

**Paavo Juusola**

**KRIITTISYYSANALYYSIIN POHJAUTUVAN VÄRÄHTE-  
LYMITTAREITIN LAATIMINEN**

**Opinnäytetyö  
KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Toukokuu 2011**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Yksikkö</b> Tekniikan ja liiketalouden yksikkö	<b>Aika</b> Huhtikuu 2011	<b>Tekijä/tekijät</b> Paavo Juusola
<b>Koulutusohjelma</b> Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma		
<b>Työn nimi</b> Kriittisyysanalyysiin pohjautuvan värähtelymittareitin laatiminen		
<b>Työn ohjaaja</b> Lauri Hankkila, Mikko Aunio	<b>Sivumäärä</b> 50 + 1	
<b>Työelämäohjaaja</b> Jyrki Myllymäki		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on luoda Kokkolan Yara Finlandin rehufosfaattitehtaaseen uusi värähtelymittareitti, aiemmin tehdyn kriittisyysanalyysin pohjalta. Työssä käytettiin CSI 2130 värähtelyanalysointia, jolla suoritettiin mittaukset laitteista. Analysoiduista mittatuloksista ja havaituista vioista kirjoitettiin raportti, joka toimitettiin Yara Finlandille.</p> <p>Yhtenä työn tarkoituksena oli päivittää mittaava kunnonvalvonta tämän päivän tasolle ja osoittaa, kuinka monipuolinen työkalu värähtelyanalysointia on vikojen havaitsemiseen sekä ennakoivan tiedon keräämiseen kunnossapidolle.</p> <p>Rehufosfaattitehtaalla käytetään tällä hetkellä mittaavaa kunnonvalvontaa iskusysäysmittarilla, jonka nykyinen mittareitti käydään läpi kuukausittain. Kaikki laitteet, jotka on luokiteltu kriittisiksi, eivät olleet nykyisellä mittareitillä. Luotuun laitetietokantaan sisällytettiin mm. vaihdelaatikoita, jotka eivät kuulu nykyisen mittauksen piiriin.</p>		
<b>Asiasanat</b> analysointi, CSI, kunnossapito, kriittisyysanalyysi, värähtelymittaus		

**ABSTRACT**

<b>CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</b>	<b>Date</b> April 2011	<b>Author</b> Paavo Juusola
<b>Degree programme</b> Mechanical and production degree programme		
<b>Name of thesis</b> Creating a vibration measurement route based on criticality analysis		
<b>Instructor</b> Lauri Hankkila, Mikko Aunio		<b>Pages</b> 50 + 1
<b>Supervisor</b> Jyrki Myllymäki		
<p>The main purpose of this thesis was to create a new vibration measurement route for the Yara Finland phosphate plant based on criticality analysis that was made previously. In this study a CSI 2130 vibration analyzer was used to measure the vibration of the machines. The measurement route was created, next the results were analyzed and then a fault-report was drafted and delivered to Yara Finland.</p> <p>One goal of this thesis was to update measurement condition monitoring to meet the requirements of today and to find out how versatile the tool vibration analyzer is for fault detection and for collecting proactive data for maintenance.</p> <p>Condition monitoring for the phosphate plant, was conducted using Shock Pulse Measurement once a month. Some of the critical machines were not included in the SPM route. A new database was created for all the critical machines, including gear-boxes and motors for the CSI vibration analyzer.</p>		
<b>Key words</b> analysis, CSI, criticality analysis, vibration, vibration measurement route		

**TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 YRITYKSET</b>	<b>2</b>
2.1 Yara-Suomi	2
2.2 Maintpartner	3
<b>3 KRIITTISYYSANALYYSI</b>	<b>4</b>
3.1 Kriittisyyskartoitus koneille ja laitteille	4
3.2 Kriittisyyden arvioinnin muuttujat	5
<b>4 KUNNOSSAPITO</b>	<b>8</b>
4.1 Kunnossapidon määritelmiä	8
4.2 Kunnossapitolajit	8
4.2.1 Korjaava kunnossapito	11
4.2.2 Huolto	12
4.2.3 Ehkäisevä kunnossapito	12
4.2.4 Parantava kunnossapito	12
4.2.5 Vikojen ja vikaantumisen selvitys	13
4.3 Kuntoon perustuva kunnossapito	13
<b>5 VÄRÄHTELYMITTAUKSET</b>	<b>14</b>
5.1 Johdanto	14
5.2 Värähtelymittauksen teoriaa	14
5.3 Värähtelysuureet ja parametrit	16
5.4 Taajuusspektri eli värähtely taajuustasossa	19
5.5 Kiihtyvyyssanturit	21
5.6 Valvontamenetelmät	23
5.6.1 Kokonaistasovalvonta	23
5.6.2 Spektrivalvonta ja spektrianalyysi	24
5.6.3 Verhokäyrä ja PeakVue-valvonta	26
<b>6 VÄRÄHTELYMITTAREITIN LAADINTA</b>	<b>28</b>
6.1 Yleistä	28
6.2 Mittausten raja-arvot	30
6.3 Tarvittavat pohjatiedot mittareitin tekemiseen	30
6.4 Anturin paikan valinta	31
6.5 Laitepaikka ja mittapisteeet	32
6.6 Tietokanta Machinery Health Managerissa	34
6.6.1 Parametrisarjojen määrittymiset	35
6.6.2 Tietokannan luominen	37
6.6.3 Värähtelyreitien mittaus	39
6.7 Tulosten analysoiminen	41

<b>7 PUHALTIMEN TASAPAINOTUS</b>	<b>44</b>
<b>8 TULOKSET JA POHDINTA</b>	<b>46</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>48</b>
<b>LIITTEET</b>	
<b>LIITE 1. Värähtelymittausraportti</b>	

## 1 JOHDANTO

Aloitin opinnäytetyön valmistelut syyskuussa 2010. Tarkoituksena oli luoda kriittisyysanalyysiin pohjautuva uusi ennakkohuoltomittausreitti Yara Suomen rehufosfaattitehtaalle. Kriittisyysanalyysin tehtaan laitteista oli muutamaa vuotta aiemmin tehnyt kunnossapitoyritys Maintpartner. Tavoitteena oli mitata kaikki reitille muodostetut mittapisteet oppilaitoksen kannettavalla CSI 2130-värähtelyanalysaattorilla ja analysoida tuloksista laitteiden mahdolliset viat.

Kriittisyysluokituksen perusteella kerättiin koneiden ja laitteiden laitepaikkatiedot listaukseksi. Koneiden ja laitteiden laakeritiedot, pyörimisnopeudet ja muut mittaamiseen tarvittavat tiedot kerättiin Arttu-tehdastietojärjestelmästä, siltä osin kuin se oli mahdollista. Arttu-tehdastietojärjestelmä on ollut käytössä Kokkolan Kemiran tehtailla jo ennen kuin Kemira möi tehtaansa eri tahoille.

Osa mitattavista vaihdelaatikoista oli valmistettu 1970-luvun alussa, ja valmistajilta ei löytynyt enää tietoja. Tämä seikka omalta osaltaan osoittaa tehdastietojärjestelmän tarpeellisuuden tietojen säilönnässä. Ennakoivan kunnonvalvonnan kannalta tehdastietojärjestelmä on kullanarvoinen, jos siinä olevat tiedot pidetään ajan tasalla.

Hankaluuksia aiheutti myös moottoritietojen muuttuminen. Jos laitteen moottori oli ajan mittaan hajonnut ja tilalle oli asennettu toisen valmistajan vastaava laite, laakeritiedot eivät vastanneet alkuperäisiä tietoja. Tarkkuutta pitäisi olla myös varaosien käytössä. Vaikka laakeri kokonsa puolesta on sama SKF:llä ja FAG:lle ja muilla valmistajilla, niiden vikataajuudet ovat erilaiset. Laakeritiedoksi ei siis riitä 6220, vaan tarvitaan myös valmistajan tiedot, kuten SKF 6220.

Yhtenä osana opinnäytetyötä tein pääkaasupuhaltimen värähtelyarvojen noustessa yli sallitun hälytysrajan puhaltimen tasapainotusmittauksen. Mittatulokset ja työn kuvauksen liitin osaksi opinnäytetyötä.

## 2 YRITYKSET

### 2.1 Yara Suomi

Yara International ASA on maailmanlaajuinen kemianalan yritys, joka valmistaa ja markkinoi kivennäislannoitteita, typpipohjaisia kemikaaleja teollisuuskäyttöön sekä ympäristönsuojeluun käytettäviä tuotteita. Yaralla on toimintaa yli 50 maassa ja työntekijöitä noin 7 600. Liikevaihto vuonna 2009 oli 7,7 miljardia euroa. Yara Suomi Oy on Yara International ASA:n tytäryhtiö, joka tarjoaa viljelijöille ja metsänomistajille kattavan lannoitevalikoiman. Valikoimasta löytyy typpikemikaaleja ja teknisiä nitraatteja eri teollisuuden aloille sekä ympäristön suojelutuotteita. (Yara Finland 1.)

Yaralla on Suomessa neljä tuotantolaitosta: Uudessakaupungissa, Harjavallassa, Kokkolassa ja Siilinjärvellä. Yara valmistaa Kokkolassa rehufosfaatteja ja kaliumsulfaatteja sekä varastoi ja toimittaa ammoniakkia ja fosforihappoa. Rehufosfaatteja käytetään eläinrehujen raaka-aineina parantamaan lihan ja maidon laatua. Niiden perustana on puhdas fosforihappo, jota tuotetaan Siilinjärven tehtaalla. Kaliumsulfaattia käytetään lannoitteiden valmistamiseen tai sellaisenaan lannoitteena. (Yara Finland 1.)

Kokkolan toimipaikka sijaitsee Ykspihlajassa Kokkolan Suurteollisuusalueella, joka on yksi Pohjoismaiden suurimmista epäorgaanisen kemianteollisuuden keskittymistä. Alueella on 12 teollisuusyritystä, jotka työllistävät yhteensä noin 1800 henkilöä. (Yara Finland 2.)

Yara työllistää Suomessa lähes 900 henkilöä valmistuksen, tuotekehityksen, myynnin ja markkinoinnin parissa. Suomessa Yara on toiminut vuodesta 2008 Yaran ostettua Kemira GrowHow:n. (Yara Finland 2.)

## 2.2 Maintpartner

Maintpartner Oy tuottaa palvelutoimintaa varmistamalla teollisuuden tuotantolaitosten ja julkisen sektorin teknisten prosessien käytettävyyden. Maintpartner on Itämeren alueen johtavia teknisiä palveluja tarjoava yritys. Henkilöstön määrä on noin 1400. ( Maintpartner.)

Maintpartner-yhtiö tarjoaa kokonaisvaltaista teollisuuden käyttö- ja kunnossapito-palvelua. Se palvelee ensisijaisesti teollisuutta ja teollisuuspuistoja, energiateollisuutta sekä kuntia. Palvelutarjonta kattaa tuotantolaitosten kokonaisvaltaiset kunnossapito- ja käyttöpalvelut sekä tuotantoprosessien tuottavuuden parantamiseen tarkoitettut palvelut. Lisäksi Maintpartner Oy tarjoaa useita kunnossapitoa ja käyttöä tukevia asiantuntijapalveluja. ( Maintpartner.)

Maintpartner Oy panostaa toiminnan kehittämiseen, ja se kehittää jatkuvasti sekä omaa palvelutoimintaansa että asiakkaiden tuotantoprosessien käytettävyyden ja tuottavuuden parantamiseen tarkoitettua erikoisosaamista ja palvelua. Maintpartner Oy:n toimintajärjestelmä on sertifioitu ympäristö-, laatu- sekä työterveys- ja työturvallisuusstandardien mukaisesti. Maintpartnerin pääomistaja Capman. Myös toimiva johto omistaa Maintpartneria. ( Maintpartner.)



mistajan edustajia. (Mikkonen, Miettinen, Leinonen, Jantunen, Kokko, Riutta, Sulo, Komonen, Lumme, Kautto, Heinonen, Lakka & Mäkeläinen 2009, 148.)

### 3.2 Kriittisyyden arvioinnin muuttujat

Kriittisyyden arviointiin PSK 6800:ssa käytetään seuraavia muuttujia.

