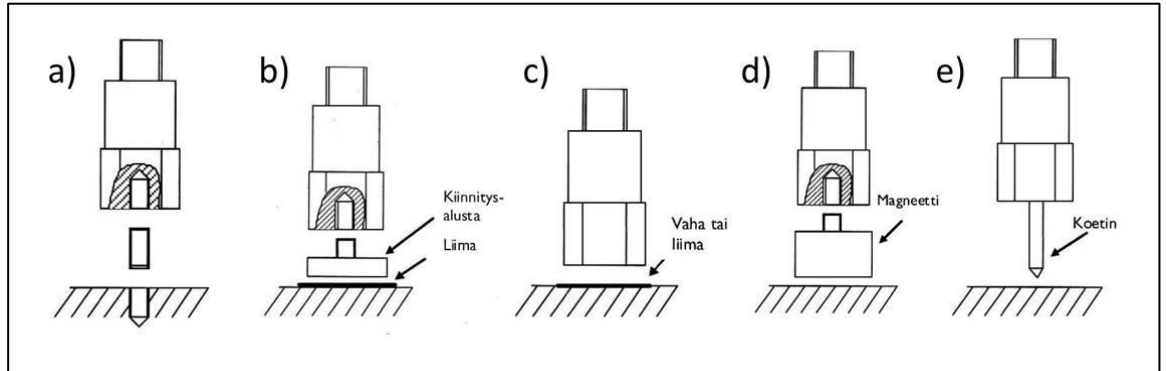
Kuva 18. Iskusysäysmenetelmässä mittauspiste tulee olla laakerin kuormitusvyöhykkeellä [10, s. 22].

#### 5.4.2 Anturien kiinnitystavat

Anturien kiinnitystapoja on useita. Paras kiinnitystapa on ruuvikiinnitys, jossa anturi kiinnitetään mittauspisteeseen vaarnaruuvilla. Tällä kiinnitystavalla koko anturin taajuusalue on varmasti käytettävissä. Ruuvikiinnityksen suurin haitta on sen hankala toteutus, sillä läheskään aina anturia ei päästä kiinnittämään haluttuun kohtaan, joten kiinnitystapaa ei yleensä käytetä reittimittauksissa. Toinen tapa kiinnittää anturi on liimausalustakiinnitys. Liimausalustan kiinnityksessä kohteeseen liimataan alusta, johon anturin voi ruuvata kiinni. Anturin kiinnitys voidaan tehdä myös mehiläisvahan tai liiman avulla. Liima- ja mehiläisvahakiinnitys on erittäin käyttökelpoinen kiinnitystapa, kun halutaan mitata nopeasti värähtelyä laitteen useasta eri kohdasta. Reittimittauksiin käytännöllisin kiinnitystapa on magneettikiinnitys, jossa anturin päähän on asennettu magneetti. Magneetin avulla anturi saadaan helposti kiinnitettyä mittauspisteeseen. Magneettikiinnityksessä tulee huomioida, että mittauspisteet merkataan hyvin, jotta mittaus tapahtuu aina samasta paikasta. Magneettikiinnitystä pystyy käyttämään vain ferromagneettisilla pinoilla. [9, s. 245–246.]

Käsikoetin on viides anturin kiinnitystapa. Käsikoetinanturia ei varsinaisesti kiinnitetä laitteeseen, vaan anturi painetaan voimakkaasti laitetta vasten. Käsikoettimen käyttö antaa helposti virheellisiä tuloksia, riippuen mittaajan voimasta painaa anturia ja koettimen kiinnityskulmas-

ta. Käsikoettimella tehtävät mittaukset eivät ole luotettavasti toistettavissa, sillä on vaikea muistaa, missä kulmassa koetin oli tarkasti edellisellä mittauksella. Käsikoetinta tulee siis käyttää vain tarkistusmittauksiin, jolloin voidaan paikantaa paras mittauskohda tai paikannetaan muut värähtelyä aiheuttavat lähteet, kuten hankaavat ja irtonaiset koneenosat. Kuvassa 19 on esitetty kaikki viisi anturien kiinnitystapaa. [9, s. 246.][11, s. 8.]



Kuva 19. Anturien kiinnitystavat: a) Vaarnaruuvi, b) liima-alusta, c) liima tai mehiläisvaha, d) magneetti ja e) käsikoetin [9, s. 245–246].

### 5.5 Värähtelymittauslaitteet

Värähtelymittauslaitteita on olemassa erityyppisiä: värähtelykyniä, yksinkertaisia käsimittareita, kannettavia tiedonkeruulaitteita sekä kiinteästi asennettuja tiedonkeruu- ja analysointilaitteita. Yksinkertaiset käsimittarit mittaavat yhtä tunnuslukua. Mitattavia tunnuslukuja voivat olla muun muassa värähtelynopeus, akustisen emission tunnusluvut ja iskusysäysmittaus. Kyseisiä mittauksia käsimittareilla tehdään mittauslaitteeseen kiinteästi asennetulla taajuusalueella. Käsimittareita voidaan käyttää arvioimaan laitteen yleiskuntoa, mutta tarkempiin analyysiin tarvitaan kehittyneempi mittauslaite, jolla voidaan tarkastella värähtelyä taajuustasossa. [9, s. 259.] Kuvassa 20 on esitetty esimerkki käsimittarista, jolla voidaan mitata värähtelyä.





Kuva 20. Värähtelymittauslaite [17].

Kannettavien mittauslaitteiden ominaisuuksiin kuuluu vianmäärityksen mahdollisuus. Kannettavia mittauslaitteita käytetään yleensä yhdessä tietokoneella käytettävän analysointiohjelman kanssa. Joillakin mittauslaitteilla pystytään tuloksia analysoimaan suoraan mittauslaitteen näytöltä. Analysointi- ja tietokantaohjelman avulla muodostetaan reittimittauspisteet, mitta-asetukset ja reitit. Ohjelmissa ja joissakin mittauslaitteissa on yleensä spektrin ja aikata-son tulkintaan soveltuvia työkaluja. Kannettavissa mittauslaitteissa voi olla värähtelymittaukseen ja kunnonvalvontaan liittyviä lisäominaisuuksia, esimerkiksi tasapainotus, signaalin nauhoitus ja iskukoe. [9, s. 260.] Kuvassa 21 on esitetty kannettava mittauslaite, jonka näytöltä pystytään analysoimaan mittaustuloksia jo mittaustaikalla, mutta tarkempi analysointi tapahtuu tietokoneella analysointiohjelman avulla.



Kuva 21. Kannettava mittauslaite [18].

Puolikiinteissä järjestelmissä laitteeseen asennetaan kiinteästi mittausanturit, jotka johdetaan mittauspaikkaan. Mittauspaikalla mittaukset suoritetaan kannettavalla mittauslaitteella. Kohteissa, joissa halutaan parantaa mittausten luotettavuutta verrattuna siirrettävään anturiin, voidaan käyttää puolikiinteää järjestelmää. [10, s. 54.]

Kiinteästi asennettuja kunnonvalvontalaitteita käytetään kohteissa, joissa mittaustarve on suuri tai jatkuva eli vikaantumisnopeus ja häiriöherkkyys ovat suuria. Kiinteästi asennetuilla tiedonkeruu- ja analysointilaitteilla voidaan käyttää reaaliaikaista mittausta, ja mikäli värähtely kasvaa liian suureksi ja ylittää hälytysrajan, laite antaa hälytyksen ja joissakin tapauksissa laite voi sulkeutua automaattisesti. Kiinteitä järjestelmiä käytetään turbiineissa, kompressoreissa ja generaattoreissa, sillä niissä vikojen kehittyminen vaurioiksi voi olla erittäin nopeaa. Sellu- ja paperiteollisuudessa, tuuliturbiineissa ja voimalaitoksissa käytetään paljon kiinteästi asennettuja järjestelmiä. [9, s. 260.][10, s. 54.]

## 5.6 Mittausaikaväli

Mittausvälien määrittelyssä tulee ottaa huomioon laitteiden häiriöherkkyys ja vaurioiden kehittymisnopeus [5, s. 29]. Lisäksi tulee ottaa huomioon koneen kriittisyys sekä käytettävä valvontamenetelmä. Mittausvälin tulee olla tarpeeksi lyhyt, jotta ennakoitavat viat eivät pääse kehittymään mittausten välillä vaurioiksi. Taulukossa 6 on esitetty kokemukseräisiä mittausvälejä. [10, s. 55.]

Taulukko 6. Mittausaikavälit [10, s. 56].

Konetyyppi	Kriittisyys	Rasitus	Suositeltava mittaussväli				
			Jaksottainen kunnonvalvonta mittaus				
			kiinteä	2 vko	4 vko	2 kk	4 kk
Pumppu ja puhallin	kriittinen	kova	x				
	kriittinen	kevyt	x				
	ei kriittinen	kova					
	ei kriittinen	kevyt					
Turbogeneraattori	kriittinen	kaikki	x				
Ruuvikompressori	kriittinen	kova	x				
	kriittinen	kevyt	x				
	ei kriittinen	kova					
	ei kriittinen	kevyt					
Vaihteisto	kriittinen	kova	x				
	kriittinen	kevyt	x				
	ei kriittinen	kova					
	ei kriittinen	kevyt					
Moottori	Mittausväli määritetään käytettävän laitteen mukaan. Värähtelymittauksia täydennetään tarvittaessa erikoismittauksilla.						
Telat	kriittinen	kova	x				
	kriittinen	kevyt	x				
	ei kriittinen	kova					
	ei kriittinen	kevyt					
x) kiinteä järjestelmä on ensisijainen kriittisille koneille, toteutus määritellään taloudellisilla perusteilla							
Tumma	Mittausväli jaksottaisessa kunnonvalvonnassa tulisi sijaita tällä alueella. Mittausväli tarkennetaan kokemukseräisesti. Mittausvälit esitetty aika-alueina todennäköisimmän vikaantumismekanismien etenemisnopeuden mukaan olettaen, että suoritetaan muutakin valvontaa kuin värähtelymittauksia.						

Taulukon arvoja voidaan käyttää apuna määrittäessä koneiden mittausvälejä. Mittaustoimintaa aloitettaessa mittausaikaväliksi valitaan tyypillisesti 2–4 viikkoa. Mittausaikaväli voidaan määrittää konekohtaisesti sopivaksi, kun kokemusta ja tietoutta laitteiden toiminnasta on kertynyt. Kun mittauksissa havaitaan vikaantumisen merkkejä, tulee mittaustoimintaa tehostaa. Mittaustoimintaa tehostetaan lyhentämällä mittausaikaväliä tai ottamalla käyttöön toinen mittausmenetelmä. Esimerkiksi vian havaitsemisen jälkeen voidaan ottaa käyttöön

lämpötilamittaukset värähtelymittausten tueksi. Mittausaikaväliä lyhennetään, jotta vikaantumista pystytään seuraamaan tarkemmin. [5, s. 29–30.][10, s. 55.]

Kunnonvalvonnan mittaustoimintaa aloitettaessa valitaan tarkoituksella lyhyempi mittausaikaväli. Kokemuksen karttuessa mittausvälejä voidaan muuttaa. Kuitenkin jos mittausaikaväli arvioidaan lyhyemmäksi kuin yksi viikko, on syytä harkita kiinteää mittausjärjestelmää. [5, s. 29–30.][10, s. 55.]

## 5.7 Värähtelymittausten valvontamenetelmät

Värähtelymittausten tulosten tulkinnassa kiinnitetään huomiota siihen, että ovatko mittaustulokset sallittujen rajojen sisällä ja poikkeako mittaustulos sekä mittaustuloksen trendi edellisistä mittauksista. Pääsääntö värähtelymittausten vianmäärityksessä on, että värähtelyn taajuus kertoo vian tyypin ja amplitudi kertoo vian vakavuusasteen [5, s. 114]. Värähtelymittausten yleisimmät valvontamenetelmät ovat tunnuslukujen kehittymisen seuranta ja spektri- eli taajuusanalyysi. Korkeataajuisilla värähtelymittausmenetelmillä signaalin analysointiin käytetään yleensä tunnuslukuvalvontaa tai verhoikäyrämenetelmää. Yhtä valvontamenetelmää ja analyysitapaa ei kuitenkaan kannata soveltaa kaikkiin tuotantolaitoksen koneisiin, sillä yhden valvontamenetelmän käytössä osa koneisiin syntyvistä vioista saattaa jäädä kokonaan havaitsematta [5, s. 29]. [9, s. 282.][6, s. 33.] [10, s. 69.]

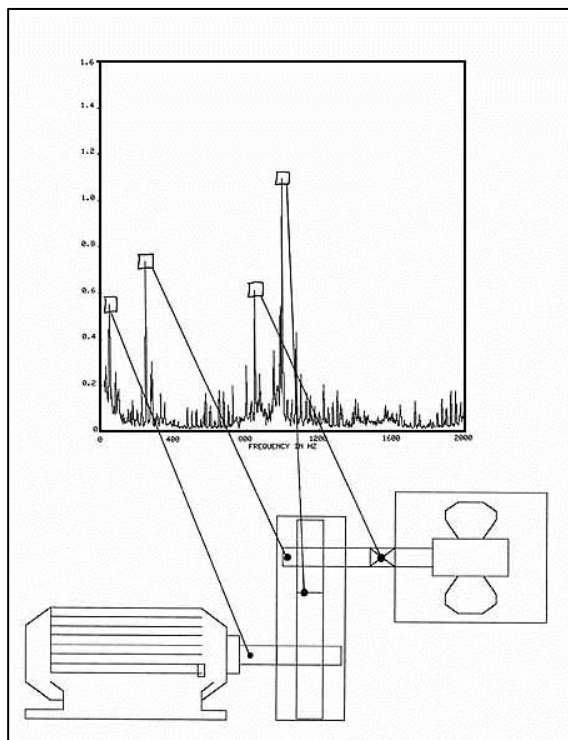
### 5.7.1 Tunnuslukuvalvonta

Tunnuslukuvalvonnassa on hyvä käyttää useita tunnuslukuja, sillä joillakin taajuuksilla, esimerkiksi laakerien vikataajuuksilla, jo vähäinen värähtely voi olla merkinä vakavasta vauriosta. Tunnuslukuvalvonnassa värähtelysignaalin tunnusluvuista muodostetaan trendi. Yleisesti käytettäviä tunnuslukuja taajuustasossa ovat esimerkiksi pyörimistaajuudella tapahtuvan värähtelyn voimakkuus, pyörimistaajuuden monikerroilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuus, värähtelyn voimakkuus vierintälaakerin sysäystaajuuksilla ja valitun taajuuskaistan tehollisarvo. Yleisimmin käytettyjä aikatasossa laskettavia tunnuslukuja ovat tehollisarvo, huipusta huippuun -arvo, huippuarvo ja huippukerroin. Vaativinta tunnuslukuvalvonnassa on suunnitella mittausmääritykset ja tunnusluvut, sillä tunnuslukujen tulee ilmaista yksittäisen vian ke-

hitystä. Näin ollen tunnusluvusta pystytään päättämään laitteessa oleva vika ja sen kehittymisnopeus. [9, s. 282–283.]

### 5.7.2 Spektrivalvonta eli taajuusanalyysi

Spektrianalyysi on yleisimmin käytetty vianmääritysmenetelmä. Värähtelynopeus ja -kiihtyvyys ovat yleisimmin käytettyjä suureita spektrianalyyseissä. Spektrivalvontamenetelmä kattaa monia vikaantumismekanismeja. Taajuusalueen valinta on erittäin tärkeää spektrivalvonnassa, jotta vian aiheuttama värähtely saadaan mitattua. Spektrianalyyseissä FFT-laskennalla muodostetaan amplitudispektri, jossa esitetään värähtelyn voimakkuus eri taajuuksilla. Taajuus- ja amplituditietoa käytetään koneen eri osien kunnan arvioinnissa. Kun eri koneenosien värähtelyn eri taajuudet ja niitä vastaavat värähtelyamplitudit erotetaan toisistaan, pystytään yksittäisten koneen osien kuntoa valvomaan ja arvioimaan. Kuvassa 22 on esitetty koneesta tulevien eri vikataajuuksien erottaminen spektrissä. [9, s. 282, 285.][5, s. 88–91.][10, s. 68.]



Kuva 22. Koneen eri vikataajuudet [5, s. 88].

Spektrivalvonta vaatii mittausten tulkitsijalta paljon kokemusta ja tietämystä koneiden käyttäytymisestä, sillä kaikki spektrissä näkyvät piikit eivät ilmaise jotain vikaa, vaan johtuvat koneen normaalista käynnistä johtuvista voimista. Spektrivalvonta perustuu siis koneen eri osien vikataajuuksien tuntemiseen, koneen kierrosluvun tietämiseen ja riittävän laaja-alaisen sekä tarkkaerotteisen mittauksen tekemiseen oikealla mittaussuureella. Spektrianalyysissä voidaan käyttää apuna liitteessä 1 olevaa yleistä vianhakutaulukkoa, sillä sen perusteella saadaan helposti selville häiriön syy, kun verrataan vian värähtelytaajuutta vianhakutaulukosta löytyviin taajuuksiin. [5, s. 88–91.][8, s. 7.]

### 5.8 Värähtelymittaustoiminnan suunnittelu

Värähtelyvalvonnan suunnittelu aloitetaan kartoittamalla laitteet, joille värähtelyvalvonta on teknisesti mahdollista toteuttaa. Kaikille tehtaan laitteille on hyvä tehdä kriittisyysanalyysi, jonka perusteella valitaan laitteet värähtelyvalvonnan kohteiksi. Värähtelyvalvonnan kohteiksi tulee siis valita laitteet, joille mittausten toteuttaminen on kannattavaa. Valituille laitteille määritellään mittaussuunnitelma, jossa määritetään käytettävät valvontamenetelmät, menetelmäkohtaiset raja-arvot, mittausvälit, käytettävät mittausjärjestelmät, mittaustoiminnan käytännön järjestelyt, mittausten dokumentointi, raportointi ja seuranta. Valvottavien kohteiden valinnassa tulee ottaa huomioon turvallisuus- ja ympäristötekijät, tuotannon menetyksen kustannustekijät ja kunnossapidon kustannustekijät. Lisäksi kunnonvalvontaa aloitettaessa pitkään käytössä olleille laitteille tulee tehdä kuntokartoitus, jonka perusteella arvioidaan laitteiden sen hetkinen kunto [10, s. 55]. [10, s. 49–50.]

Valvottavista laitteista tulee määritellä vikaantuvat komponentit, tyypilliset ja todennäköiset vikaantumismenetelmät ja todennäköinen vikaantumisaika. Laitteille tulee määrittää riittävä kunnonvalvonnan taso eli valita sellaiset menetelmät ja analysointitavat, joilla merkittävimmät vikaantumismenetelmät saadaan tunnistettua ajoissa. Lisäksi tulee selvittää, tarvitaanko tarkempaa valvontaa, esimerkiksi tunnusluku- tai spektrivalvontaa. Kyseisiä menetelmiä käytetään silloin, kun vian kehittymistä ei pystytä luotettavasti arvioimaan kokonaistasoarvon perusteella. [5, s. 29.][10, s. 50.]

Valvottavat kohteet tulee arvioida, jotta voidaan varmistua laitteiden sopivuudesta värähtelyvalvonnan piiriin. Jokaisesta kohteesta on arvioitava, voidaanko laitteen kunnonvalvonta toteuttaa tarkoituksenmukaisesti värähtelymittausmenetelmillä ja onnistuuko mittauspisteiden

sekä mittauslaitetyyppien valinta standardien mukaisesti. Mittausjärjestelmä tulee valita mahdollisten vikojen kehitysnopeuden ja kohteen suojaustarpeen mukaan. [10, s. 51, 53.]

Suunnittelussa tulee myös määrittää laitteille värähtelyn voimakkuuden raja-arvot, jotka määritetään käyttäen valmistajan suosituksia, konetyypin värähtelystandardeja, tärinärasitusrajoja tai kunnonvalvontakokemuksen perusteella. Värähtelyvoimakkuuden raja-arvoihin määritellään kohteille hälytysrajat, jotta laitteiden kunnossa tapahtuvat muutokset voidaan havaita helposti. Varoitusrajan ylittäminen ilmaisee, että kohteen kunnonvalvontaa tulee tehostaa, etsiä hälytyksen aiheuttaja ja varautua huoltamaan tai korjaamaan laitetta. Vaurioraja puolestaan ilmaisee vakavaa vauriovaaraa ja edellyttää laitteen huoltamista tai korjaamista välittömästi tai jopa laitteen pysäyttämistä välittömästi. Varoitusrajan ja vauriorajan alapuolelle voidaan määrittää huomautusraja, joka ilmaisee laitteen normaalista poikkeavaa tilaa. [10, s. 51.]

Laitteista mitatut värähtelyjen perusarvot tulee säilyttää laitteen koko eliniän. Perusarvot mitataan joko koneen ollessa uusi tai täyshuollon jälkeen. Tärkeimmät vian kehittymistä kuvaavat mittaustulokset ja muut vikadokumentit, esimerkiksi johtopäätökset, korjausraportit, laskelmat ja valokuvat, tulee vian selvityksen yhteydessä tallentaa. [10, s. 58.]

Värähtelymittaukset tulee tehdä aina huollon ja korjauksen jälkeen mittausväleistä poiketen. Huollon ja korjauksen jälkeisillä mittauksilla varmistetaan huollon onnistuminen sekä saadaan uudet vertailuarvot laitteen kunnonvalvontaa varten. [10, s. 55.]

Mittaustoimintaa tulee tehostaa, kun valvottavissa kohteissa huomataan merkittäviä muutoksia suureiden arvoissa tai todetaan, että värähtelyvalvonnalla ei pystytä saamaan riittävää tietoa laitteen kunnosta ja vian kehittymisestä. Mittaustoimintaa voidaan tehostaa lyhentämällä mittausvälejä tai ottamalla tilapäisesti käyttöön täydentävä mittausmenetelmä, esimerkiksi lämpökuvaus tai voiteluaineanalyysi. Mittausjärjestelmää voi täydentää myös ottamalla käyttöön jatkuvatoimisen mittauksen lisäksi kannettava mittausjärjestelmä tai kannettavan mittausjärjestelmän lisäksi kiinteä tai puolikiinteä järjestelmä. Täydentäviä menetelmiä voidaan käyttää myös varmentamaan vianmääritystä ja johtopäätöstä. [10, s. 51, 55.]