- vikaväli
- turvallisuusvaikutukset
- ympäristövaikutukset
- tuotannon menetys
- lopputuotteen laatukustannukset
- korjauskustannus.(PSK 6800)

Kriittisyysindeksi lasketaan kaavalla 1 (PSK 6800)

$$K = p( W_s M_s + W_e M_e + W_p M_p + W_q M_q + W_r M_r) \quad (1)$$

jossa

$p$  on vian esiintymistäajuusarvio

$W_s$  on turvallisuusriskien painoarvo

$M_s$  on turvallisuusriskien kerroin

$W_e$  on ympäristöriskien painoarvo

$M_e$  on ympäristöriskien kerroin

$W_p$  on tuotannon menetyksen painoarvo

$M_p$  on tuotannon menetyksen kerroin

$W_q$  on laatukustannusten painoarvo

$M_q$  on laatukustannusten kerroin

$W_r$  on korjauskustannusten painoarvo

$M_r$  on korjauskustannusten kerroin

Taulukossa 2 määritellään kohteen turvallisuus- ja ympäristövaikutukset, tuotantovaikutukset ja korjaus- tai seurauskustannukset. Turvallisuus- ja ympäristövaikutuksen painoarvoina käytetään turvallisuusriskiä ja ympäristöriskiä. Tuotantovaikutuksissa painoarvoina käytetään tuotannon menetystä ja tuotteen laatukustannusta. Korjaus- tai seurauskustannuksen painoarvoina on korjauskustannusten suuruus. Lisäksi kriittisyyteen vaikuttaa vikaantumisväli. Kerroin M valitaan valintakriteerien perusteella. (Mikkonen ym. 2009, 149.)

TAULUKKO 2. Laitetason kriittisyyden tekijät (Mikkonen ym. 2009, 149.)

Kohde	Painoarvo [W]	Vikaantumisväli [p]	Kerroin [M]	Valintakriteeri
Turvallisuus- ja ympäristövaikutukset	Turvallisuusriskit $W_s = 30$	1 = Pitkä vikaantumisväli esimerkiksi yli 5 vuotta 2 = Pitkähkö vikaantumisväli esimerkiksi 2 – 5 vuotta 4 = Lyhyehkö vikaantumisväli esimerkiksi 0,5 – 2 vuotta 8 = Lyhyt vikaantumisväli esimerkiksi 0 – 0,5 vuotta	$M_s = 0$	Ei turvallisuusriskiä
			$M_s = 2$	Vähäinen turvallisuusriski
			$M_s = 4$	Kohtalainen turvallisuusriski
			$M_s = 8$	Merkittävä turvallisuusriski
			$M_s = 16$	Vakava turvallisuusriski
	Ympäristöriskit $W_e = 20$		$M_e = 0$	Ei ympäristöriskiä
			$M_e = 2$	Vähäinen ympäristöriski
			$M_e = 4$	Kohtalainen ympäristöriski
			$M_e = 8$	Merkittävä ympäristöriski
			$M_e = 16$	Vakava ympäristöriski
Tuotantovaikutukset	Tuotannon menetykset $W_p = 0...100$	$M_p = 0$	Laitteen toimimattomuudella ei merkitystä osaprosessille tai osastolle	
		$M_p = 1$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston hetkeksi (esimerkiksi $\leq 3$ h)	
		$M_p = 2$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston lyhyeksi ajaksi (esimerkiksi $\leq 10$ h)	
		$M_p = 3$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston merkittäväksi ajaksi (esimerkiksi 10 - 24 h)	
		$M_p = 4$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston pitkäksi ajaksi (esimerkiksi $> 24$ h)	
	Laatukustannus $W_q = 30$	$M_q = 0$	Laitteen toimimattomuus ei aiheuta lopputuotteen laatukustannuksia.	
		$M_q = 1$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat hetkellistä tuotannonmenetystä (esimerkiksi $\leq 1$ h)	
		$M_q = 2$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat lyhytaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi $\leq 3$ h)	
		$M_q = 3$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat merkittävää tuotannonmenetystä (esimerkiksi 3-8 h)	
		$M_q = 4$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat pitkäaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi $> 8$ h)	
Korjaus- tai seurauskustannukset	Korjaus- tai seurauskustannus $W_r = 20$	$M_r = 0$	Korjauskustannuksilla tai seurauskustannuksilla ei ole merkitystä suhteessa muihin menetyksiin.	
		$M_r = 1$	Vähäiset korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat hetkellistä tuotannonmenetystä (esimerkiksi $\leq 2$ h)	
		$M_r = 2$	Kesinkertaiset korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat lyhytaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi $\leq 10$ h)	
		$M_r = 3$	Korkeat korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat merkittävää tuotannonmenetystä (esimerkiksi 10-24 h)	
		$M_r = 4$	Korkeat korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat pitkäaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi $> 24$ h)	

Painoarvot ovat suuntaa antavia. Tärkeää on arvioida, sopivatko painoarvot suoraan omaan teollisuuden toimialaan vai onko parempi käyttää omia painoarvoja kriittisyyden luokittelussa. (Mikkonen ym. 2009, 148.)

Seuraavassa analyysin vaiheessa listataan laitteet taulukkoon ja työryhmä pohtii niille sopivat kertoimet kokemuksensa pohjalta. Tällöin kaikkien ammattiryhmien edustajien osaaminen tulee otettua huomioon ja valitut kertoimet tulevat olemaan lähellä todellisuutta. (Mikkonen ym. 2009, 150.)

Annettujen kertoimien ja muuttujien perusteella lasketaan kriittisyysindeksi, jonka arvo kuvaa eri laitteiden kriittisyyttä verrattuna toisiin laitteisiin. Taulukossa 3 laitteet on lajiteltu kriittisyysindeksin mukaiseen järjestykseen.

TAULUKKO 3. Kriittisyysindeksin määräytyminen (Mikkonen ym. 2009, 151.)

Toimintopaikan tunnistus	Toimintopaikan nimitys	Vikaväli (1...8)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Lopputuotteen laatu-kustannus (0...4)	Korjauskustannus (0...4)	Kriittisyysindeksi
		Painoarvot W -->	30	20	100	30	20	
KO-248	3.puristin ylätela	3	8	0	3	2	3	1980
KO-247	3.puristin alatela	3	8	0	3	2	3	1980
KO-250	2.kuivausryhmän käyttö	3	4	4	3	2	2	1800
KO-244	1.puristin ylätela	3	4	0	3	2	3	1620
KO-243	1.puristin alatela	3	4	0	3	2	3	1620
KO-242	2.puristin alatelan käyttö	2	2	8	4	2	3	1480
KO-241	2.puristin alatelan käyttö	2	2	8	4	2	3	1480
KO-239	1.puristin kk I alahuovan johtotelat 3 kpl	3	2	0	2	2	2	1080
KO-233	3.puristin kartonginjohtotela	3	2	0	2	2	2	1080
KO-210	Viiran imutela	2	4	2	3	3	3	1220
KO-210	Viiran imutelan käyttö	2	4	4	2	2	2	1000
KO-238	Puristin I alatelan käyttö	2	2	2	1	2	2	600
KO-209	Viiran vetotela	2	4	2	2	2	2	920
KO-232	Kk I:n painesihti	2	2	2	1	2	1	560
KO-204	Rintatela	2	2	2	1	2	1	560
KO-266	3.kuivausryhmän käyttö	2	2	2	1	2	1	560

## 4 KUNNOSSAPITO

### 4.1 Kunnossapidon määritelmiä

Kunnossapito on erilaisten laitteiden ja asioiden pitämistä toimintakuntoisina, siten että niissä ilmenevät viat korjataan ja koneiden luotettava toiminta turvataan. (Järviö 2004,5.) Kunnossapito on aiemmin käsitetty vikojen korjaamisena. Oikeastaan kunnossapitoa pitäisi ajatella laitosten käyttöomaisuuden tuottokyvyn ylläpitäjänä. Kunnossapitajat varmistavat, että laitoksiin hankitut laitteet tekevät sitä mitä ne on luotu tekemään. (Järviö 2004,12.)

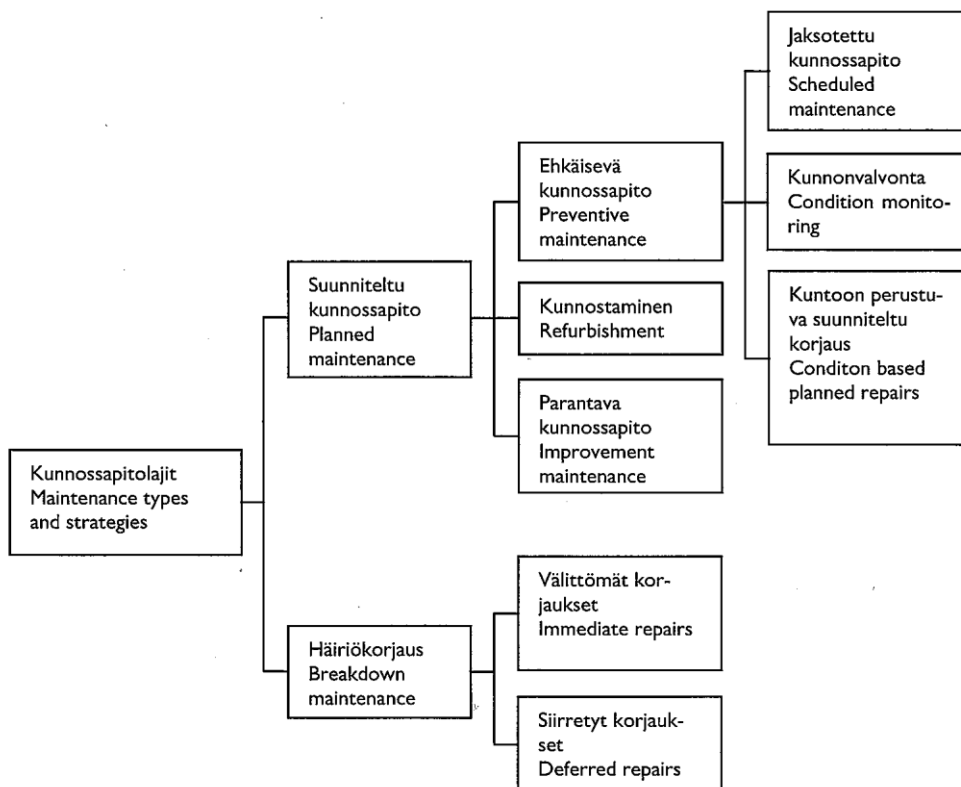
Standardi SFS-EN 13306 määrittelee kunnossapidon seuraavasti:

”Kunnossapito koostuu kaikista kohteen elinaikaisista teknisistä, hallinnollisista ja liikkeenjohdollisista toimenpiteistä, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnan.” Kunnossapidon edelläkävijä John Moubrey määrittelee kunnossapidon seuraavasti: ”Kunnossapidolla varmistetaan, että laitteet jatkavat sen tekemistä, mitä käyttäjät haluavat niiden tekevän”. (Mikkonen ym. 2009, 26.)

PSK 6201 Standardi vuorostaan selittää kunnossapidon seuraavasti: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana. (Mikkonen ym. 2009, 26.)

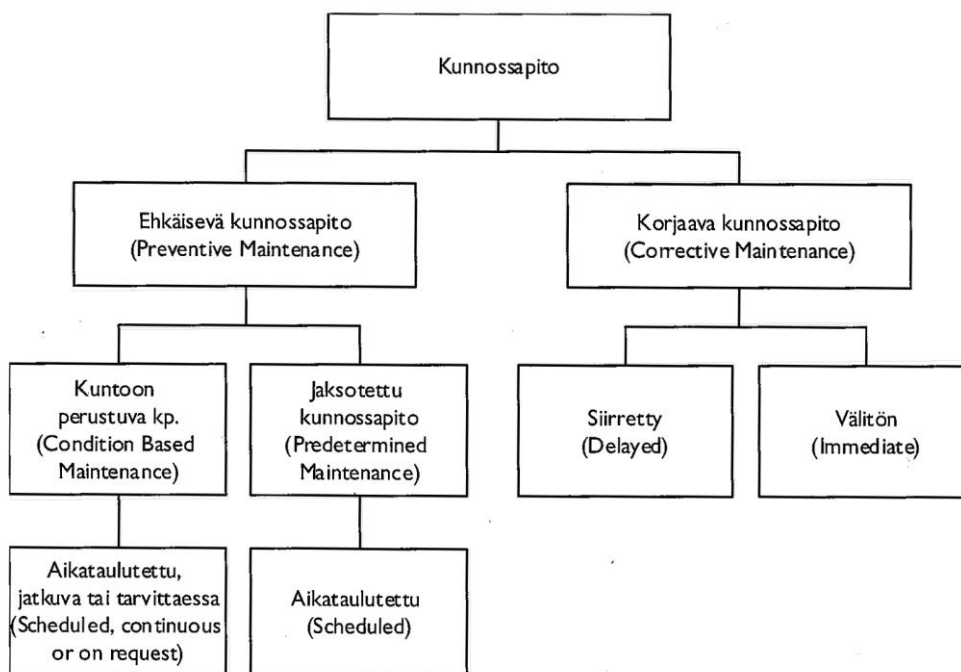
### 4.2 Kunnossapitolajit

Standardi PSK 7501 jakaa kuviossa 1 kunnossapidon kahteen eri osa-alueeseen, suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriön korjaukseen. (Mikkonen ym. 2009, 96.)