Mittaustoimintaa järjestettäessä tulee ottaa huomioon useita eri asioita, jotta mittaustoiminnasta saadaan sujuva ja hyödyllinen. Kaikilla organisaatiotasolla tulee olla mittaustoimintaan koulutettua henkilöstöä. Selkeät mittauskäytännöt tulee laatia ja tulee määrittää henkilö tai henkilöt, joilla on suoritusvastuu mittaustoiminnasta. Lisäksi tulee määrittää henkilö tai henkilöt, joilla on ylläpitovastuu mittausohjelmistoista. Mittaustulosten tulkintaan tulee järjestää

mittaustoiminnan parissa työskenteleville koulutusta, jotta mittausten tekeminen olisi hyödyllistä ja tuloksia osattaisiin tulkita oikein. Mittaustoimintaa järjestettäessä tulee varmistaa, että mittaustulosten tarkastelu on mahdollista välittömästi mittausten jälkeen. [10, s. 57.]

Kunnonvalvonnan värähtelymittauksia suunniteltaessa tulee määritellä, kuinka toimintaa seurataan ja kehitetään. Seurannassa ja kehityksessä tulee ottaa huomioon kunnonvalvontasuunnitelman toteutuminen, hälytysrajojen muuttaminen tarvittaessa, valvontamenetelmien soveltuvuus ja uudistaminen tarvittaessa, kunnonvalvonnalla saavutetut hyödyt ja mittausten päivittäminen tarvittaessa. [10, s. 59.]



## 6 ALKUTILANNE OULUN TEHTAALLA

### 6.1 Mittauslaite, Shock Pulse Tester T2001

Oulun tehtaalla on käytössä SPM Instrumentin Shock Pulse Tester T2001. Mittauslaite on vuoden 1991 malli. Mittauslaitteen toiminnot perustuvat kahteen eriin kunnonvalvontamenetelmään: laakereiden kunnonvalvontaan iskusysäysmenetelmällä ja tärinänvalvontaan ISO normin 2372 mukaisesti. Mittauslaitteessa on yhdistetty iskusysäys-, tärinä- ja kierroslukumittarin toiminnot. Mittauslaite on tarkoitettu koneiden käyttökunnon määrittämiseen mekaanisten vikojen löytämiseksi ja tiedon saamiseksi tehokkaan ennakoivan kunnossapidon käyttöön. Mittauslaitteella voidaan valvoa vierintälaakereiden käyttökuntoa ja laitteiden linjaus-, epätasapaino- ja rakenneheikkouksien vaikutusta tärinän kokonaistasoon. Mittauslaitetta käytetään yhdessä SPM:n Condmaster Ruby -analysointiohjelman kanssa. Ohjelman avulla luodaan mittauspisteet ja tallennetaan niiden alkuarvot. Lisäksi ohjelmalla luodaan mittausreitti, jossa ovat mitattavat mittauspisteet mittausjärjestyksessä. [11, s. 4.]

Mittauslaitteella pystytään mittaamaan iskusysäyksiä kolmella eri tavalla: käsikoettimella, pikaliitinanturin avulla ja kiinteästi asennetulla iskusysäysanturilla. Käsikoetinta tulee painaa mittauskohtaa vasten, koska koettimen kärki on jousikuormitettu ja kumimuhvin tulee puristua pintaa vasten, niin saadaan aikaan kunnan kosketus. Pikaliitinanturilla mitataan laakeripesiin asennetuista mittausnipoista. Mittausnipan kosketuspinnan tulee olla puhdas. Kosketuspinnalle on hyvä laittaa pieni määrä rasvaa tai öljyä, sillä se parantaa signaalin kulkua. Iskusysäysanturit voidaan asentaa myös kiinteästi laakeripesään. Anturilta viedään kaapeli mittausliittimeen, johon mittauslaite liitetään mittausta tehdessä. Mittaustieto kiinteästi asennetulta anturilta voidaan viedä myös suoraan valvomon näyttöpäätteelle. [11, s. 8, 26.]

Mittauslaitteeseen on mahdollista kiinnittää kuulokkeet. Kun iskusysäysarvot asettuvat keltaiselle tai punaiselle alueelle, voidaan arviointiin käyttää apuna kuulokkeita. Kuulokkeiden avulla mittaja voi kuunnella iskusysäysten äänikuvioita ja niiden perusteella päätellä mahdollisia värähtelyn kasvun syitä. Esimerkiksi laakerin ollessa ehjä kuulokkeista kuuluu tasainen ääni, mutta mikäli laakeri on vaurioitunut, kuuluu epäsäännöllisiä ääniä sekä äänet ovat korkealla äänimaton yläpuolella. [11, s. 13.]

Tärinämittaus mittauslaitteella tapahtuu pietsosähköisellä kiihtyvyyssanturilla. Anturi kiinnitetään magneetin avulla laakeripesään tai muuhun mittauskohtaan. Tärinäanturi on herkkä pi-

tuusakselinsa suuntaisesti, joten näin saadaan tarkkoja mittaustuloksia koneen säteis- tai aksiaalitärinästä. Tärinämittauksien avulla pyritään selvittämään liiallisen tärinän syitä, esimerkiksi osan irtonaisuutta, laitteen epätasapainoa, rakenteen jäykkyyttä tai aksiaalista liikettä. [11, s. 9.]

Mittauslaitteeseen kuuluu myös kierroslukuanturi. Kierroslukuanturin avulla voidaan tarkistaa koneen pyörimisnopeus. Kuvassa 23 on esitetty Shock Pulse Tester T2001, käytettävät anturit ja kuulokkeet.



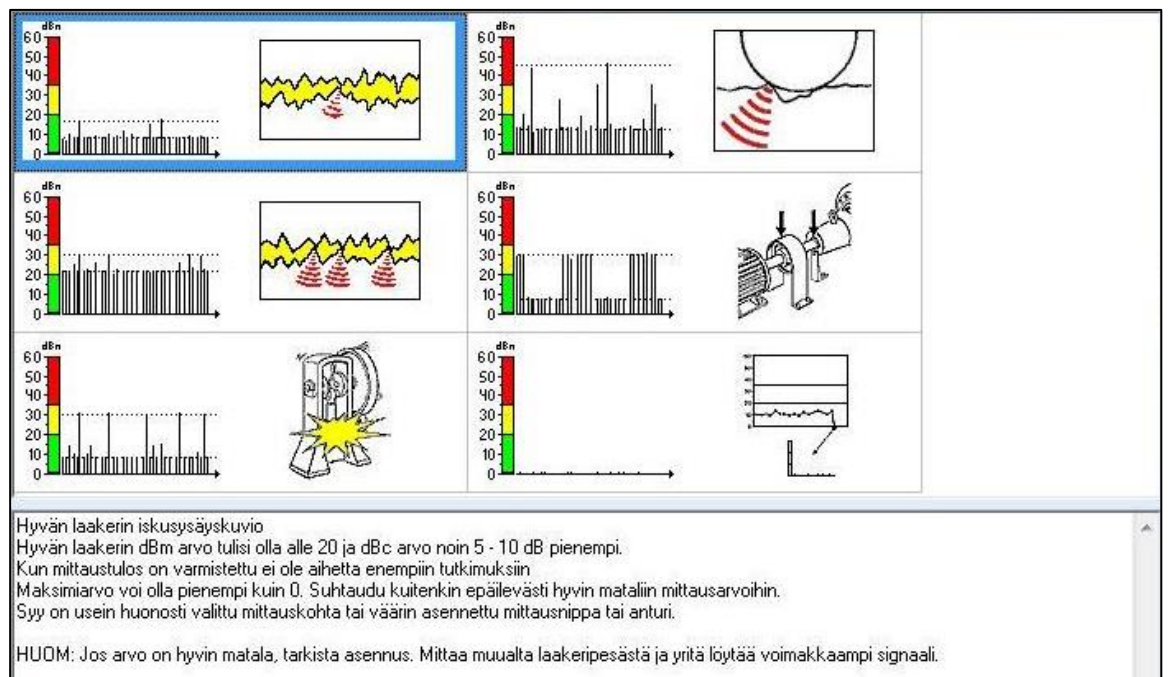
Kuva 23. Mittauslaite Shock Pulse Tester T2001 ja siihen kuuluvat osat: kuulokkeet, käsi-koetin, iskusysäysanturi, tärinäanturi ja kierroslukuanturi.

## 6.2 SPM:n analysointiohjelma, Condmaster Ruby

SPM Instrumentin Condmaster Ruby -analysointiohjelma on asennettu Oulun tehtaalle maaliskuussa 2014, sillä vanha Condmaster Nova -ohjelma tuli päivittää uuteen versioon. Condmaster Ruby on kattava kunnonvalvonnan ja ennakoivan kunnossapidon ohjelma. Condmaster Ruby -ohjelman avulla pystytään analysoimaan värähtelymittauksia. Lisäksi ohjelman avulla tehdään värähtelymittausreitit, jotka siirretään mittauslaitteelle. [19.]

Condmaster Ruby -ohjelmaa voidaan käyttää kaikkien SPM:n mittauslaitteiden kanssa. Ohjelma kerää ja tallentaa mittaustulokset niin kannettavista kuin online-mittauslaitteista. Condmaster Ruby -ohjelma sisältää edistyneen värähtelymittausten analysointipaketin uusimmille SPM:n Leonova-sarjan mittauslaitteille. Ohjelmisto on modulaarinen, joten ohjelmiston toiminnot voidaan valita asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Condmaster by -ohjelmasta voidaan hyödyntää vain pieni osa, kun käytössä on vanhempi mittauslaite, kuten Oulussa käytettävä Shock Pulse Tester T2001. [19.][20.]

Condmaster Ruby -ohjelmaan kuuluvat muun muassa laakerirekisteri, voitelutiedot, laakerien käyttöiän laskenta, ISO-raja-arvot, SPM:n käyttökunnon arviointisäännöt, matemaattiset värähtelyanalyysimallit ja vikaoireet. Kuvassa 24 on esitetty SPM:n käyttökunnon arviointisäännöissä käytetty arviointitaulukko, jonka avulla iskusysäysmittausten tulosten arviointi on helppoa. Arviointitaulukon antaa vinkkejä mahdollisista vioista ja niiden iskusysäysarvoista.



Kuva 24. Condmaster Ruby -ohjelman SPM:n arviointitaulukko.

Condmaster Ruby -ohjelma sisältää Leonova Diamond -mittauslaitteelle suunniteltuja oletusasetuksia ja koneen käyttökunnon arvioinnissa tarvittavaa asiantuntemusta. Esimerkiksi ohjelmiston avulla voidaan analysoida uutta SPM HD -mittaustekniikkaa, jos mittaajalla on käytössä uusin Leonova Diamond -mittauslaite. Lisäksi erityisominaisuutena Condmaster Ruby -ohjelmassa on coloured spectrum overview, condition manager ja graafinen selaus.

Coloured spectrum overview on historianäkymä, jossa voidaan nähdä useita spektrejä pidemmältä ajalta. Condition manager on joustava hälytysten määrittelyjärjestelmä, jossa hälytykset voidaan määrittää niin, että ne automaattisesti mukautuvat koneen toimintaominaisuuksiin. Graafisen selauksen avulla laite- ja mittauspistekansiot voidaan järjestää haluttuun järjestykseen. Graafisen selauksen ansiosta myös laitteista voidaan lisätä kuvat helpottamaan laitteiden tunnistusta. [19.][21.][20.]

### 6.3 Mittauskohteet ja mittausmenetelmät

Oulun tehtaalla on käytössä kiinteä värähtelymittausjärjestelmä, mutta suurin osa mittauksista suoritetaan kuitenkin kannettavalla mittauslaitteella. Tehtaan kahdelta suurimmalta puhaltimelta mitataan kiinteästi asennetuilla antureilla tärinää, joista tieto menee suoraan valvomoon näyttöpäätteelle. Näyttöpäätteelle spektri ilmenee nopeuden tehollisarvona mm/s, jolloin sen tulkitseminen on varsin helppoa. Kiinteän mittausjärjestelmän piirissä olevat kaksi puhallinta kuuluvat tehtaan kriittisimpien puhaltimien joukkoon.

Kannettavalla mittauslaitteella tehtävät mittaukset suoritetaan reittimittauksina, jolloin tietyt laitteet käydään mittaamassa yhdellä kertaa mittauslaitteen antamassa järjestyksessä. Tällä hetkellä tehtaalla on käytössä yksi mittausreitti, johon kuuluu 18 mitattavaa laitetta. Reitille kuuluu 16 puhallinta moottoreineen, yksi muu pyörivä koneisto sekä yksi kuljetinmoottori. Taulukossa 7 on esitetty mittausreitille kuuluvat laitteet. Taulukossa ylivivattua laitetta ei ole enää olemassa.

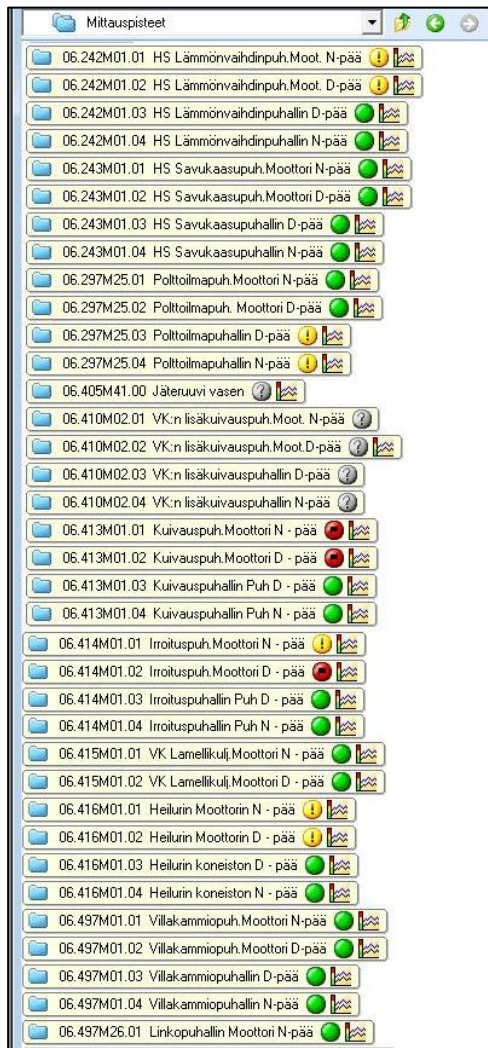
Taulukko 7. Mittausreititin laitteet.

1	Linkopuhallin	10	Kuivauspuhallin
2	Villakammio puhallin	11	KU-savukaasupuhallin
3	HS savukaasupuhallin	12	Karkaisuilmahuuhallin
4	HS lämmönvaihdinpuhallin	13	Tunneli-ilmahuuhallin
5	Polttoilmahuuhallin	14	Jäähdytyspuhallin 1
6	VK lamellikuljetin moottori	15	Jäähdytyspuhallin 2
7	Heilurin moottori ja koneisto	16	Tapun siirtopuhallin
8	Irrutuspuhallin	17	Pölynpoistopuhallin 1
9	<del>VK:n lisäkuivauspuhallin</del>	18	Pölynpoistopuhallin 2

Mittaukset suoritetaan 4 viikon välein, ja tulosten analysointi tehdään heti mittaustoiminnan jälkeen. Mittausreitin kierto kestää 2–3 tuntia kerrallaan. Mittauskierroksen jälkeen mittaaja kiertää reitin uudelleen ja voitelee laakerit.

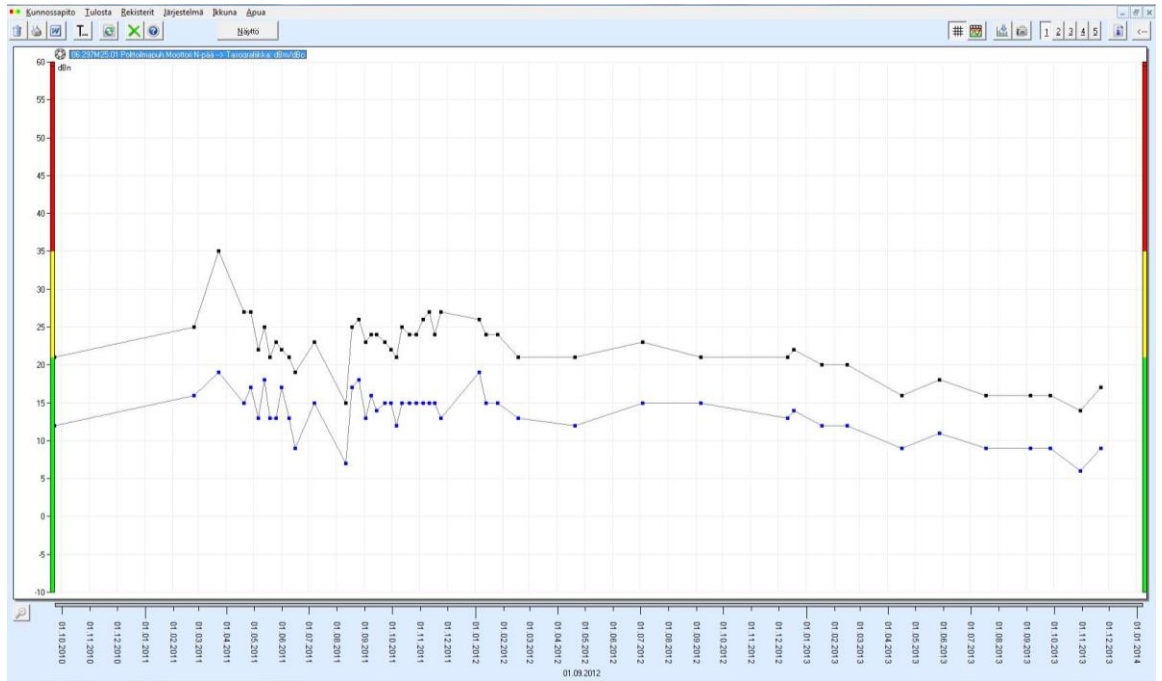
Kunnossapidon työntekijät ovat valinneet mittauskohteina olevat laitteet. Mitatut laitteet ovat kriittisimpiä tai muuten vain tärkeimpiä laitteita. Laitteiden vikaantuessa tai rikkoutuessa tuotanto pysähtyy kokonaan. Tällä hetkellä tehtaalla on yksi työntekijä, joka suorittaa värähtelymittaukset. Iskusysäysmittauksia varten kaikkien mitattavien laitteiden mittauspisteisiin on asennettu mittausnipat. Mittaustulosten tarkastuksiin ja lisämittauksiin käytetään tarvittaessa käsikoetinta. Mittausmenetelmänä on käytetty iskusysäysmenetelmää. Lisäksi kahdelta tärkeimmältä puhaltimelta on mitattu värähtelyä myös reittimittauksia. Värähtelymittaukset puhaltimien osalta on suoritettu lähimpänä puhallinta olevan laakerin kohdalta kolmesta eri suunnasta. Iskusysäysmittaukset on suoritettu iskusysäysanturilla ja värähtelymittaukset kiihtyvyyssanturilla. Mittauslaite antaa värähtelyn mittaustuloksen nopeuden tehollisarvona mm/s.

Tulosten analysointi Condmaster Ruby -ohjelmalla on varsin helppoa ja nopeaa. Mittaustulokset siirretään mittauslaitteelta ohjelmaan. Shock Pulse Tester T2001 -mittauslaitetta käytettäessä Condmaster Ruby -ohjelman ominaisuuksista voidaan hyödyntää iskusysäysmittausten sekä värähtelymittausten analysointi. Mittaustulokset tarkastellaan laitekohtaisesti. Kaikki mittauspisteet näkyvät ohjelman ruudulla, joita painamalla päästään näkemään mittauspistekohtaiset mittaustulokset. Tällä hetkellä ohjelmassa kaikki mittauspisteet näkyvät listattuna allekkain. Kuvassa 25 on listausta tämän hetkistä ohjelmaan kirjatusta mittauspisteistä.



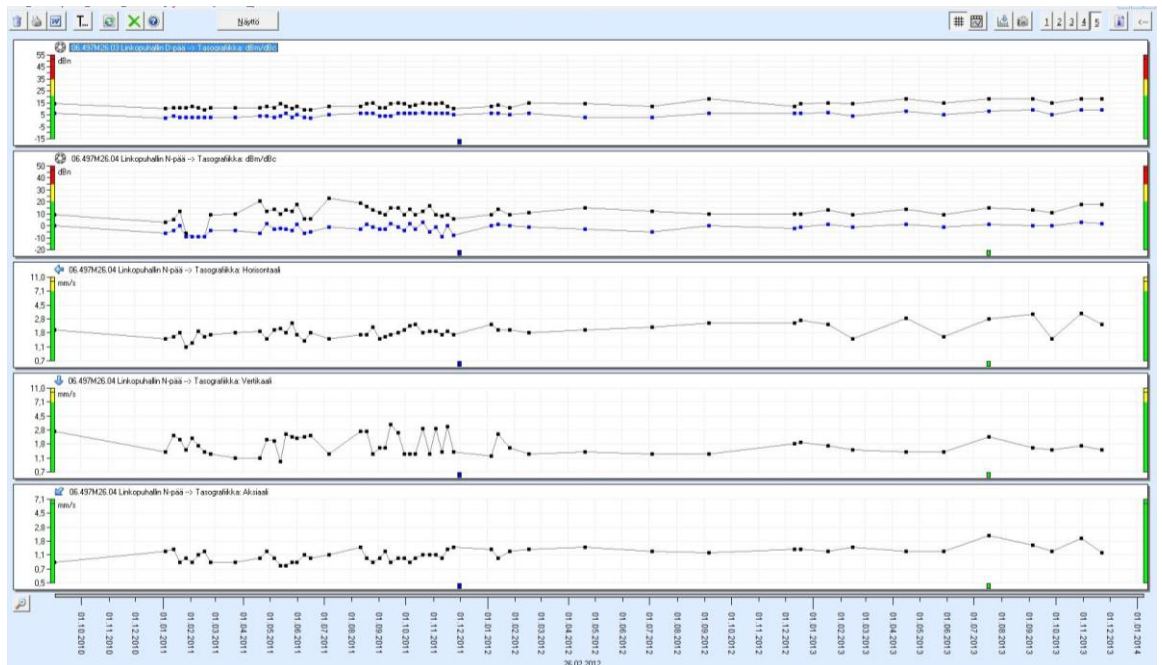
Kuva 25. Mittauspisteitä Condmaster Ruby -ohjelmassa.