KUVIO 1. Kunnossapitolajit (PSK 7501)

Kansainvälinen standardi SFS-EN 13306 jakaa kunnossapidon toimenpiteet vian havaitsemisen mukaisesti. Vialla tarkoitetaan tilaa, jolloin laite ei kykene suoriutu-  
maan tehtävästään. Kuviossa 2 esitetään kuinka ehkäisevään kunnossapitoon  
sisällytetään kaikki toimenpiteet, joilla vika pyritään ehkäisemään.



KUVIO 2. Kunnossapitolajit (SFS-EN 13306)

TAULUKKO 2. Kunnossapidon lajit kuvauksineen (SFS-EN 13306)

Kunnossapitolaji	Kuvaus
Ehkäisevä kunnossapito (Preventive Maintenance, PM)	Ehkäisevää kunnossapitoa tehdään säännöllisin välein tai asetettujen kriteerien täytyessä. Tavoite on vähentää rikkoontumisen mahdollisuutta tai toimintakyvyn heikkenemistä
Aikataulutettu kunnossapito (Scheduled Maintenance)	Ehkäisevää kunnossapitoa, jossa tehtävien jaksottaminen perustuu aikatauluun tai työjaksojen lukumäärään
Jaksotettu kunnossapito (Predetermined Maintenance)	Ehkäisevää kunnossapitoa, jaksotus perustuu kalenteriaikaan tai käytön määrään (työjaksojen lukumäärä). Koneen kunto ei vaikuta tehtäviin toimenpiteisiin
Kuntoon perustuva kunnossapito (Condition Based Maintenance)	Ehkäisevää kunnossapitoa, jossa seurataan kohteen suorituskykyä tai suorituskyvyn parametreja ja toimitaan havaintojen mukaisesti. Seuranta voi olla aikataulutettua, jatkuvaa tai sitä tehdään tarpeen mukaan.
Ennakoiva kunnossapito (Predictive Maintenance)	Kuntoon perustuva kunnossapito, joka perustuu niiden tekijöiden tarkkailuun ja analysointiin, jotka kuvaavat kohteen suorituskyvyn heikkenemistä. Joskus käytetään myös ennustava kunnossapito.
Korjaava kunnossapito (Corrective Maintenance)	Korjaava kunnossapito, suoritetaan vikaantumisen havaitsemisen jälkeen. Tarkoituksena on palauttaa toimintakunto.
Etäkunnossapito (Remote Maintenance)	Kauko-ohjattu kunnossapito, joka tehdään siten, että kunnossapitohenkilökunta ei ole suoraan tekemisissä kohteen kanssa.
Siirretty kunnossapito (Deferred Maintenance)	Viivästetty korjaava kunnossapito, joka suoritetaan vikaantumisen havaitsemisen jälkeen viivästettynä (viive sovittujen ohjeiden mukaisesti).
Välitön kunnossapito (Immediate Maintenance)	Välitön kunnossapito, suoritetaan heti vian havaitsemisen jälkeen, jotta vältytään hyväksymättömiltä seurauksilta.
Käynninaikainen kunnossapito (On Line Maintenance)	Käynninaikainen kunnossapito
Lähikunnossapito (On Site Maintenance)	Paikanpäällä tehtävä kunnossapito (samassa paikassa kuin kohde)
Käyttäjäkunnossapito (Operator Maintenance)	Koneen käyttäjän suorittama kunnossapito

Kunnossapitotoiminnot voidaan jakaa viiteen eri päälajiin: huoltoon, ehkäisevään kunnossapitoon, korjaavaan kunnossapitoon, parantavaan kunnossapitoon ja vikaantumisen selvittämiseen. (Järviö 2004, 49.)

#### 4.2.1 Korjaava kunnossapito

Korjaavassa kunnossapidossa korjataan jo vikaantunut laite takaisin toimintakuntoon. Alkuun määritetään vika, jonka jälkeen vika tunnistetaan ja paikallistetaan.

Seuraavaksi vika korjataan ja näin palautetaan laite käyttökuntoon. Korjaavaa kunnossapitoa voivat olla suunnittelemattomat häiriökorjaukset ja suunniteltu korjaus eli kunnostus. (Järviö 2004, 49.)

#### **4.2.2 Huolto**

Huoltamalla pidetään laitteen toimintakykyä yllä. Samalla estetään vaurioitumisia tai palautetaan heikentynyt toimintakyky ennen vikaantumista. Jaksotettu huolto toteutetaan määritellyn aikataulun mukaisesti. Määräaikaishuolloissa tehdään seuraavia toimenpiteitä: puhdistus, voitelu, huoltaminen, kalibroinnit, kuluneiden osien vaihtaminen ja toimintakyvyn palautus. (Järviö 2004, 50.)

#### **4.2.3 Ehkäisevä kunnossapito**

Ehkäisevässä kunnossapidossa seurataan laitteen suorituskykyä tai sen parametreja. Tarkoituksena on vähentää koneen toimintakyvyn heikkenemistä ja vikaantumisen todennäköisyyttä. Ehkäisevää kunnossapitoa tehdään säännöllisesti tai tarvittaessa. Mittatulosten perusteella voidaan aikatauluttaa tarvittavia huoltotoimenpiteitä. Ehkäisevässä kunnossapidossa laitteita tarkastetaan aistienvaraisesti, suoritetaan kunnonvalvonnan mittauksia, testataan laitteistoa, seurataan laitteita käynninaikaisesti ja analysoidaan mittatuloksia ja vikaantumistietoja. Kunnonvalvontaa tehdään käynninaikaisesti tai huoltoseisokin aikana. Kunnonvalvonnan avulla huomataan oireilevia vikoja tai havaitaan laitteen olevan käyttökunnossa. (Järviö 2004, 50.)

#### **4.2.4 Parantava kunnossapito**

Parantava kunnossapito jakautuu kolmeen pääryhmään. Ensimmäisessä ryhmässä laitetta uudistetaan vaihtamalla uudempia paremmin toimivia osia tai komponentteja vanhojen tilalle muuttamatta laitteen suorituskykyä. Esimerkkinä on taajuusmuuntajien käyttö tasavirtakäyttöjen tilalla. Toisena pääryhmänä ovat uu-

delleen suunnittelut ja korjaamiset, joilla parannetaan koneen luotettavuutta. Laitteen suorituskyky pysyy samana. Kolmas pääryhmä muodostuu laitteiden modernisoinnista, jolloin nostetaan myös laitteen suorituskykyä. Esimerkkinä paperikone, jolla on käyttöikä jäljellä. On edullisempaa modernisoida vanha kone tehokkaampaan käyttöön kuin romuttaa se ja hankkia tilalle uudempi. (Järviö 2004, 51.)

#### **4.2.5 Vikojen ja vikaantumisen selvittäminen**

Vikojen ja vikaantumisen selvitystä ei ole mielletty kuuluvaksi kunnossapitoon. Vikojen selvittämistä ei ole käsitelty kunnossapidon standardeissa, vaikka kansainvälisesti menetelmät ovat jo käytössä. Vikojen ja vikaantumisen selvittämisellä selvitetään vian ja vikaantumisprosessin pohjimmainen syy. Saatujen tulosten perusteella tehdään toimenpiteet, jotka jatkossa estävät samanlaisen vian syntymisen. Tavanomaisia menetelmiä vikojen selvityksessä ovat vika-analyysit, vikaantumisen simulointi, mallinnus, perussyyn selvittäminen, materiaalianalyysit, suunnittelun analyysit ja riskinhallinnan kartoitukset. (Järviö 2004, 51.)

### **4.3 Kuntoon perustuva kunnossapito**

Kuntoon perustuva kunnossapito määritellään standardin SFS-EN 13306:n mukaisesti toimintaan pohjautuvaksi ehkäiseväksi kunnossapidoksi. Tämä on ehkäisevää kunnossapitoa, joka perustuu laitteen toiminnan ja parametrien seurantaan ja menettelyyn, jossa toimitaan havaittujen muutosten mukaisesti. Standardissa sanotaan myös, että seuranta voi olla aikataulutettua tai jatkuvaa tai sitä tehdään vaadittaessa. Kuntoon perustuva kunnossapito on kunnonvalvontaa, tarkastuksia ja käyttöparametrien seurantaa, ja se sisältää myös kaikki muut kunnossapitotoiminnot. (Mikkonen ym. 2009, 100.)

## 5 VÄRÄHTELYMITTAUKSET

### 5.1 Johdanto

Pyörivien laitteiden ja koneiden kunnonvalvonnassa käytetään värähtelymittauksia yleisesti. Tärinä- eli värähtelymittauksiin perustuvia mittausmenetelmiä pidetään tehokkaimpina, kun arvioidaan dynaamisia ilmiöitä, kuten laakeroinnin kuntoa, tasapainoa ja koneen eri osiin kohdistuvia voimia. (ABB TTT-käsikirja 2000, 5.)

Värähtelyn mittauksessa käytetään yleisimmin kannettavia analysaattoreita, joilla varsinainen mittaus toteutetaan. Mittatulokset siirretään tietokoneelle, jolla tulokset analysoidaan. Värähtelyä analysoimalla löydetään laakerivikoja, epätasapainoa, linjausvirheitä, mekaanisia välyksiä, taipuneita akseleita, rakenteen resonanssitajuus sekä paljon muuta. Värähtelyn analysointiin käytetään yleensä nopeuden tehollisarvon mittaamista sekä spektrianalysointia. Laakeriviat esiintyvät alkuun korkeilla taajuuksilla, jolloin niiden hakemiseen voidaan käyttää joko verhokäyräanalyysia, tai CSI:n käyttämää PeakVue-analyysia. Vaihtoehtoisia tapoja laakerivikojen hakemiseen ovat iskusysäysmittaus ja SKF:n käyttämä SEE-menetelmä, joka myös mittaa korkealla taajuuskaistalla olevia metalli-metallikosketuksia. (ABB TTT-käsikirja 2000, 5.)

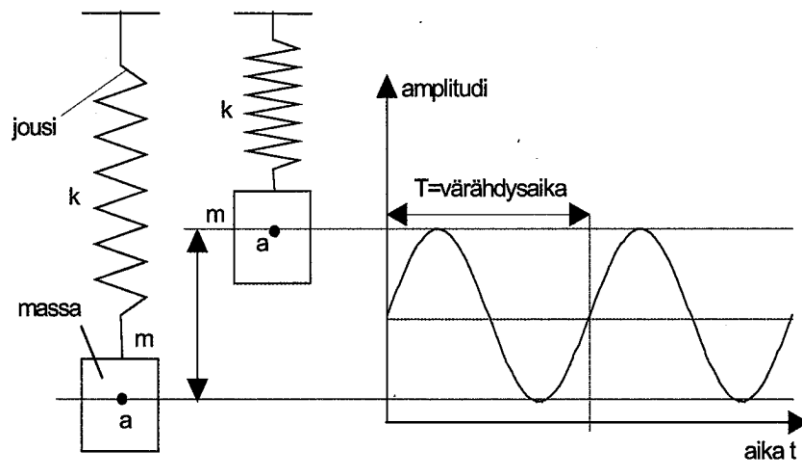
Värähtelymittaajan on tunnettava mittaamisen ja signaalinkäsittelyn teoriaperusteita voidakseen suunnitella mittauksia ja pystyä tulkitsemaan mittalaitteen antamaa dataa oikein.

### 5.2 Värähtelymittauksen teoriaa

Pyörivät laitteet värähtelevät käynnin aikana. Voimia, jotka saavat rakenteen värähtelemään, sanotaan herätteiksi. Epätasapaino aiheuttaa värähtelyä, samoin asennusvirheet ja kuluminen sekä valmistuksen epätarkkuudet. Yleensä laitteen akseli aiheuttaa värähtelyä, mutta värähtely mitataan laitteen rungosta. Värähtely kulkeutuu laitteen runkoon laakereiden kautta, jolloin parhaat mittapisteen ovat

mahdollisimman lähellä laakeripesiä. Käytännön värähtelymittauksissa mittatulosten analysointi suoritetaan eri taajuusalueilla mitattujen spektrien ja niitä vastaavien värähtelyn kokonaistasoarvojen perusteella. (ABB TTT-käsikirja 2000, 7.)