Mittauspisteen kohdalta saadaan avattua graafiset kuvaajat mittauksista. Kuvaajanäkymään voidaan avata yhden mittauspisteen mittausarvot tai koko laitteen kaikki mittausarvot. Kuvasssa 26 on esitetty erään puhaltimen sähkömoottorin n-pään mittauspisteen iskusysäysmittausten mittautulokset. Kuvaajan vaaka-askelilla on ilmaistu päivämäärät, jolloin mittaukset ovat tehty ja pystyakselilla mittausarvon tulokset, tässä tapauksessa iskusysäysarvot dBn.



Kuva 26. Puhaltimen moottorin iskusysäysarvot.

Kuvassa 27 on esitetty erään puhaltimen iskusysäysmittausarvot sekä tärinärasitusmittausten mittaustulokset kolmesta eri suunnasta mitattuna.



Kuva 27. Puhaltimen mittauspisteiden mittaustulokset.

Kuvassa 27 kaksi ylintä kuvaajaa ovat puhaltimesta tehdyt iskusysäysmittaukset ja kolme alinta ovat värinämittausten tulokset horisontaalisesti, vertikaalisesti ja aksiaalisesti puhallinta lähimpänä olevasta laakerista mitattuna. Kuvaajista pysytään helposti näkemään, millä tasolla värähtelyt ovat ja ovatko ne sallittujen rajojen sisällä. Kuvaajista näkyvät myös kaikki historiatiedot eli kaikkien aikaisempien mittauskertojen mittaustulokset. Kuvaajien skaalausta voidaan alareunasta muuttaa, jotta kaikki historiatiedot eivät näy.



## 7 KEHITYSSUUNNITELMA

Työn tavoitteena oli alkukartoituksen jälkeen saada kehitettyä värähtelymittaukset ajan tasalle. Työssä suurimpana ongelmana oli, että vanhan analysointiohjelman vanhenemisen myötä värähtelymittauksia ei ollut voitu tehdä, ennen kuin päivitetty versio analysointiohjelmasta asennettiin. Analysointiohjelman asennuksen jälkeen ohjelman käyttöön ja sen käyttömahdollisuuksiin tuli tutustua. Päivitetyn analysointiohjelman ja nykyisen mittauslaitteen käyttömahdollisuuksia tuli selvittää. Lisäksi työssä selvitetään uuden mittauslaitteen hankintaa ja sen käyttömahdollisuuksia yhdessä analysointiohjelman kanssa.

Oulun tehtaalla värähtelymittauksista löytyi kehitettävää. Mittausjärjestelmästä tulisi pitää parempaa huolta. Alkukartoituksen perusteella huomattiin, että analysointiohjelman kirjatut laitteet ja mittauspisteet eivät olleet ajan tasalla, vaan joukosta löytyi poistettavia laitteita. Poistettavat laitteet olivat sellaisia, joita ei ollut enää käytössä, ja sellaisia, joiden mittaaminen koettiin kannattamattomaksi. Uusia mitattavia laitteita mittausten piiriin löytyi muutamia. Kehityssuunnitelmassa käsitellään mittauslaitteen, analysointiohjelman käytön, mittauskohteiden ja mittaushenkilöstön kehittämismahdollisuuksia.

Kehityssuunnitelmaa aloitettaessa tuli kriittisyysanalyysin ja IFS-tuotannonohjausjärjestelmän laitekantatietojen avulla selvittää kaikki mahdolliset mitattavat laitteet. Mahdollisia mitattavia laitteita olivat käyttömootorit, puhaltimet ja pumput. Laitekantatietojen perusteella kaiken kaikkiaan puhaltimia tehtaalta löytyy 26 kappaletta ja pumppuja 13 kappaletta. Suuria yksittäisiä käyttömootoreita ei löytynyt mittausreitillä olevan käyttömootorin lisäksi. Kriittisyysanalyysistä saatiin kriittisyysluvut kaikille laitteille. Laitteiden selvittämisen jälkeen työntekijöitä haastatteleamalla löytyivät laitteet, joille värähtelymittausten tekeminen olisi järkevää.

### 7.1 Mittausreitit ja mittausmenetelmien kehitys

Condmaster Ruby -ohjelmassa olevat laitetiedot siistittiin aluksi ja ohjelmasta poistettiin laitteet, joita ei ollut enää käytössä ja joiden mittaaminen ei ollut järkevää. Ohjelmasta kokonaan poistettavat laitteet olivat sellaisia, jotka eivät olleet värähtelymittausten kannalta oleellisia laitteita. Kyseisiä laitteita ei koskaan ollut otettu mittausreitille, joten laitteiden poistaminen

koettiin sopivaksi, etteivät ylimääräiset laitteet sekoittaisi ohjelman käyttöä. Alkuperäiseltä mittausreitiltä poistettiin yksi laite kokonaan, koska sitä ei ollut enää olemassa.

Kriittisyysanalyysin ja laitekantatietojen perusteella valikoiduista laitteista valittiin työntekijöitä haastatteleamalla mittausreitille kirjattavat laitteet. Alkuperäisellä mittausreitillä olleet laitteet säilytettiin mittausreitillä, yhtä poistettua laitetta lukuun ottamatta, sillä laitteet koettiin tärkeäksi mitata. Kokonaan uusia laitteita Condmaster Ruby -ohjelmaan lisättiin kaksi, yksi pumppu ja yksi puhallin. Pumppu valikoitui mittausreitille, koska se on tehtaan suurin pumppu ja sen mittaaminen oli työntekijöiden mielestä järkevää. Uusi lisättävä puhallin puolestaan on tärkeä puhallin, vaikka kooltaan se onkin aika pieni. Uusille laitteille tuli kirjata ohjelmaan mittauspisteet, joita kummallekin laitteelle tuli neljä kappaletta. Mittauspisteiden kirjaamiseen otettiin mallia jo ohjelmaan lisätyistä laitteista. Lisäksi analysointiohjelmaan oli valmiiksi kirjattu kolme puhallinta, joita ei ollut mittausreitille lisätty. Puhaltimet haluttiin ottaa mukaan mittausreitille, sillä puhaltimet ovat tärkeitä tehtaan toiminnan kannalta. Viisi uutta laitetta lisättiin mittausreitille. Taulukossa 8 on esitetty uuden mittausreitien laitteet. Taulukon viisi viimeistä laitetta ovat reitille lisätyt uudet laitteet.

Taulukko 8. Uuden mittausreitien laitteet.

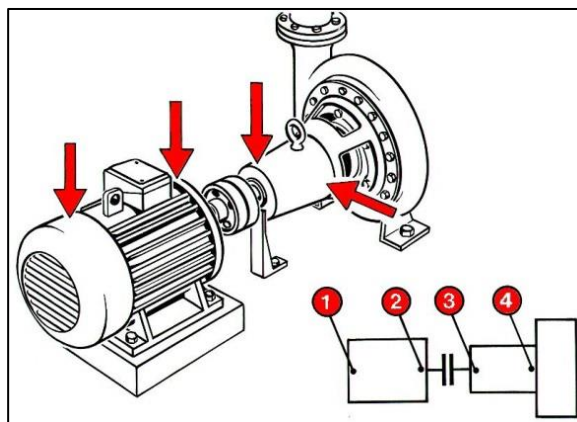
1	Linkopuhallin	12	Tunneli-ilmapuhallin
2	Villakammionpuhallin	13	Jäähdytyspuhallin 1
3	HS Savukaasupuhallin	14	Jäähdytyspuhallin 2
4	HS Lämmönvaihdinpuhallin	15	Tapun siirtopuhallin
5	Polttoilmapuhallin	16	Pölynpoistopuhallin 1
6	VK lamellikuljetin moottori	17	Pölynpoistopuhallin 2
7	Heilurin moottori ja koneisto	18	Uunin jäähdytysvesipumppu
8	Irrotuspuhallin	19	KU-poistopuhallin 1
9	Kuivauspuhallin	20	KU-poistopuhallin 2
10	KU-savukaasupuhallin	21	Ku-poistopuhallin 3
11	Karkaisuilmahuuhallin	22	Suodattimen lämmityspuhallin

Kaikille mittausreitillä oleville laitteille mittausmenetelminä tulee käyttää iskusysäysmenetelmää sekä värinämittausta. Iskusysäysmittauksia varten Condmaster Ruby -ohjelmaan tulee kirjata laitteiden laakeritiedot kuhunkin mittauspisteeseen. Iskusysäyksiä tulee mitata kaikkien laitteiden kaikista laakerikohdista. Pumpuille ja puhaltimille iskusysäysmittauspisteitä kertyy

neljä kappaletta. Tärinärasitus mittauksia varten ohjelmaan tulee kirjata, mihin tärinärasituksen koneluokkaan mitattava laite kuuluu. Ohjelma määrittää tärinärasituksen raja-arvot koneluokan perusteella.

Yleistä tärinämittausta tulisi tehdä jokaiselle mitattavalle laitteelle, jotta saataisiin tietoja laitteiden yleiskunnosta sekä perustan kunnosta. Jokaiselle puhaltimelle lisättiin tärinän mittaus puhaltimen n-päässä olevan laakerin kohdalle. Tärinämittauksia tehdään kolmesta toisiaan kohti suoraan olevasta suunnasta eli horisontaalisesti, vertikaalisesti ja aksiaalisesti. Näin ollen saadaan hyvin tietoja laitteen ja perustan kunnosta. Mikäli laitteissa ilmenee epätasapainoa, linjausvirhettä tai akselin kunnon heikkenemistä, saadaan mittauksien avulla tietoja viioista jo aikaisessa vaiheessa. Tärinämittauksilla mittausarvo on nopeuden tehollisarvo, ja sen perusteella saadaan hyvin tietoa laitteiden yleiskunnosta.

Mittausreitille lisättävän pumpun mittauspisteiden valintaan käytettiin apuna alla olevaa kuvaa, jonka perusteella mittauspisteet valittiin. Mittauspisteet sijaitsevat jokaisen laakerin kohdalla. Mittauspisteiden numerointi aloitetaan sähkömoottorin n-pään laakerista. Kuvassa 28 on esitetty pumpun mittauspisteet ja niiden numerointi.



Kuva 28. Pumpun mittauspisteet ja niiden numerointi [13].

Kaikille viidelle uudelle mittausreitille lisätylle laitteelle tulee asentaa mittausnipat iskusäysmittauksia varten. Ennen mittausnipojen asentamista laitteiden mittaaminen suoritetaan käsikoettimen avulla. Tärinämittausta varten mittauspisteet tulee merkitä jollain sopivalla tavalla, jotta mittauspiste olisi aina sama. Mittausten luotettavuus säilyy, kun mittaukset suoritetaan aina samasta kohdasta.