Kaikki värähtelevät laitteet ovat jousi-massasysteemejä, koska mikään laite ei ole täysin jäykkä. Kuviossa 3 on esimerkki.



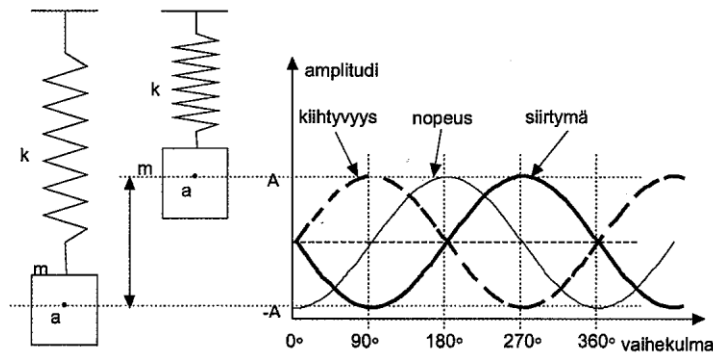
KUVIO 3. Jousi-massasysteemin pisteen a värähtely aikatasossa (ABB TTT-käsikirja 2000, 7.)

Jousi kiristetään ja vapautetaan, jolloin aiheutuu värähtelevä liike. Massapiste  $a$  liikkuu tasapainoaseman molemmin puolin käyden maksimissa sekä ylä- että alapuolella kerran yhden värähdysjakson aikana. Kuviossa on tätä vastaava aikatasosignaali, jossa aika on vaakatasolla ja amplitudi pystytasolla.  $T$  kuvaa aikaa, joka on kulunut liikkeen toteutumiseen. Amplitudi kuvaa sitä, kuinka voimakas värähdysliike on. Liike on siniaallon muotoinen. Värähdysaikaa  $T$  vastaa vaihekulma  $\varnothing = 360^\circ$  eli  $2\pi$

### 5.3 Värähtelysuureet ja parametrit

Siirtymällä, nopeudella ja kiihtyvyydellä on sama siniaallonmuoto. Kiihtyvyyden vaihekulma on  $90$  astetta nopeutta edellä, ja nopeus on  $90$  astetta siirtymää edel-

lä. Kuviossa 4 olevat amplitudit on piirretty samankorkuisiksi vaikka niiden yksiköt eivät vastaa toisiaan.



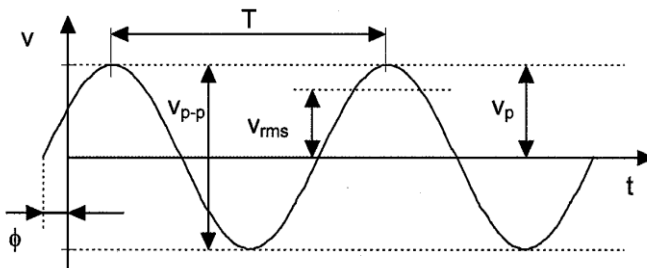
KUVIO 4. a-pisteen kiihtyvyys, nopeus ja siirtymä (ABB TTT-käsikirja 2000, 8.)

Värähtelevää laitetta tutkittaessa voidaan tulos ilmoittaa nopeutena (mm/s), kiihtyvyytenä ( $\text{mm/s}^2$ ) tai siirtymänä, jolloin yksikkö on mikrometri ( $\mu\text{m}$ ). Siirtymää ja nopeutta käytetään yleensä matalataajuisen värähtelyn ilmaisuun. Kiihtyvyys vuorostaan sopii korkeammille taajuuksille. Normaalisti värähtelymittauksissa käytetään perusmittasuurena värähtelynopeutta, sillä sen vaste on sopivin niille taajuuksille, joista ollaan kiinnostuneita. Nopeutta mitataan yleensä 10–1000 Hz:iin, kiihtyvyyttä 10–3000 Hz:iin. Taulukossa 5 esitetään Euroopassa käytettävät suureet ja yksiköt.

TAULUKKO 5. Suuret ja yksiköt (Mikkonen ym. 2009)

Mitattava suure	Lyhenne	Yksikkö
Siirtymä	s	$\mu\text{m}$ ( $=1/1000$ mm)
Nopeus	v	mm/s
Kiihtyvyys	a	$(\text{m/s}^2)$ tai $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Vaihekulma	$\emptyset$	aste ( $^\circ$ ) tai radiaani ( $360^\circ = 2 \pi \text{rad}$ )

Yleisimmät suureisiin liittyvät parametrit ovat kuviossa 5 nopeussignaalin avulla esitettynä.



KUVIO 5. Yleisimmät värähtelysignaaliin liittyvät parametrit (ABB TTT-käsikirja 2000, 8.)

Missä

- $T$  = jakso eli värähdysaika  $360^\circ$
- $v_{p-p}$  = nopeuden huipusta huippuun-arvo
- $v_p$  = nopeuden huippuarvo
- $v_{RMS}$  = nopeuden tehollisarvo
- $\emptyset$  = vaihekulma

**Aikataso** on esitysmuoto, jossa tässä tapauksessa nopeuden arvo ilmaistaan ajan funktiona.

**Huippuarvo** on aikatasosignaalin itseisarvoltaan suurin arvo.

**Huipusta huippuun-arvo** on suurimman ja pienimmän arvon erotus ja yleensä kaksinkertainen huippuarvoon nähden.

**Tehollisarvolla** on yhteys värähtelyn sisältämään energiaan. Siniaallolla tehollisarvo on huippuarvo jaettuna  $\sqrt{2}$  eli 0,707 kertaa huippuarvo.

**Vaihekulma** kertoo jakson kohdan, johon värähtely on edennyt vertailukohdasta.

Yleisimmin tunnuslukumittauksissa käytetään suurena nopeuden tehollisarvoa ( $V_{RMS}$ ). Standardissa PSK 5701 määritellään värähtelynopeuden tehollisarvo mitattuna määritellyllä taajuuskaistalla. Tätä tehollisarvoa käytetään laitteiden tunnuslukuvalvonnassa. (Mikkonen ym. 2009, 231.)

Koska nopeus, kiihtyvyys ja siirtymä liittyvät toisiinsa matemaattisesti, voidaan värähtely ilmaista halutussa muodossa, kun tiedetään taajuus ( $f$ ). TAULUKOSSA 6 esitetään kuinka kiihtyvyyden huippuarvosta saadaan laskettua nopeuden ja siirtymän huippuarvot.

TAULUKKO 6. Kiihtyvyys, nopeus ja siirtymä (Seilonen 1996, 29.)

Kiihtyvyyden huippuarvo	Nopeuden huippuarvo	Siirtymän huippuarvo
$A_p$	$V_p = A_p / (2\pi f)$	$S_p = A_p / (2\pi f)^2$

Usein mittauksissa mitataan värähtelyn kiihtyvyyttä ja muut suureet lasketaan integroinnin avulla. Sinimuotoinen jatkuva signaali voidaan esittää yhtälöllä (2).

$$x = X \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (2)$$

Jossa  $X$  on värähtelyn amplitudi,  $f$  on värähtelyn taajuus,  $t$  on aika ja  $\varphi$  on vaiheero ajanhetkellä nolla. (Mikkonen ym. 2009, 182.)

Nopeudelle  $\dot{x}$  saadaan yhtälö derivoimalla siirtymän yhtälö (2). (Mikkonen ym. 2009, 219.)

$$\dot{x} = -2X\pi f t \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (3)$$

Kiihtyvyydelle  $\ddot{x}$  saadaan yhtälö derivoimalla nopeuden yhtälö (3). (Mikkonen ym. 2009, 219.)

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

Kiihtyvyyden, nopeuden ja siirtymän välillä on täysi yhteys teoriassa integroinnin ja derivoinnin kautta. Kun jokin suureista tiedetään, mikä tahansa voidaan sitä kautta laskea. Derivointi siirtymästä nopeuden kautta kiihtyvyyteen on toimiva, mutta Integroinnissa tapahtuva kumulatiivinen summaus kasaa anturin vaihe- ja amplitudi, sekä muut pieniltä kuulostavat virheet aiheuttaen suuria vääristymiä signaalin alataajuuksille. (Mikkonen ym. 2009, 219.) Matemaattisesti voidaan mitattua signaalia käsitellä taajuustasossa seuraavasti (Mikkonen ym. 2009, 220):

$$\dot{x} = \frac{5}{\omega} = \frac{5}{2\pi 100} = \frac{0,0079m}{s} \quad (5)$$

Kaavassa 5 integrointi suoritetaan jakamalla spektrin jokainen taajuuskomponentti tekijällä  $2\pi f$ , missä  $f$  on taajuus. Kun taajuudella 100 Hz kiihtyvyyden amplitudi on  $5 \text{ m/s}^2$ , niin nopeuden amplitudiksi saadaan  $0,0079 \text{ m/s}$ . (Mikkonen ym. 2009, 220.)

#### 5.4 Taajuusspektri eli värähtely taajuustasossa

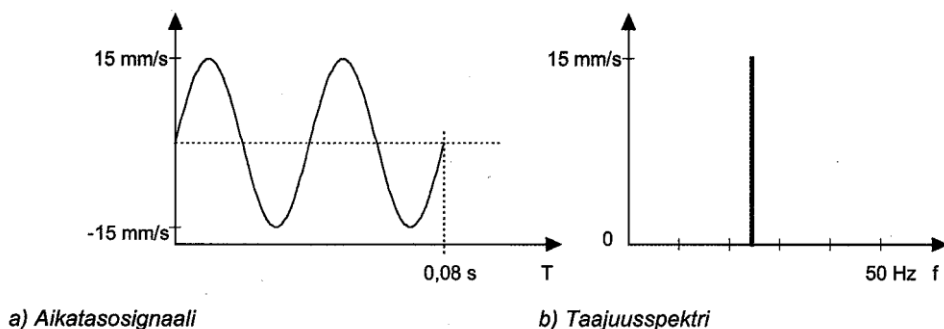
Värähtely esitetään käytännön analyysityössä taajuustasossa. Taajuustason vaak akselina on taajuus ja pystyakselilla värähtelyn voimakkuus eli amplitudi. Analysaattori tasasuuntaa aikatasosignaalin ja laskee FFT-muunnoksen (Fast Fourier muunnos) signaalista. Tulokseksi saadaan taajuusspektri.

Värähtelyn taajuus kuvaa sitä, kuinka monta värähdysliikettä aikayksikössä tapahtuu. Taajuuden lyhenne on  $f$ , ja SI-järjestelmän yksikkö Hz on  $1/s$ .

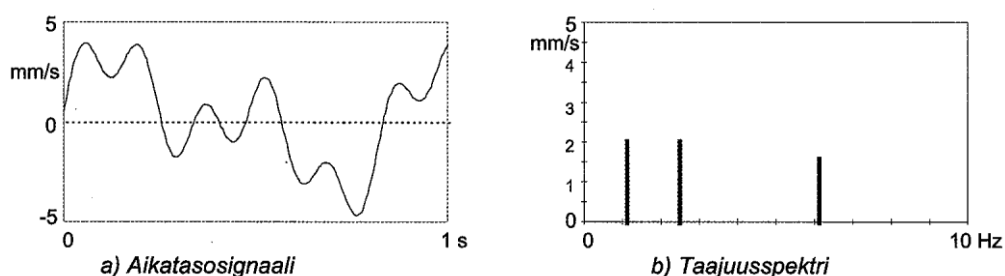
$$f = 1/T, \text{ missä } f \text{ on taajuus ja } T \text{ on jakson aika.} \quad (6)$$

Esimerkiksi moottorin pyörimisnopeus on 1480 rpm. Jakamalla pyörimisnopeus 60:lla saadaan pyörimistaajuudeksi 24,66 Hz.

Kuviossa 6 Taajuusspektrin pylvään korkeus kuvaa yhden siniaallon amplitudia ja vaaka-akselin kohta taajuutta. Kuviossa 7 vastaava esitys kolmen eri siniaallon muodostamasta taajuusspektristä.