Iskusäysmittausten ja tärinämittausten valvontamenetelmä on tunnuslukuvalvonta, sillä molemmassa menetelmissä valvotaan värähtelysignaalin tunnuslukuja, joista muodostetaan

analysointiohjelmassa trendi. Iskusysäysmittauksissa värähtelyn voimakkuutta tarkkaillaan vierintälaakerin sysäystaajuuksilla ja värähtelymittauksissa tunnuslukuna toimii nopeuden tehollisarvo. Menetelmät yhdessä antavat hyvää tietoa laitteiden kunnosta. Kyseiset tunnusluvut ilmaisevat hyvin vian kehitystä. Iskusysäysmenetelmä antaa tiedon vierintälaakerien kunnosta ja värähtelymittausten avulla saadaan tietoa muun muassa laitteen epätasapainosta.

Shock Pulse Tester T2001 -mittauslaitetta käyttämällä värähtelymittauksissa on tärkeää tietää mitä eri suunnista mitatut arvot kertovat laitteen kunnosta. Mittaajan tulee tietää, että horisontaalinen mittaussuunta kertoo koneen epätasapainosta, vertikaalinen mittaussuunta perustan kunnosta ja aksiaalinen suunta akselin kunnosta sekä linjauksesta. Lisäksi mittaustuloksia tulee osata tulkita, jotta oikeasti saadaan tietoa laitteiden kunnosta.

Värähtelymittauksissa kiihtyvyyssanturin käyttö on hyvä valinta, sillä anturilla on laaja taajuusalue. Kiihtyvyyssanturit ovat epäherkkiä ympäristöolosuhteille, mikä on hyvä ominaisuus, sillä kivivillatehtaalla on paljon pölyä, jonkin verran kosteutta sekä melua. Lisäksi kivivilla tehtaalla on paljon muita värähtelylaitteita vierekkäin.

## 7.2 Mittauslaitteen mahdollisuudet

Oulun tehtaalla käytössä olevalla Shock Pulse Tester T2001 -mittauslaitteella pystytään tekemään tehtaalla tarvittavat iskusysäys- ja värähtelymittaukset. Laite on jo vanha, mutta sen käyttö on helppoa ja yksinkertaista. Uuden mittauslaitteen hankinta ei ole vielä välttämätöntä, mutta uudella laitteella pystyttäisiin saamaan värähtelymittauksista enemmän irti.

Tällä hetkellä Leonova Diamond on SPM:n uusin laite käytettäväksi värähtelymittauksiin. Uuden laitteen hankkimisen myötä mittaamisesta tulisi mielekkäämpää, sekä tuloksista saataisiin paljon enemmän irti jo mittauspäikällä. Uusi Leonova Diamond -mittauslaite sisältää tehokkaita analyysi- sekä vianetsintäominaisuuksia. Mittauslaitteessa on SPM HD -mittaustekniikka vierintälaakereiden käyttökunnonvalvontaan. SPM HD -menetelmää voidaan käyttää myös tehokkaasti vaihdelaatikkojen hammaspyörien hampaiden vaurioitumisesta aiheutuneiden iskusignaalien havaitsemiseen. SPM HD -menetelmällä pystytään koneen käyttökuntoa mittaamaan mittaalueella 1–20 000 kierrosta minuutissa, ja kyseisen ominaisuuden takia kunnonvalvontaa voidaan tehdä yhä useammille koneille. Mittauslaitteen taajuusalue on 0–40 kHz, joka mahdollistaa tarkat mittaukset laajalla taajuusalueella. Mittauslaitteella on lisäksi todella hyvä signaalikohinasuhde, jonka avulla pystytään tuottamaan tarkat

spektrit kaikista signaaleista niin heikoista ja energiasisällöltään alhaisista kuin päinvastaisista-kin signaaleista. RMS-värähtelymittauksissa saatujen arvojen lisäksi mittauslaite näyttää FTT-spektrin jo mittauspaikalla. FTT-spektriä pystytään myös analysoimaan analysointiohjelman avulla. FTT-spektristä on helppo tunnistaa muun muassa epätasapaino, linjausvirheet ja rakenteelliset heikkoudet. Mittauslaitteella pystytään tekemään monikanavamittauksia, jotka mahdollistavat kolmisuuntaisten anturien käytön sekä monisuuntaisen värähtelyvalvonnan, mikä lyhentää mittausreitteihin käytettävää aikaa. Laitteella pystytään mittauspaikalla tutki-maan spektrejä ja mittausarvoja kuvien kera. Mittausreitillä pystytään etenemään selkeiden kuvien avulla. Kuvassa 29 on esitetty Leonova Diamond -mittauslaitteen ominaisuuksia. [19.][22.]



Kuva 29. Leonova Diamond -mittauslaitteen ominaisuudet [20].

Lisäksi uuden SPM:n Leonova Diamond -mittauslaitteen hankkiminen olisi eduksi, sillä Leonova Diamond -mittauslaite toimii ladattavalla akulla, toisin kuin Shock Pulse Tester T2001 toimii paristoilla.

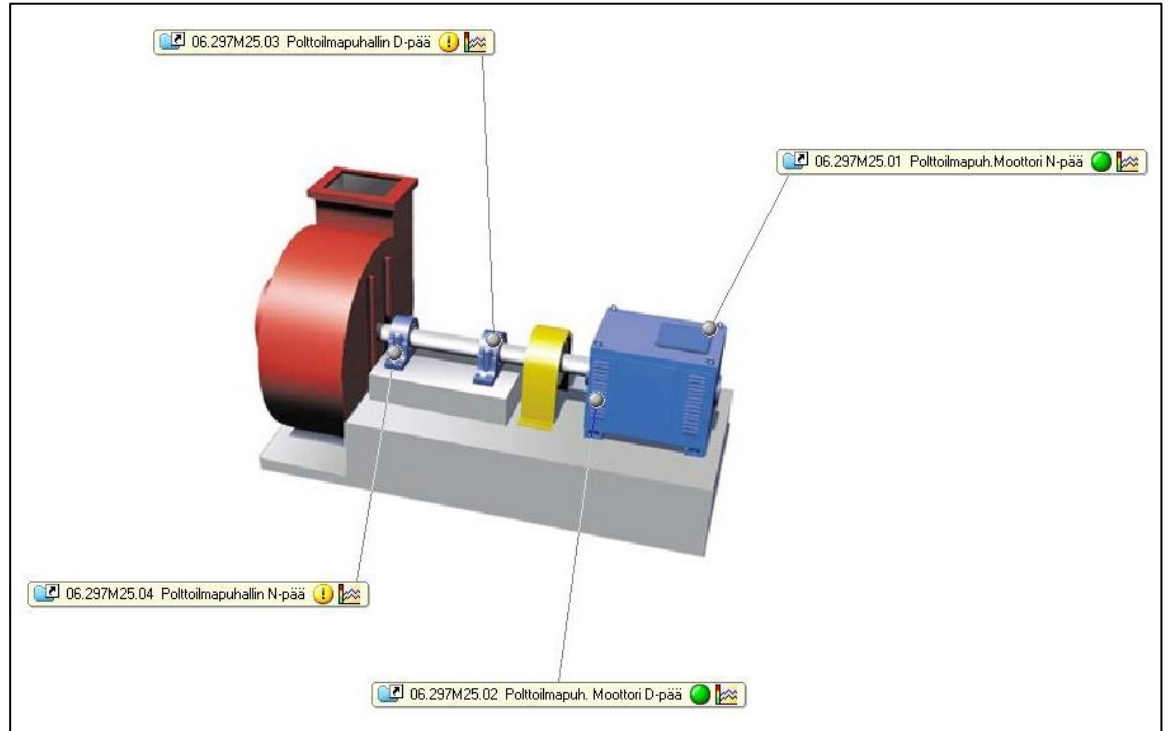
### 7.3 Condmaster Ruby -ohjelman mahdollisuudet

Shock Pulse Tester T2001 -mittauslaitetta käytettäessä Condmaster Ruby -ohjelman käyttöominaisuuksista saadaan aika vähän irti. Ohjelmassa pystytään luomaan mitattaville laitteille omat kansiot, joihin mittauspisteet sijoitetaan. Laitekohtaisiin kansioihin voidaan lisätä kuvat laitteista hahmottamaan mitattavaa laitetta, ja mittauspisteet voidaan kohdistaa kuvassa oikeaan mittauskohtaan. Näin ollen mittaustulosten analysointi on visuaalisesti tietoa antavampaa. Kuvan perusteella nähdään helposti, millä tasolla värähtely on milläkin laitteen kohdalla. Jokaiselle laitteelle tehtiin omat kansiot, jotka nimettiin laitteen mukaisesti. Laitteiden kansioihin siirrettiin kaikki laitteen mittauspisteet ja lisättiin kuva laitteesta. Mittauspistekansioita kertyi 22 kappaletta, niin kuin mitattavia laitteita. Kuvassa 30 on esitetty mittauspistekansiot.



Kuva 30. Condmaster Ruby -ohjelmaan lisätyt mittauspistekansiot.

Yllä olevasta kuvasta nähdään kaikki mitattavat laitteet ja laitetta painamalla päästään ikkunaan, jossa nähdään kaikki mittauspisteet ja johon kuvan lisääminen on mahdollista. Kuvassa 31 on esitetty kuva Condmaster Ruby -ohjelman mittauspistekansiosta, johon laitteesta on lisätty teoreettinen kuva ja mittauspisteet on kohdistettu oikeisiin paikkoihin.



Kuva 31. Laitteen kuva, johon mittauspisteet on kiinnitetty.

Kuvan avulla nähdään kaikkien laitteen mittauspisteiden tilanne. Mittauspisteen kohdalla oleva väripallo kertoo värähtelyn tason kyseisessä pisteessä. Mittauspisteen kuvaajaa päästään tarkastelemaan painamalla mittauspisteen kuvaaja -painiketta.

Ohjelmasta kaikki mitaustulokset nähdään selkeissä kaavioissa ja niiden perusteella mitaustulosten analysointi on helppoa ja nopeaa. Mitaustuloksia verrataan laitteiden hälytysrajoihin sekä aikaisempiin mitaustuloksiin.

Mikäli uusi mitauslaite Leonova Diamond hankittaisiin, pystyttäisiin Condmaster by -ohjelmasta saamaan kaikki toiminnot käyttöön ja värähtelymittausten tekeminen ja analysointi oli vielä tehokkaampaa ja tuloksista saataisiin enemmän irti.

#### 7.4 Tulevaisuuden kehitystarpeet

Värähtelymittauksia tekemään olisi hyvä saada myös toinen työntekijä. Värähtelymittausten tekeminen yhdelle työntekijälle on suuritöistä sekä paljon aikaa vievää. Tarpeen tullen työntekijät voisivat yhdessä kiertää mittausreitit mittauksia tehden sekä samanaikaisesti huolehtia laakerien voitelusta. Mittausreitit kiertäminen kahden työntekijän voimin veisi paljon vähemmän aikaa, kun yhden työntekijän ei tarvitse kiertää reittiä kahdesti, ensin mitaten ja sitten voidellen laakerit. Toisen mittaushenkilön ollessa poissa tai muiden työkiireiden takia voisi yksi työntekijä kuitenkin käydä tekemässä mittaukset, eivätkä mittaukset jäisi tekemättä kokonaan. Lisäksi, kun värähtelymittaukset olisivat useamman henkilön vastuulla, olisi värähtelymittausten suorittaminen mukavampaa ja tulosten analysoinnista saataisiin monipuolisempaa, kun keskustelua mittaus tuloksista syntyisi työntekijöiden kesken. Molempien mittaajien tulisi saada koulutusta värähtelymittauksista, jotta mittaaminen ja tulosten analysointi saataisiin kehittymään.

Tehtaalle tulisi myös luoda käytäntö, että vuosihuoltojen ja pitempien seisokkien jälkeen värähtelymittaukset suoritettaisiin mittausaikavälistä poiketen. Huoltojen ja seisokkien jälkeisten mittausten perusteella varmistuttaisiin huollon onnistumisesta sekä saataisiin uudet vertailuarvot laitteen kunnonvalvontaa varten. Lisäksi analysointiohjelma tulisi pitää ajan tasalla kommenttien avulla. Esimerkiksi huollon jälkeen tehdyn mittauksen kohdalle tulisi kirjoittaa, että mittaus suoritettu huollon jälkeen, jolloin seuraavia mittaustuloksia on helppo verrata kyseiseen arvoon eikä aikaisempiin historiatietoihin.

Lisäksi tehtaalle voisi määrittää selkeät henkilöt, jotka ovat vastuussa värähtelymittauksista. Suoritusvastuu mittauksista on jo määritetty, että se on tällä hetkellä yhdellä kunnossapidon työntekijällä. Kuitenkin voisi myös määrittää henkilön, jolla olisi ylläpitovastuu mittausohjelmistosta. Ohjelmiston ylläpidosta vastuussa oleva henkilö huolehtisi, että ohjelmisto on ajan tasalla sekä olisi tietoinen mittausten tekemisestä ja auttaisi mittaustulosten analysoinnissa. Ohjelmiston ylläpidosta vastuussa oleva henkilö voisi olla myös sama henkilö kuin mittaaja.

Yhdelle ylemmän tason työntekijälle tulisi määrittää selkeä vastuu värähtelymittaustoiminnasta ja sen toteuttamisesta. Ylemmän tason henkilö olisi vastuussa, että mittaukset tulisi tehtyä sekä huolehtisi, että mittausreitit ja mittauslaite ovat ajan tasalla. Ylemmän tason henkilöllä



tulisi siis olla myös perustason tiedot mittausten tekemisestä ja mittaustulosten analysoinnista.

Ylemmän tason henkilöllä olisi myös vastuu mittaustoiminnan seurannasta ja kehityksestä. Värähtelymittausten kehittämisen kannalta ylemmän tason henkilön tulisi ottaa vastaan ja kysellä palautetta mittauksista. Tietyin väliajoin tulisi tehdä kartoitus, ovatko värähtelyvalvontamenetelmät soveltuvia mittaustarpeisiin tai olisiko uudistaminen tarpeellista. Välillä olisi myös hyvä miettiä, ovatko mittaamisesta saavutetut hyödyt ajan tasalla vai olisiko tarvetta mittaustoiminnan kehittämiseksi.

Tulevaisuudessa tärinämittauksia voitaisiin lisätä kaikkien laitteiden osalta. Laitteilta voisi tärinämittauksia mitata jokaisen laakerin kohdalta kolmesta eri suunnasta. Näin saataisiin mahdollisimman kattavasti tietoa laitteiden peruskunnosta.

Tulevaisuudessa voisi myös miettiä, onko reittien muokkaaminen oleellista. Mittausreittejä voisi tehdä kaksi, jotta yksi mittauskerta kestäisi vähemmän aikaa. Lyhyempi kestoisen reitin tekemiseen ei tarvitse niin paljon aikaa ja ennakoivaa suunnittelua, kuin pitempi kestoisemman mittausreitin tekemiseen. Pitempi kestoisemman reitin tekeminen vaatii suunnittelua, jotta mittaukset saadaan tehtyä, eikä muita töitä ole esteenä mittaustoiminnan suorittamiseksi. Kahdelle reitille laitteet voitaisiin jakaa kriittisyyden perusteella, sekä ottaen huomioon, että reitin kulkeminen tehtaalla olisi järkevästi kierrettäessä. Ensimmäiselle mittausreitille voisi kirjata kriittisimmät laitteet, joiden mittaaminen on ehdottoman tärkeää ja järkevää. Kyseisen reitin mittaaminen voitaisiin suorittaa 4 viikon välein tai useammin, jos se olisi tarpeellista. Toiselle reitille puolestaan tulisi kaikki muut mitattavat laitteet. Toisen reitin mittaukset voitaisiin tehdä kahden kuukauden välein.

Hyvä menetelmä kahden reitin tekemiseen voisi olla, että reitille A laitettaisiin kriittisimmät laitteet ja reitille B laitettaisiin kaikki mitattavat laitteet, niin kriittiset kuin ei-kriittisetkin. Reitit A ja B mitattaisiin vuoro kuukausina. Eli näin ollen kriittiset laitteet tulisi mitattua kerran kuukaudessa ja ei-kriittiset laitteet kahden kuukauden välein. Näin ollen joka toinen kuukausi olisi lyhyempi mittausreitti kierrettävänä ja joka toinen kuukausi puolestaan pitempi mittausreitti. Mittausreittien tulisi kuitenkin olla sellaisia, että työpäivän aikana ehdittäisiin kiertää mittausreitti sekä tarkastella ja analysoida mittaustulokset.

Värähtelymittausten tekeminen kahdella mittausreitillä veisi joka toinen kuukausi vähemmän aikaa. Näin ollen mittaustyöntekijöillä olisi enemmän aikaa muihin töihin joka toinen kuu-

kausi tai työntekijät voisivat puolestaan käyttää ajan tulosten huolelliseen analysointiin. Kriittisten laitteiden mittauksen eli lyhyemmän reitin voisi suorittaa yksi työntekijä ja kaksi työntekijää yhdessä voisivat kiertää kahden kuukauden välein tehtävän pitemmän mittausreitit. Jotta tällainen mittaus toiminta onnistuisi, tulisi ylemmältä tasolta henkilön olla vastuussa mittauksista ja huolehtia, että järjestelmä saataisiin toimimaan hyvin.

Tulevaisuudessa värinämittauksiin hyvä lisä olisi mahdollisuus spektrianalyysiin. Spektrianalyysin avulla saataisiin tarkempia tietoja laitteiden kunnosta, sillä analyysissä värähtelyamplitudien erottamisen avulla pystytään koneen yksittäisten osien kuntoa valvoa. Uuden mittauslaitteen myötä spektrianalyysi tulisi mahdolliseksi, joten uuden mittauslaitteen hankintaa olisi hyvä alkaa suunnitella. Mittauslaitteen uusiminen olisi erittäin hyvää kehitystä värähtelymittauksiin.

## 8 TYÖN TULOKSET

Oulun tehtaalla värähtelymittauksista tulisi pitää parempaa huolta, jotta mittauksista saadaan paras mahdollinen hyöty irti. Tärinämittaukset ja iskusysäysmittaukset ovat hyvä yhdistelmä, sillä niiden avulla saadaan hyvin tietoja laitteiden yleiskunnosta sekä laakerien kunnosta. Reittimittaukset ovat käytännöllinen ja hyvä tapa tehdä mittauksia tehtaalla.

Oulun tehtaalla käytössä olevalla mittauslaitteella pystytään tekemään tarvittavat värähtelymittaukset. Oleellisinta kuitenkin mittauslaitteen käytön kannalta on, että osataan tulkita mitaustuloksia oikein. Etenkin tärinämittauksissa tärkeää on tietää, että mitä eri suunnista mitatut arvot kertovat laitteen kunnosta. Käytettävä mittauslaite on kuitenkin aika vanha, joten uuden mittauslaitteen hankintaa on hyvä alkaa suunnitella.

Uuden laitteen hankkiminen ei ole vielä ajankohtaista, sillä laitteelle ei ole välitöntä tarvetta. Uudella Leonova Diamond -mittauslaitteella pystyttäisiin analysoimaan mitaustuloksia jo mittauspaikalla, sekä saataisiin Condmaster Ruby -ohjelmasta enemmän irti. Paras uuden mittauslaitteen ominaisuus on mahdollisuus spektrianalyysiin. Spektrianalyysi olisi hyvä lisä mitaustulosten analysointiin. Spektrianalyysin avulla muun muassa moottorien tärinästä saataisiin paljon enemmän tietoja ja pystyttäisiin helposti erottelemaan laitteesta tulevat vikataajuudet, ja helposti määrittelemään laitteen viat.

Uuden mittauslaitteen hankkiminen, vaatisi puolestaan kiinnostusta ja mielenkiintoa työntekijöiltä perehtyä laitteen toimintoihin ja analysointimahdollisuuksiin. Uuden mittauslaitteen käyttö tulisi opetella kunnolla, muuten laitteen hankkiminen olisi turhaa. Uuden mittauslaitteen avulla kokemattomampikin henkilö pystyisi tekemään mittaukset, sillä kuvan perusteella on helppo suunnistaa oikealle laitteelle ja kuva osoittaa myös oikean mittauspisteen.

Työssä luotiin uusi mittausreitti, jolle lisättiin vanhan mittausreitit laitteiden lisäksi muutamia uusia laitteita, joiden mittaaminen koettiin tärkeäksi. Uuden mittausreitit toimivuus on syytä testata ja kerätä palaute siitä, jonka jälkeen tehdä muutoksia mikäli ne koetaan tarpeellisiksi. Condmaster Ruby -analysointiohjelma siistittiin ja järjesteltiin uudelleen, jotta tulosten analysointi olisi nopeaa, helppoa ja selkeää. Iskusysäysmenetelmän avulla saadaan hyvin tietoa laakerien kunnosta ja tärinämittauksilla tietoa laitteiden peruskunnosta.

Kiihtyvyyssanturin käyttö tärinämittauksissa on erittäin hyvä, sillä kiihtyvyyssanturin taajuusalue on laaja sekä anturit ovat kestäviä, joten ne soveltuvat hyvin tehdaskäyttöön. Is-

kusysäysmittauksissa on hyvä asia, että käytetään kaikissa mittauspisteissä mittausnippoja, jotta mittaus tapahtuu aina samasta paikasta ja mittaustulokset ovat luotettavia.

Tärkeintä värähtelymittausten kannalta Oulun tehtaalla on, että mittausrutiini saataisiin toimimaan sujuvasti niin, että mittauksia tehtäisiin säännöllisesti. Tulosten analysointi ja raportointi on myös tärkeä osa mittauksia, joten niiden tekemiseen tulee varata tarpeeksi aikaa. Lisäksi värähtelymittauksia tekeville henkilöille olisi hyvä saada lisäkoulutusta värähtelymittauksista, jotta mittausten tekeminen ja mittaustulosten analysointi saataisiin parhaalle mahdolliselle tasolle.

## 9 YHTEENVETO

Värähtelymittaukset ovat tärkeä osa kunnonvalvontaa. Värähtelymittausten avulla laitteiden kunnosta saadaan erittäin hyvin tietoa. Värähtelymittauksia tulee tehdä säännöllisesti sekä tulokset analysoida huolellisesti, jotta mittauksista saataisiin paras mahdollinen hyöty irti. Väärin tehdyt värähtelymittaukset tuhlaavat vain työntekijä resursseja, aikaa ja rahaa. Koulutus on erittäin tärkeää värähtelymittausten parissa työskenteleville henkilöille, jotta mittaukset saadaan tehtyä oikein ja tulosten analysointi on sujuvaa. Mittaustyö on mielekkäämpää, kun siitä saadaan jotain irti ja mittaajalla on tunne, että osaa työnsä.