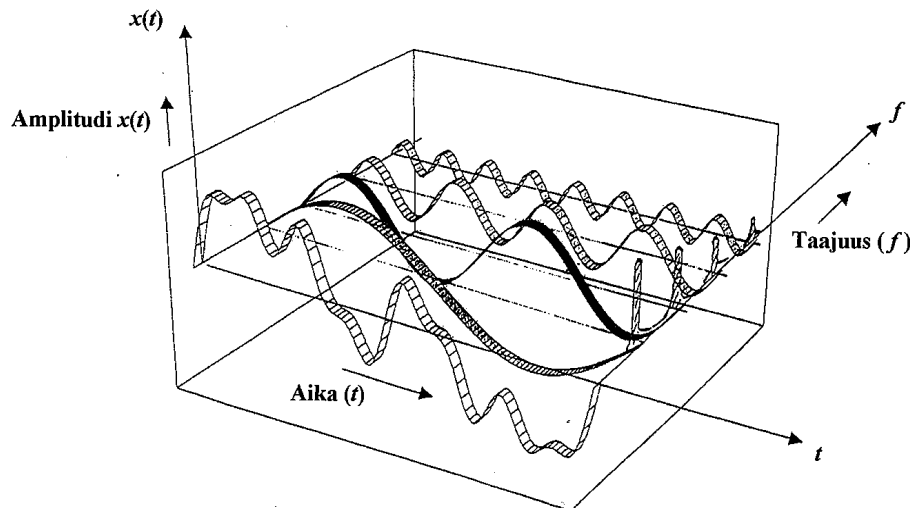
KUVIO 6. Yhden siniaallon esitys aika- ja taajuustasossa (ABB TTT-käsikirja 2000, 10.)



KUVIO 7. Kolmesta taajuudesta koostuva aikatasosignaali taajuustasossa (ABB TTT-käsikirja 2000, 10.)

Spektri muodostuu joukosta signaaleja, jotka esitetään taajuustasossa. Taajuusspektrin avulla saadaan selville millaisista perusvärähtelyistä kokonaisvärähtely

syntyy. Aikatasosignaalista saadaan selville taajuusspektrissä näkyvät taajuudet. Kuviosta 8 voi nähdä kuinka aikatasosignaali koostuu useista sinimuotoisista signaaleista, jotka summautuvat yhteen.

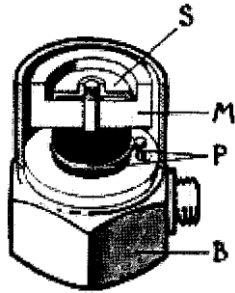


KUVIO 8. Fourier-muunnoksen periaate (Mikkonen ym. 2009, 190.)

Kuvion etumainen signaali kuvaa aikatasosignaalia, ja seuraavat signaalit ovat eri komponenteista johtuvia värähtelyjä, jotka on eroteltu. Taajuustasossa erottuvat taajuudet sekä amplitudin voimakkuus.

## 5.5 Kiihtyvyyssanturit

Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi sisältää muihin värähtelyantureihin verrattuna useita etuja, joiden vuoksi siitä on tullut yleisin värähtelymittausanturi. Anturi on pienikokoinen, joten se on mahdollista asentaa suhteellisen ahtaisiin väleihin. Anturissa ei ole kuluvia osia. Sen mittausalue on laaja, hertzin osista satoihin kilohertzeihin. Ympäristöolosuhteet eivät vaikuta paljoa hermeettisesti suljettuun anturiin. Kuviossa 9 kuvataan kiihtyvyyssanturin rakennetta, jossa S on jousi, M on seisminen massa, P on pietsosähköinen elementti ja B on anturin rungon pohja.



KUVIO 9. Kiihtyvyyssanturi (Mikkonen ym. 2009, 238.)

Anturi muodostuu rungosta, seismisestä massasta ja näiden väliin sijoittuvasta pietsoelementistä sekä jousesta. Anturissa mitataan tunnettuun massaan kohdistuva voima. Anturi kiinnitetään mitattavaan koneeseen magneetilla tai vaarnaruuvilla, jolloin anturi liikkuu koneen liikkeiden mukana, Koneen liike aiheuttaa anturin sisällä olevaan massaan voiman  $F$ . Newtonin toisen lain mukaan

$$F = ma \quad (7)$$

jossa  $F$  on voima

$m$  on massa

$a$  on kiihtyvyys

Voima on siis kiihtyvyyteen verrannollinen. Pietsoelektriseen elementtiin muodostuu siis koneen värähtelyyn verrannollinen varaus, joka johdetaan vahvistimen kautta ulostuloliittimeen. Näin saadaan kiihtyvyyttä vastaava sähköinen signaali.

(Mikkonen ym. 2009, 238.)

Kiihtyvyyssanturit kiinnitetään mitattavaan laitteeseen magneetilla, ruuvilla tai käsin painamalla. Kiinnitystavan mukaan vaihtelee myös mitattava ylärajataajuus. Käsin painamalla ylärajataajuus jää vain 600 hertziin, Magneettia käytettäessä ylin taajuus vaihtelee 800-4000 Hz pinnan tasaisuuden ja magneetin voimakkuuden mukaan. Ruuvikiinnityksellä voidaan päästä yli 20 000 Hertziin. (Nyhonok & Lumme 1996, 55.)

Kiihtyvyyssanturin hyviä puolia ovat pieni koko, keveys, hinta ja laaja mitta-alue. Heikkoutena on herkkä rakenne. Se vaurioituu helposti pudotessa. Mittatulokseen vaikuttavat anturin asettumisaika, sekä sähköiset häiriöt. Asettumisajalla tarkoitetaan aikaa joka kuluu, kun anturi asetetaan mitattavaan laitteeseen, jolloin anturiin kohdistunut isku lamauttaa pietsokiteen joksikin ajaksi. Toinen isku syntyy kun anturiin kytketään jännite. (Nyhonek & Lumme 1996, 55.)

Koska analysaattorit kykenevät integroimaan kiihtyvyyden nopeudeksi, voidaan samaa anturia käyttää sekä korkeiden että matalien taajuuksalueiden tutkimiseen. (Nyhonek & Lumme 1996, 55.)

## **5.6 Valvontamenetelmät**

PSK 5706:n mukaisesti värähtelymittausten valvontamenetelmien valvottavat suu-reet perustuvat koneen rakenteen, käytettävän mittaustekniikan ja ennakoitavien vikatyyp-pien perusteella tärinään, jota valvotaan nopeutena, siirtymänä, kiihtyvyy-tenä tai kiihtyvyyden derivaattana. Tärinää valvotaan pääsääntöisesti nopeutena. Alle 10 Hz:n tärinää, eli pyörimisnopeudeltaan alle 600 rpm voidaan valvoa siirty-mänä. Kiihtyvyyttä suositellaan käytettäväksi kun ylärajataajuus on suurempi kuin 1000 Hz. Siirtymän valvontaa käytetään myös liukulaakeroiduissa koneissa. (PSK5706 2002)

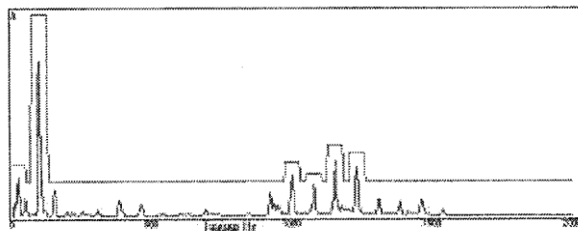
### **5.6.1 Kokonaistasovalvonta**

Kokonaistason valvonnassa tarkasteltavana suureena käytetään tehollisarvoa tai huippuarvoa värähtelykiihtyvyydelle. Samaa suuretta voidaan käyttää myös väräh-telynopeudelle ja värähtelysiirtymälle. PSK 5701:n mukaisesti näitä kutsutaan ko-konaistasoiksi. Kokonaistaso kuvaa värähtelyn voimakkuutta, ja se on sopimaton useiden vikojen havaitsemiseen. Värähtelyvalvonnassa käytetään yleensä nopeu-den tehollisarvoa taajuuksalueella 10–1000 Hz. Seuranta perustuu trendiin, jolloin mittaukset tehdään aikataulun mukaisesti kuukausittain, aina samasta mittauspis-teestä. (Mikkonen ym. 2009, 284.)

PSK 5704 määrittelee hälytysrajat tietyn tyyppisille koneille. Koneiden värähtelytasot ovat yksilöllisiä, joten täsmällinen standardin noudattaminen voi johtaa väärään tulkintaan laitteen kunnosta. Suositeltavaa on, raja-arvojen lisäksi, seurata laitteessa tapahtuvien muutoksien nopeutta. Trendiseuranta soveltuu varmuudella havaitsemaan epätasapainoa, linjausvirheitä sekä resonanssiongelmia, jotka näkyvät muutoksina kokonaistasotrendissä. (Mikkonen ym. 2009, 284.)

### 5.6.2 Spektrivalvonta ja spektrianalyysi

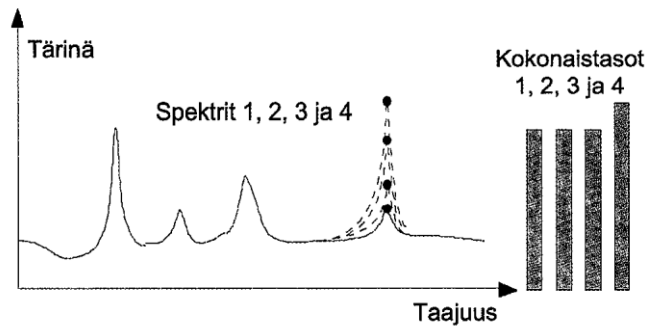
Spektrivalvonnassa verrataan mitattua spektriä aikaisempien mittatulosten avulla muodostettuun hälytysrajaspektriin. Jos asetettu hälytysraja ylittyy minkä tahansa spektriinkin kohdalla, aiheutuu hälytys. Toisena vaihtoehtona voidaan käyttää niin sanottua kaistanvalvontaa. Kaistanvalvonnassa tietyille taajuuskaistoille asetetaan raja-arvot, joiden ylittäminen aiheuttaa hälytyksen. Kuviossa 10 esitetään spektrivalvonnalle määritelty hälytysrajaspektri.



KUVIO 10. Spektrivalvonta (PSK 5706 2002.)

Spektrianalyysi on vianmäärityksen menetelmä, jossa FFT- laskennalla muodostetaan amplitudispektri taajuustasossa. Amplitudien suuruus kertoo värähtelyn voimakkuuden, ja taajuustasosta voidaan lukea taajuus, jolla värähtely tapahtuu. Näitä tietoja käytetään hyväksi analysoidessa koneen eri osien kuntoa. Kaikille laitteille on tyypillinen laitteen pyörimistaajuudella esiintyvä amplitudi. Tämä voi johtua valmistustoleranssien sisällä olevista epätarkkuuksista tai koneen normaalia toiminnasta. Trendiseurannassa havaittu pyörimistaajuuden kasvu voi johtua epätasapainosta, esimerkiksi puhaltimen siipien likaantumisesta. (Mikkonen ym. 2009, 285.)

Joidenkin vikojen oireet eivät välttämättä kasvata pyörimistaajuuden amplitudia, jolloin värähtelyn tehollisarvoon ei tule suurta muutosta. Tämä aiheuttaa sen, että vikaantuminen, esimerkiksi laakerivauriot pääsevät etenemään kaikessa hiljaisuudessa. Näin voi käydä jos koneiden kuntoa valvotaan vain kokonaistasomittauksilla. (ABB TTT-käsikirja 2000, 14.) Kuviossa 11 esitetään miten vaurion kehittymisen on nähtävissä spektrissä ja kokonaistasossa.



KUVIO 11. Muutos kokonaistasossa näkyy vasta neljännessä spektrissä (ABB TTT-käsikirja 2000, 14.)

Kuviossa 12 esitetään laskukaavat (8), (9)...(11), laakerin vierintätaajuuksille. Näitä taajuuksia ja niiden kerrannaisia käytetään hyväksi etsittäessä laakereissa esiintyviä vikoja.