Värähtelymittaukset vaativat pitkäjänteistä työtä. Värähtelymittauksia tulee tehdä säännöllisesti. Mikäli poikkeamia ja värähtelyn kasvua ilmenee, tulee tehdä tarkistusmittauksia tai lyhentää mittausvälejä tarpeen mukaan. Värähtelymittausten lisäksi voidaan ottaa väliaikaisesti käyttöön muita mittausmenetelmiä, kuten lämpötilamittaukset.

Tärinämittauksilla saadaan yleistä tietoa laitteiden ja perustan kunnosta. Tärinämittausten lisäksi iskusysäysmenetelmä on hyvä valinta, sillä iskusysäysmenetelmän avulla saadaan tarkkaa tietoa vierintälaakerien kunnosta. Menetelmät yhdessä antavat hyvän kokonaisuuden värähtelymittauksia varten.

Tässä insinööriyössä on tutustuttu laajasti värähtelymittauksiin. Värähtelymittauksia ja analysointiohjelman käyttöä saatiin kehitettyä. Työssä esitetään myös kehitysideoita tulevaisuutta varten, jotta värähtelymittausten tekeminen ja niiden kehittäminen olisi aina ajan tasalla.

## LÄHTEET

1. Paroc yrityksenä, [WWW-dokumentti] <<http://www.paroc.fi/paroc-yrityksena>> (Luettu 11.2.2014)
2. Paroc Oy Ab, Oulun tehdas ja uusi pakkapää, 2013, sisäinen materiaali, [PowerPoint-esitys]
3. Paroc Knowhow, [WWW-dokumentti] <<http://www.paroc.fi/knowhow>> (Luettu 11.2.2014)
4. Esite, Paroc-kivivilla, 2010, [WWW-dokumentti] <[http://www.paroc.com/spps/Finland/BI\\_attachments/PAROC\\_kivivillaesite\\_www.pdf](http://www.paroc.com/spps/Finland/BI_attachments/PAROC_kivivillaesite_www.pdf)> (Luettu 11.2.2014)
5. Nohyek, Petri, Lumme, Veli Erkki. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Kunnossapidon julkaisusarja n:o 11. Kunnossapitoyhdistys ry. Hamina, 2004
6. Aalto, Heikki. Kunnossapitotekniikan perusteet. Kunnossapitoyhdistys ry. Hamina, 1997
7. Kunnossapitoyhdistys ry, Kunnossapito. Kunnossapidon julkaisusarja n:o 10. Hamina, 2007
8. Lahdelma, Sulo. Kunnossapidon värähtelymittaukset.
9. Kunnossapitoyhdistys, Kuntoon perustuva kunnossapito. Kerava: Savion Kirjapaino Oy, 2009
10. PSK Standardisointi, Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. PSK-käsikirja 3, 17.painos. Helsinki: PSK standardisointiyhdistys ry, 2013
11. SPM Instrument AB. Käyttöohje, Shock Pulse Tester T2001. 1991
12. SPM Instrument AB, SPM dBm/dBc tekniikka, 2008, Sisäinen opetusmateriaali, [Powerpoint esitys]
13. SPM Instrument AB, Värähtelyn kokonaistaso, 2008, Sisäinen opetusmateriaali, [Powerpoint esitys]

14. Esite, SPM Instrument, [WWW-dokumentti]  
<<http://www.spminstrument.fi/data/pdf/brochures/71790I.pdf>> (Luettu 19.2.2014)
15. Lahdelma, Sulo, Leskinen Reijo. Kunnonvalvonta. Kunnossapitokoulu, Kunnossapito-lehden erikoisliite, nro 7. 2/1991
16. SPM-menetelmä, Vierintälaakereiden käyttökunnon arviointi. Kunnossapitokoulu, Kunnossapito-lehden erikoisliite, nro 33. 2/1995
17. VibChecker, [WWW-dokumentti]  
<<http://www.spminstrument.fi/products/vibchecker/>> (Luettu 18.3.2014)
18. Leonova Infinity, [WWW-dokumentti]  
<<http://www.spminstrument.co.uk/Products/Portable-instruments/Leonova-Infinity/>> (Luettu 18.3.2014)
19. Condmaster Ruby, [WWW-dokumentti]  
<<http://www.spminstrument.com/Products/SPM-software/CondmasterRuby/>> (Luettu 11.3.2014)
20. SPM Leonova Diamond, Esite, [WWW-dokumentti]  
<[http://www.spminstrument.us/Documents/Downloads/Print/Brochures/71951I%20LeonovaDiamond\\_spreads.pdf](http://www.spminstrument.us/Documents/Downloads/Print/Brochures/71951I%20LeonovaDiamond_spreads.pdf)> (Luettu 24.3.2014)
21. Leonova Diamond, [WWW-dokumentti]  
<<http://www.spminstrument.fi/products/leonova/>> (Luettu 11.3.2014)
22. SPM HD, Esite, [WWW-dokumentti]  
<[http://www.spminstrument.com/Documents/Downloads/Print/Brochures/71932I\\_SPM\\_HD.pdf](http://www.spminstrument.com/Documents/Downloads/Print/Brochures/71932I_SPM_HD.pdf)> (Luettu 23.3.2014)

## LIITTEET

LIITE 1, Vianhakutaulukko



SYY	TAAJUUS	VAIHE	HUOMAUTUKSIA
1. Epätasapaino	1 x n	Vaihe osoittaa yhtä vakaata vertailumerkkiä	Yleisin syy värähtelyihin
2. Kytkimen tai laakerin asennusvirhe 3. Käyrä akseli	Tavallisesti 1 x n. Lisäksi usein 2 x n ja toisinaan 3 & 4 x n	Yksi, kaksi tai kolme vertailumerkkiä	Parhaiten tunnistettavissa suuren aksiaalivärähtelyn johdosta. Käytä mittakelloa tai muita mittalaitteita vian selvittämisessä. Jos koneessa on liukulaakeri eikä kytkimessä ole asennusvirhettä, niin tasapainota roottori.
4. Viallinen kuula- tai rullalaakeri	Yksittäisten vierintäelinten sysäys- eli ohitustaajuuudet ja niiden monikerrat. Myös erittäin korkeataajuisia värähtelyä.	Epävakaata	<p><u>Sysäystaajuus f(Hz)</u>  Ulkokehä vaurioitunut:  <math>f_u = \frac{N}{2} n_r (1 - \frac{d}{D} \cos \beta)</math>  Sisäkehä vaurioitunut:  <math>f_s = \frac{N}{2} n_r (1 + \frac{d}{D} \cos \beta)</math>  Kuula vaurioitunut:  <math>f_k = \frac{D}{2d} n_r [1 - (\frac{d}{D})^2 \cos^2 \beta]</math>  Pidike vaurioitunut:  <math>f_p = \frac{1}{2} [n_s (1 - \frac{d}{D} \cos \beta) + n_u (1 + \frac{d}{D} \cos \beta)]</math></p> <p><math>\beta</math> = kosketuskulma  d = kuulan halkaisija  D = jakohalkaisija  N = kuulien lkm riviä kohti  <math>n_r =  n_s - n_u </math> eli sisä- ja ulkokehän pyörimistaajuuksien erotuksen itseisarvo</p>
5. Viallinen liukulaakeri	1 x n ja sen monikerrat. Varhaisessa vaiheessa usein n/2 ja n/3		Vertaa akselista ja laakeripesästä mitattuja arvoja toisiinsa. Vian kehittyessä tilanne vastaa mekaanista vällystä ja harmonisia komponentteja voi esiintyä aina 10...20 monikertaan saakka.
6. Mekaaninen välly	Usein 2 x n	Kaksi vertailumerkkiä. Tavallisesti jonkin verran epävakaata	Esiintyy tavallisesti yhdessä epätasapainon ja/tai asennusvirheen kanssa.
	Mahdollisesti 2, 3 & 4 x n		Joskus voi esiintyä vieläkin korkeampia harmonisia taajuuskomponentteja esim. alueella 5...10 x n, jos välly on suuri, jolloin iskumaisuus on voimakasta.
	Joskus 1 x n		Jos esim. moottorin alustan kiinnitystankojen pultit ovat löysällä.
	Toisinaan n/2 tai n/3		Kyseessä on aliharmoninen värähtely. Värähtelyä voi esiintyä myös taajuuksilla 1.5 x n, 2.5 x n jne.

n = pyörimistaajuus

7. Kantikkaat eli aaltomaiset telat	Kanttiluku $x n$ ja usein sen 2, 3 & 4 monikerta		
8. Kuluneet hammaspyörät	Hyvin korkea. Hammasluku $x n$ ja usein sen 2, 3 & 4 monikerta. Joskus $1/2 x$ hammasluku $x n$	Osoittaa useita vertailumerkkejä. Epävakaata	Värähtelyä voi ilmetä myös ryntötaajuuden sivunauhoina. Yksittäisten hampaiden vaurioituminen näkyy selvimmän aikatasosignaalista.
9. Resonanssi	Kriittinen pyörimistaajuus	Yksi vertailumerkki	Värähtely kasvaa voimakkaasti lähestyttäessä kriittistä pyörimistaajuutta.
10. Vialliset käyttöhihnat	1, 2, 3 & 4 x hihnojen kierrostaajuus	Yksi tai kaksi vertailumerkkiä, jotka tavallisesti epävakaata	Stroboskooppi on kätevä työkalu viallisen hihnan toteamiseen.
11. Kitka	Useita eri taajuuksia	Epävakaata	Värähtely on tavallisesti korkeataajuisista satunnaisvärähtelyä.
12. Puutteellinen voitelu	Korkeataajuisia värähtelyä		Vertaa kitkaan
13. öljykalvon pyörteily ja rikkoutuminen liukulaakereissa	Hieman alle puolet akselin pyörimistaajuudesta ( $0.42...0.48$ ) $x n$	Epävakaata	Tulee kysymykseen koneissa, joilla on suuri pyörimistaajuus. Esim. turbiinit
14. Hydrauliset ja aerodynaamiset voimat	Tuulettimen tai juoksupyörän siipien lukumäärä $x n$ ja mahdollisesti niiden 2 ja 3 monikerta		Epätavallinen häiriön syy lukuunottamatta resonanssitapausta
15. Kavitaatio	Korkeataajuisia satunnaisvärähtelyä laajalla taajuusalueella		
16. Edestakaiset massavoimat	1, 2 & korkeampia kertalukuja $x n$		Luontaista mäntäkoneille, voidaan pienentää vain rakennetta tai alustan eristystä parantamalla.
17. Epäkeskeiset liukulaakerit	Tavallisesti $1 x n$ Toisinaan $2 x n$	Yksi vertailumerkki	
18. Sähköinen vika	$1 x n$ tai $1$ tai $2 x$ verkkotaajuus	Yksi tai kaksi pyörivää merkkiä	Jos värähtelyn voimakkuus heikkenee äkillisesti, kun virta katkaistaan, syy on sähköinen. Sähköisten vikojen joukko on esitettyä laajempi.

n = pyörimistaajuus

© Sulo Lahdelma 2013