$N$  on vierintäelinten lukumäärä  
 $n$  on akselin pyörimistaajuus

Ulkokehän ohitustaajuus:

$$f_u = BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \cdot n \quad (8)$$

Sisäkehän ohitustaajuus:

$$f_s = BPF I = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \cdot n \quad (9)$$

Vierintäelimen vikataajuus:

$$f_v = BSF = \frac{D}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta\right)^2\right] \cdot n \quad (10)$$

Pitimen vikataajuus:

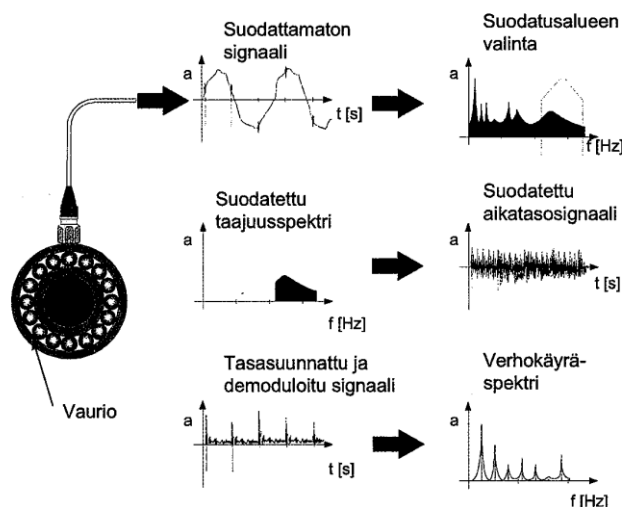
$$f_p = FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \cdot n \quad (11)$$

KUVIO 12. Esimerkki laakerin vikataajuuksien laskukaavoista (Mikkonen ym. 2009, 313.)

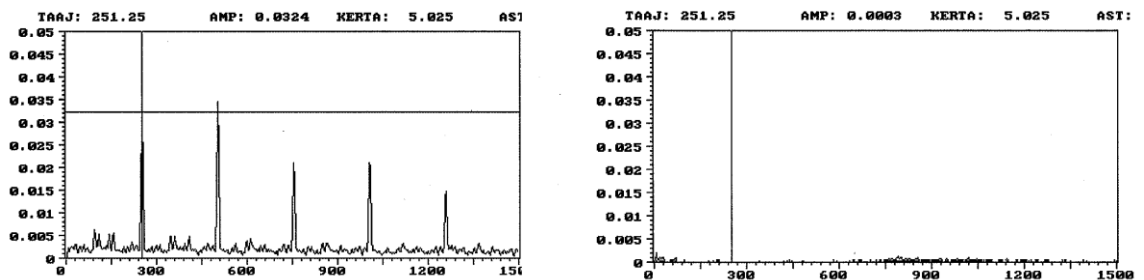
### 5.6.3 Verhokäyrä ja PeakVue-valvonta

Koska monet alkavat laakeriviat ovat värähtelyvoimakkuudeltaan niin heikkoja, että ne peittyvät muiden laitteen värähtelyjen alle, ovat laitevalmistajat kehittäneet analyysimenetelmiä vikojen varhaiseen havaitsemiseen. Verhokäyräanalyysi suodattaa pois signaalista esimerkiksi matalataajuiset epätasapainosta ja väärästä linjauksesta johtuvat värähtelyt. (ABB TTT-käsikirja 2000, 14.)

Vaurio laakerissa aiheuttaa ajanjakson  $T$  välein toistuvia iskuja. Taajuusspektrissä korkeilla taajuuksilla näkyy laajakaistainen resonanssikohta. Kaistanpäästösuodatin asetetaan korkeataajuisen resonanssikohtaan ympärille, ja se toimii samalla mekaanisena vahvistimena iskumaisille impulsseille, jotka vaurio saa aikaan. Signaali tasasuunnataan ja demoduloidaan. Nyt signaali sisältää vain vaurion aiheuttamat iskut. Signaalille suoritetaan FFT- analyysi, jolloin saadaan laakerin vikataajuuskomponentit näkyviin verhokäyräspektriin. Ehjälle laakerille verhokäyräspektri on tasainen. Vioittuneen laakerin vikataajuudet voidaan varmistaa laakerin valmistajan sivuilta, jos tiedetään laakerin koko ja valmistaja. Tai vikataajuudet voidaan laskea kuvion 12 mukaisesti. (ABB TTT-käsikirja 2000,15.) Kuvion 13 voit nähdä kuinka vaurioituneen laakerin signaali käsitellään verhokäyräspektriä muodostettaessa. Kuviossa 14 esitetään vioittuneen laakerin verhokäyräspektri, ja uusittu mittatulos uudelleen laakeroinnin jälkeen samasta mittapisteestä mitattuna.



KUVIO 13. Signaalin käsittely verhoikäyryanalyysissä (ABB TTT-käsikirja 2000, 15.)



KUVIO 14. Viallisen laakerin verhoikäyräspektri ennen ja jälkeen uudelleen laakeroinnin (ABB TTT-käsikirja 2000, 16.)

Kuvion 14 vasemmalla puolella on nähtävissä viallisen laakerin ulkokehävaurio n 300 Hz:n taajuudella. Vian kerrannaiset näkyvät selvästi ylemmillä taajuuksilla. Oikealla laakerin vikataajuus on jätetty näkyviin. (ABB TTT-käsikirja 2000,15.)

CSI on kehittänyt PeakVue-menetelmän purskemaisen signaalin käsittelyyn. Sitä voidaan hyödyntää hitaasti pyörivissä laitteissa, vierintälaakereissa ja muissa metalli-metallikosketuksia sisältävissä laitteissa kuten, vaihdelaatikoissa. Mittaustaajuusalueena toimii noin 40 kHz:n kaista. Signaalista poistetaan samaan tapaan kuin verhoikäyryanalyysissä epätasapaino ja muut alkavia vaurioita peittävät taajuuudet ylipäästösuodattimella. (Hentelä 2009)

Tämän jälkeen signaali tasasuunnataan ja paloitellaan jaksoiksi. Mitatuksi saadaan korkeataajuisen kohinan taso ja huippuarvot. Jos tutkittava laite on vikaantunut, huippuarvot toistuvat tietyin väliajoin. Nyt PeakVue-signaalista otetaan spektri, jolloin saadaan huippuarvojen toistumistaajuus. Näitä taajuuksia verrataan esimerkiksi laakereiden ohitustaajuuksiin tai vaihdelaatikon ryntötaajuuteen. Kokonaistason kohoaminen kertoo puutteellisen voitelun. (Hentelä 2009)

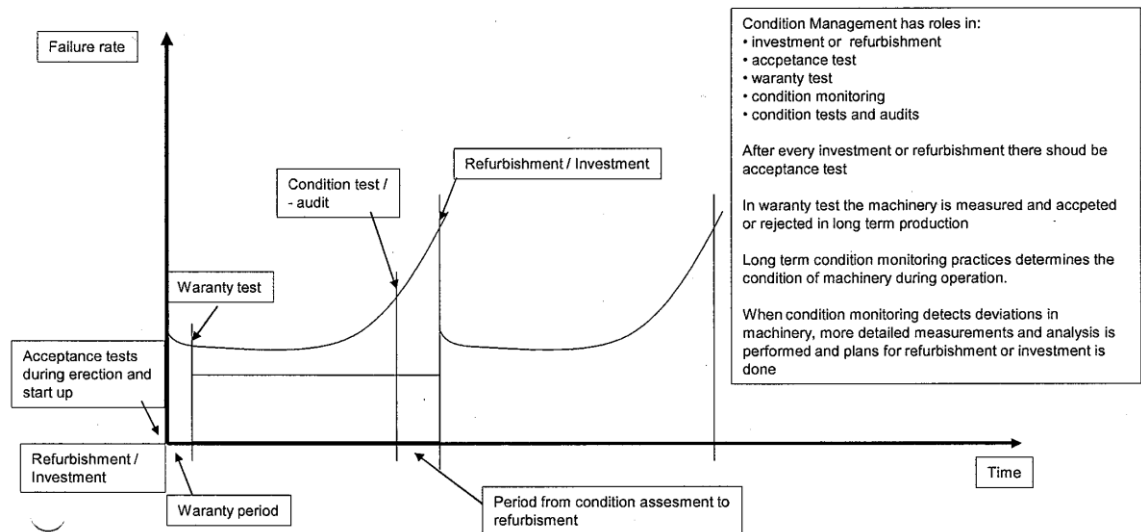
## 6 VÄRÄHTELYMITTAREITIN LAADINTA

### 6.1 Yleistä

Kunnonvalvonnan lähtökohtana on valvoa koneen kuntoa menetelmillä, joilla voidaan luontevasti havaita todennäköiset viat ja niiden kehittyminen. Kunnonvalvonnalla voidaan parantaa laitteiden käytettävyyttä, lisätä kunnossapidon suunnitelmallisuutta ja taloudellisuutta, ennakoida koneiden vaurioituminen sekä minimoida vakavat vauriot. (Kautto 2009.)

PSK 5705:n mukaan valvottavia kohteita valittaessa on huomioitava PSK 6800:n mukaiset tekijät. Värähtelyvalvonnan täytyy olla teknisesti toteutettavissa. Tämä tarkoittaa sitä, että laitteelle voidaan määritellä jokin värähtelyn raja-arvo tai oire, joka ilmaisee alkaneen vikaantumisen. Vikaantumisen etenemistä pitää pystyä seuraamaan ja ennustamaan mittauksen perusteella. Lisäksi mittauksia pitää pystyä tekemään tiheämmin ennen vikaantumisen muuttumista vaurioksi. (PSK 5705 2006.)

Kuviossa 15 näytetään yhden laitteen elinkaari kunnossapidon mittauksineen aika-vaurioakselilla. Kunnonvalvonnan tehtäviä ovat käyttöönottotarkastusmittaukset, takuutarkastusmittaukset, kunnonvalvonnan mittaukset sekä kuntotestit ja auditoinnit. Kunnonvalvonnan mittauksia tehdään läpi laitteen elinkaaren, käyttöönottotarkastusmittaukset otettaessa laite käyttöön ja aina uusimisen yhteydessä.



KUVIO 15. Laitteen elinkaari vaiheittain (Kautto 2009.)

## 6.2 Mittausten raja-arvot

Laitteita käytettäessä tapahtuu kulumista, jonka havaitsemiseksi määritellään kaksi hälytysrajaa. Alempi raja on hälytysraja, joka ilmaisee vikaantumisen kehittyneen ja antaa impulssin kunnonvalvonnalle tihentää laitteen tarkkailua, selvittää vian syy ja varautua laitteen korjaamiseen. Ylemmän vauriorajan ylittäminen tarkoittaa vakavaa vaurion mahdollisuutta ja edellyttää laitteen korjaamista ensi tilassa, jopa välittömästi. (PSK 5705, 2006)

Laitevalmistajat ilmoittavat koneilleen raja-arvosuosituksensa käyttöönoton yhteydessä. Muuten voidaan käyttää konetyypille värähtelystandardeissa määritellyjä arvoja. Jos käytössä on vastaavia laitteita, voidaan raja-arvot määritellä kunnonvalvonnan kokemusten perusteella. (PSK 5705, 2006,4.)

Taulukko 7 sisältää eri koneryhmien tärinärasitusalueet. A tarkoittaa vastaanoton yhteydessä sallittua tärinärajaa. B on koneen sallittu tärinärasitusalue takuuajan jälkeen. C on hälytysraja, jota voidaan käyttää alkavana vauriorajana. D on vaurioraja. Tärinärasitus on esitetty nopeuden tehollisarvona. Koneryhmä 1 tarkoittaa suuria koneita joiden nimellisteho on suurempi kuin 300 kW ja sähkökoneita, joiden akselikorkeus on vähintään 315 mm. Koneryhmään 2 kuuluvat keskikokoiset

koneet, joiden nimellisteho on enintään 300 kW, ja sähkökoneet, joiden akselikorkeus on välillä 160 mm ja 315 mm. (PSK 5704, 2002)

TAULUKKO 7. Koneiden värinärasitusalueet (PSK 5704, 2002)

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

Ryhmään 3 kuuluvat pumput, puhaltimet ja kompressorit, joilla on erillinen akseli moottorin kanssa. Nimellisteho on suurempi kuin 15 kW. Ryhmään 4 kuuluvat pumput ja puhaltimet. (PSK 5704, 2002)

### 6.3 Tarvittavat pohjatiedot mittareitin tekemiseen

Jotta värähtelymittareitin tietokanta pystytään rakentamaan, tarvitaan mitattavien laitteiden konepaikkatiedot moottoritunnuksineen. Yleensä nämä löytyvät helpoiten tehdastietokannasta (esim. Arttu tai SAP). Tarvittavia laitetietoja moottoreista, pumpuista ja puhaltimista sekä vaihdelaatikoista ovat

- laakeritiedot
- pyörimisnopeus
- napaisuus

- mahdollinen taajuusmuuntajien käyttäminen
- moottorin asento
- siipien lukumäärä
- hihnapyörien koot
- hihnan pituus
- välityssuhde
- porrasluku
- hammaspyörätiedot.

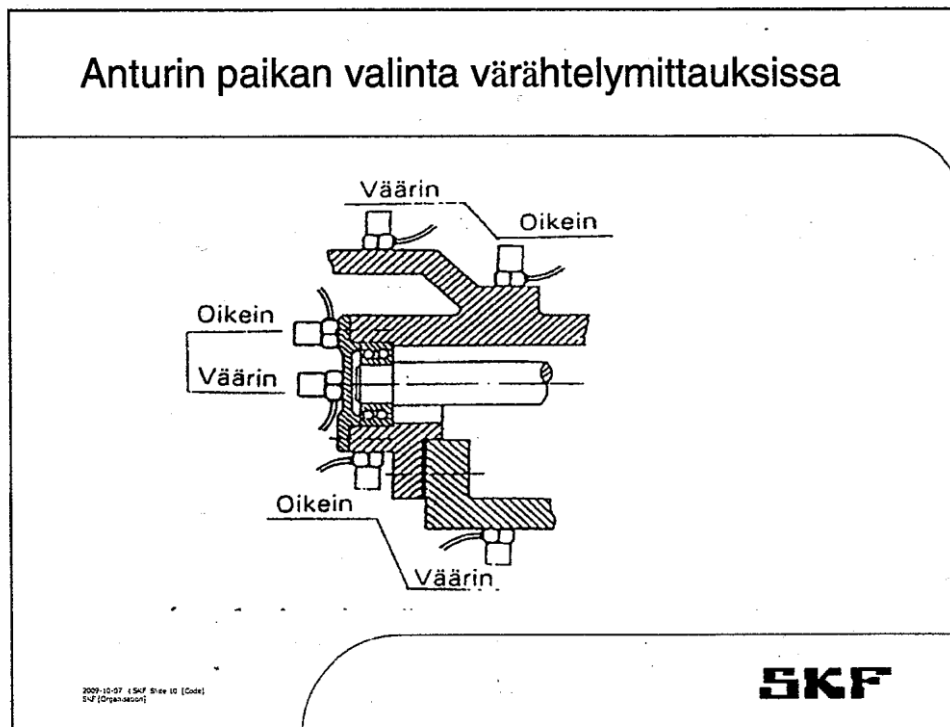
Näitä tietoja hyväksi käyttäen pystytään laitteista laskemaan niin sanottuja vikataajuuksia, joita voidaan syöttää suoraan analysaattoriin valmiiksi mittausten analysointia varten.

Värähtelymittareittiä valmistellessa kannattaa tutustua laitteisiin paikan päällä. Tärkeää on selvittää, kuinka helposti laitteiden luokse pääsee. Joissakin tapauksissa luokse pääseminen on niin hankalaa, että puolikiinteä anturointi on paikallaan. Tämä tarkoittaa sitä että anturit kiinnitetään mitattaviin kohteisiin pysyvästi ja anturilta tuleva kaapeli tuodaan mittapaneeliin BNC-liittimeen, josta mittaustiedot kerätään. Tämä tapa on erittäin hyvä silloin kun, ympäristön olosuhteet ovat vaativat esimerkiksi lämpötilan tai kaasujen vuoksi. Värähtelymittareitti ei saa olla liian pitkä eikä liian lyhyt. Mitattavat kohteet kannattaa laittaa järkevään kiertojärjestykseen, ettei tule turhaa edestakaisin kulkemista. (SKF kunnonvalvontakoulu 2009.)

#### **6.4 Anturin paikan valinta**

Seuraavassa vaiheessa valitaan oikeat mittaussuunnat mitattavista laitteista ja valitaan anturille hyvä paikka, joka merkitään tussilla. Tämä tehdään siksi, että mittaus tapahtuisi aina samasta paikasta. Mittausten kannalta olisi hyvä, että moottoreihin on kiinnitetty mittausnipat. Tällä varmistetaan hyvän mittatuloksen saaminen ja se että mittauspaikka on varmuudella aina sama. Kuviossa 16 näytetään anturin oikea paikka mittausten onnistumisen kannalta. Signaalin pitäisi kul-

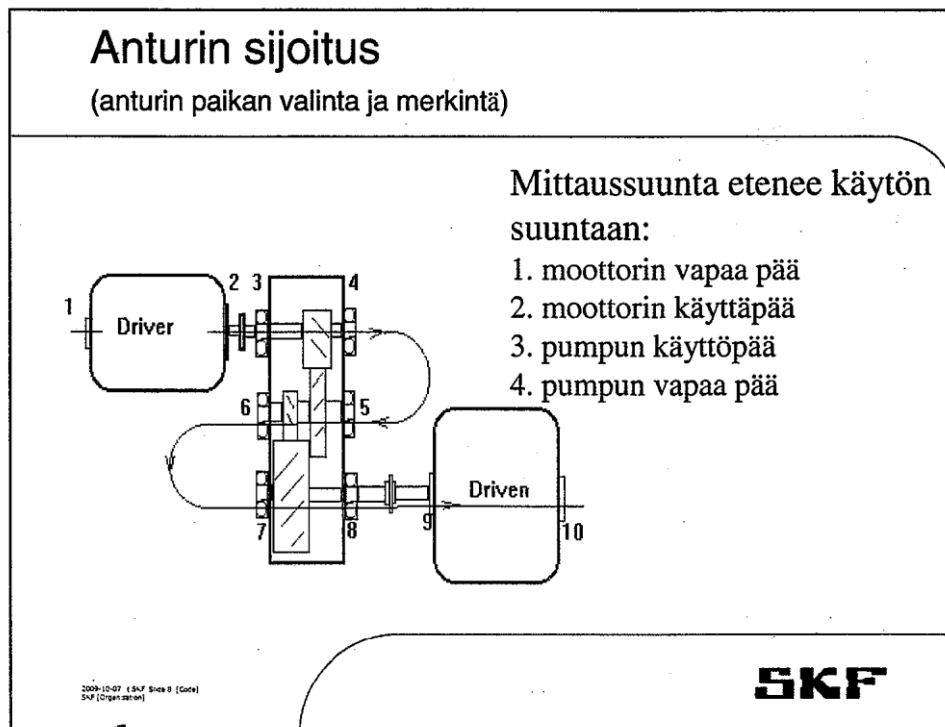
keä mahdollisimman suoraan ilman rajapintoja ja värähtelylähde ja anturi ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. (PSK 5702, 2007.)



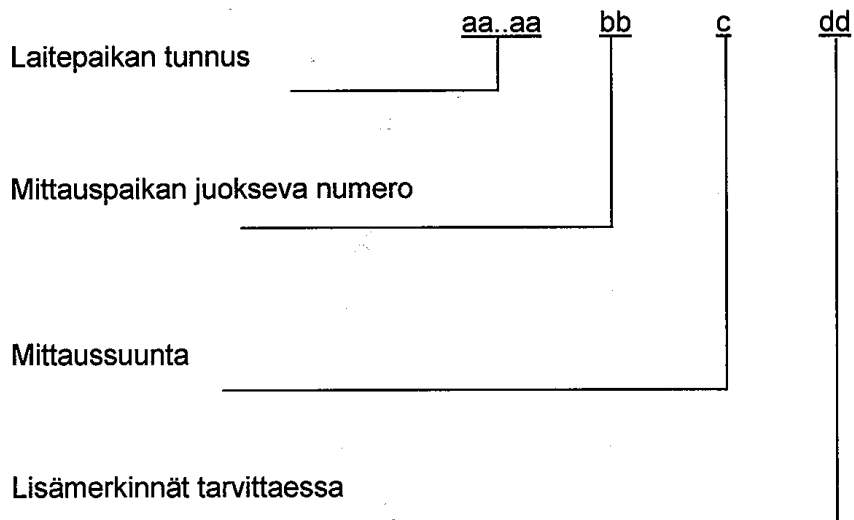
KUVIO 16. Anturin paikan valinta (SKF kunnonvalvontakoulu 2009.)

## 6.5 Laittepaikka ja mittapisteeet

PSK 5702:n mukaisesti laitepaikka tulee merkitä pysyvällä ja yksikäsitteisellä tunnistamismerkinnällä. Kuviossa 17 on nähtävissä kuinka mittauspaikat laitteessa numeroidaan voimansiirron kulkusuunnan mukaisesti alkaen moottorin vapaasta päästä kohti käytettävän laitteen vapaata päätä. (PSK 5702, 2007) Kuviossa 18 esitetään standardin PSK 5702:n mukaiset merkinnät.



KUVIO 17. Mittaus suunnan eteneminen (SKF kunnonvalvontakoulu 2009.)



KUVIO 18. Mittapisteen tunnistaminen (mukaillen PSK 5702, 2007)

Esimerkiksi Maintpartnerissa käytetään seuraavaa merkintää:

LA 9083 1V Sä-Mo N-pää Vaaka.

Tämä kertoo mittaajalle mitattavan laitteen tunnuksen LA9083. 1V tarkoittaa nopeusmittausta mittapisteestä 1, Sä-Mo sähkömoottoria, N-pää tuulettimen päätä ja Vaaka mittaussuuntaa. Samantapaiset laitteet kannattaa mitata yhtenevillä mitata-asetuksilla samoista mittauspisteistä koko tehdasalueella. Näin saadaan kerätyksi keskenään vertailukelpoista dataa.

## **6.6 Tietokanta Machinery Health Managerissa**

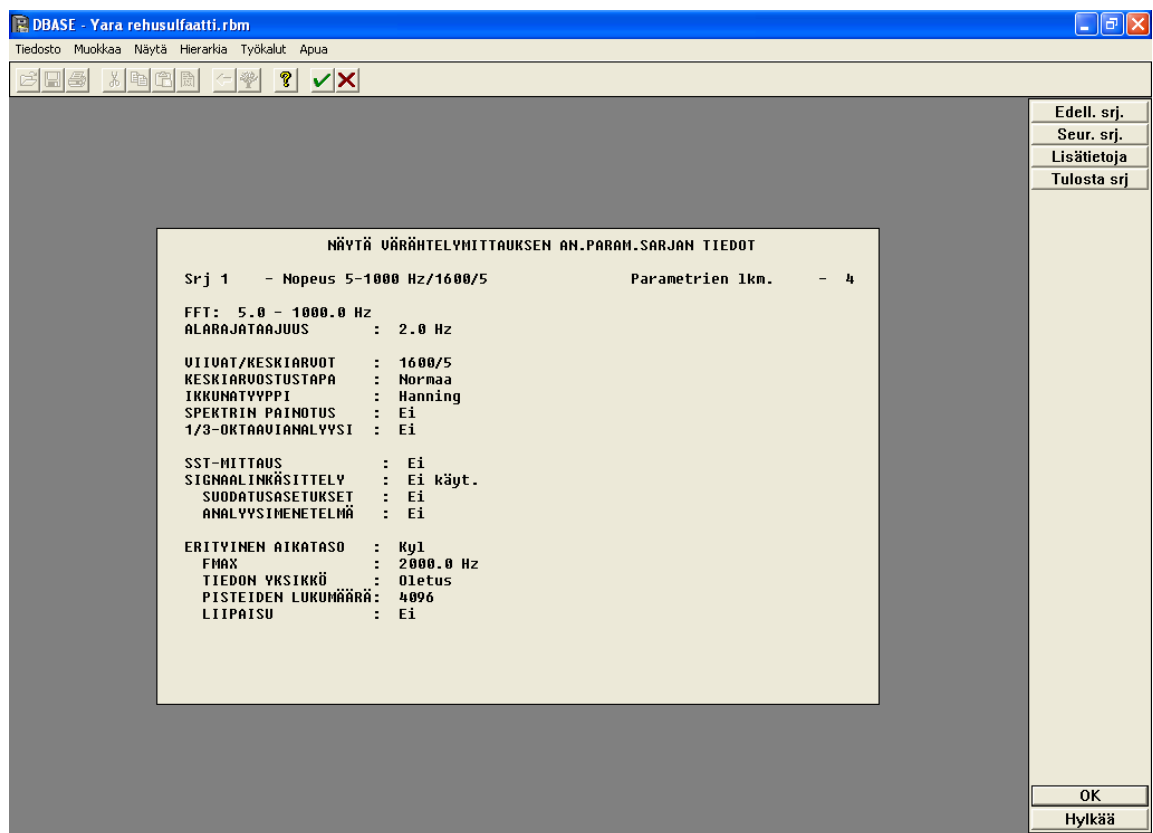
Tietokanta on laitehierarkiassa korkeimmalla oleva kokonaisuus, ja siinä tehdään kaikkiin sen sisällä oleviin laitteisiin määrytykset. Tällaisia määrytyksiä ovat esimerkiksi analyysiparametrisarjat ja hälytysrajasarjat. Näillä määritellään mittauspisteasetukset ja saatavat hälytykset.

Tietokannan seuraava alataso on alue. Mitattava tehdas jaetaan alueisiin. Opin näytetyössä jaoin rehufosfaatti tehtaan neljään eri alueeseen. Alueet olivat 0-kerros, 2-kerros, 3-kerros ja 4-kerros. Tehtaassa olevat laitteet jaettiin siis kerroksittain, mittareitin luomisen helpottamiseksi. Seuraava hierarkian alataso on laite-taso. Laitetasolla muodostetaan alueen koneista kokonaisuuksia. Eli sähkömoottori ja puhallin ovat yksi kokonaisuus eli laite. Mittapiste on hierarkian alin taso. Tänne määritellään laitteiden kohdat, joista mittaukset tehdään. Yhdelle laitteelle tulee siis useampi mittapiste.

Tietokannan rakentaminen voidaan tehdä monella eri tavalla. Yksi tapa on käyttää RBMwizard-nimistä ohjelmaa, jossa ohjelma ohjaa käyttäjää vaiheittain. Perinteisesti tietokannat on rakennettu ”Tietokannan hallinta ja asetukset”-ohjelmistolla.

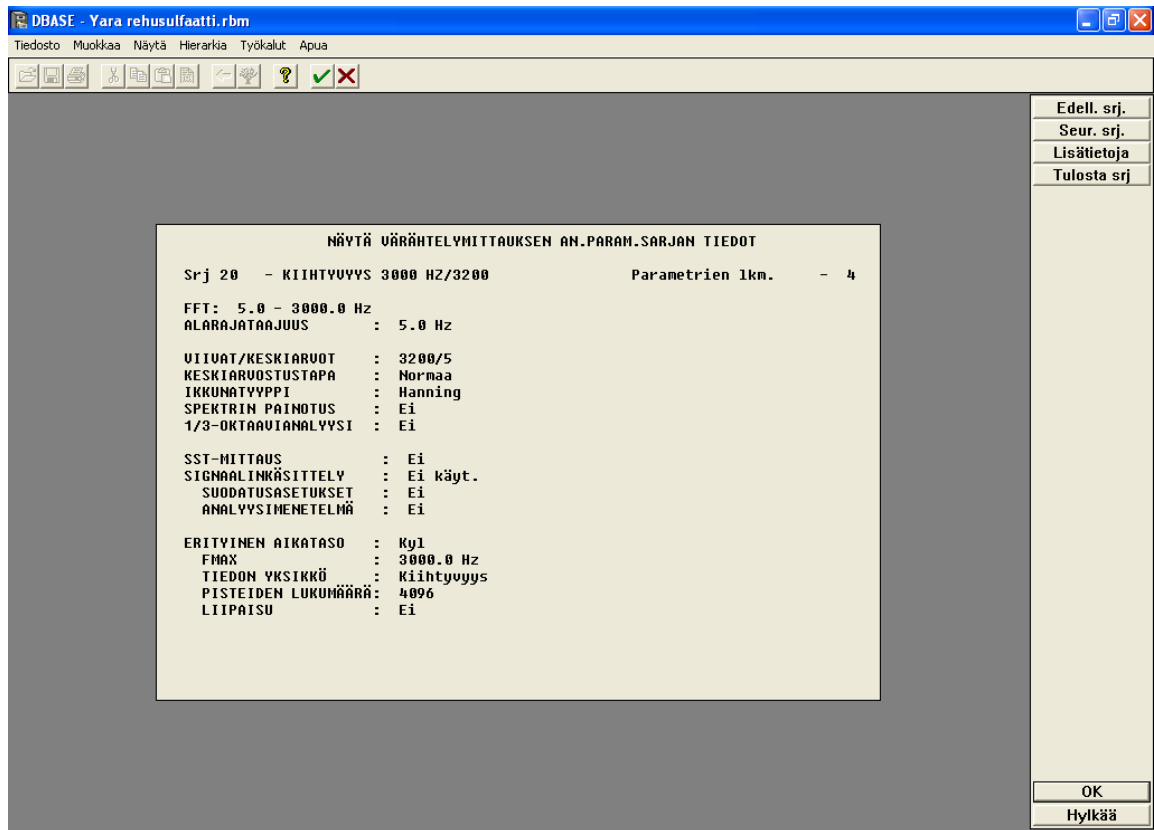
### 6.6.1 Parametrisarjojen määitykset

Reittimittauksissa käytetään niitä mittauspisteitä ja -asetuksia, joilla koneen kuntoa voidaan valvoa luotettavasti. Jokaisesta mittauspisteestä käytetään joko valmiita sarjoja, joissa laitteen pyörimisnopeus on määritelty, tai vaihtoehtoisesti voidaan luoda uusi sarja. Yaran rehutehdasta varten luotiin kolme erilaista sarjaa, nopeus, kiihtyvyys sekä PeakVue. Kuviossa 19 esitetään nopeusmittauksen parametrit. Kuviossa 20 esitetään kiihtyvyyssmittauksen parametrit ja kuviossa 21 esitetään PeakVue-mittauksen parametrit.



KUVIO 19. Työssä laaditun nopeusmittauksen parametrit

Mittausalueeksi määriteltiin 5–1000 Hz, spektriviivojen lukumääräksi asetettiin 1600 ja keskiarvojen lukumääräksi 5. Näin mittatulokseksi tulee viiden eri mittauksen keskiarvo. Taajuusalue jaettuna viivojen lukumäärällä antaa spektrin erottelukyvyn. Eli mitä enemmän on viivoja, sitä tarkemmin pystytään tulkitsemaan. Tämä vastaavasti kasvattaa aikanäytteen pituutta. (SKF kunnonvalvontakoulu 2009.)



KUVIO 20. Työssä laaditun kiihtyvyyksmittauksen parametrit

Mitattava alue on 5–3000 Hz. Viivojen lukumäärä on 3200 kpl ja keskiarvojen lukumäärä on 5.

Mitä korkeampia taajuuksia mitataan, sitä lyhyempi on aikanäyte. Nyrkkisääntönä aikanäytteestä pitäisi näkyä tutkittava asia vähintään 5 kertaa, esimerkiksi laakerin pitimen pyörähdys. (SKF kunnonvalvontakoulu 2009.)

#### Tarvittava mittausaika

Koneen nopeus 1480 rpm = 24,67 Hz      60 s/24,67      eli 0,04 sekuntia

Laakerin pitimen rpm 0,4 x 1480 = 592 Hz      .....      eli 0,10 sekuntia

Mittausaika 10–15 x pyörimisnopeus      eli 0,4–0,6 s

Eli pidin ehtii mittausajassa pyöriä 6 kierrosta, joka on riittävä määrä mahdollisen vian havaitsemiseen.



KUVIO 21. Työssä laaditun PeakVue parametritiedot

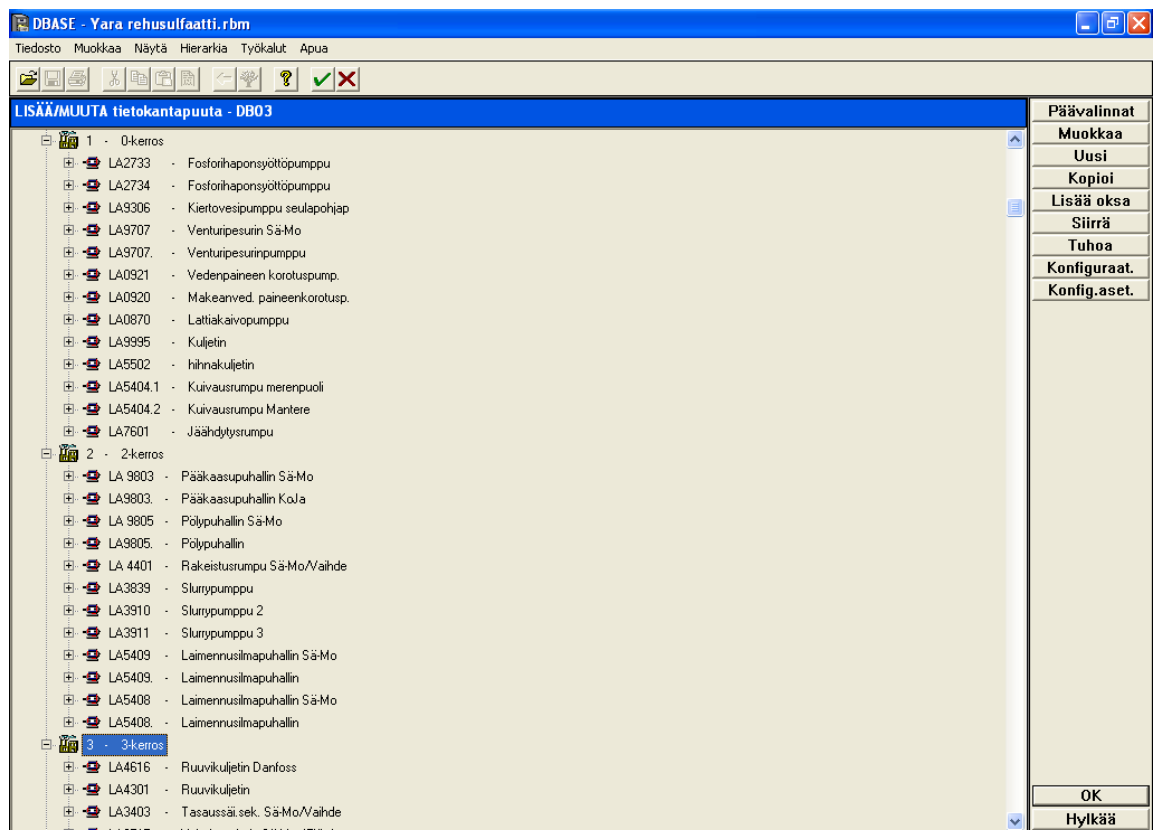
Mittauksessa suodatetaan alemmat taajuudet pois ja mitataan noin 40 kHz:n taajuudelta korkeita purskeita. Nämä jaetaan jaksoihin, jotka tasasuunnataan ja siirretään 5–1000 Hz:n alueelle.

### 6.6.2 Tietokannan luominen

Tietokanta luotiin Tietokannan hallinta ja asetukset ohjelmalla (DBASE). Tietokannalle annettiin nimi ja määritettiin parametriasetukset sekä haluttaessa hälytysrajat. Hälytysrajojen asettelussa voidaan käyttää Standardeja PSK 5704, ISO 10816 tai vaihtoehtoisesti kunnonvalvonnan kokemuksiin pohjautuvia rajoja.

Tämän jälkeen muodostettiin 4 aluetasoa. Aluetasolle luotiin laitteet ja laitteille mittapisteet DBASE-ohjelmalla. Koska laitteet ovat suhteellisen samanlaisia, reitin rakentaminen ei vienyt viikkoa enempää aikaa. Jokaista laitetta ei tarvitse tehdä

kokonaan alusta saakka, vaan muutaman laitteen tekemisen jälkeen pystyi laitetta kopioimaan ja liittämään seuraavaksi laitteeksi. Kopioimisessa pitää huomioida laakeritietojen siirtyminen. Jos kopioi laitteen ja liittää sen seuraavaksi kannattaa tarkastaa, että laakeritiedot ovat niin kuin niiden kuuluisi olla. Jos ne eivät ole mittatulokset antavat väärää tietoa, mistä seuraa analysointivirheitä. Kuviossa 22 esitetään tietokantapuun rakennetta. Kuvioista voi nähdä laitteiden järjestyksen kerroksittain.



KUVIO 22. Työssä laaditun tietokantapuun rakenne

Oikealta olevasta valikosta tapahtuu laitteiden kopioiminen ja liittäminen. Muokkaa valikon kautta pääsee muuttamaan laitteen vikataajuuksia ja laakeritietoja.

### 6.6.3 Värähtelyreitien mittaus

Machine Health Manager -ohjelmassa uusi reitti luodaan reittien hallinnan avulla. Alkuun valitaan Tee uusi reitti -vaihtoehto. Tämän jälkeen valitaan alue, jonne reitti tehdään. Sitten annetaan reitille nimi ja nimetään reitintekijä nimikirjaimin. Keruutietoihin ohjelmassa asetellaan mittausväliksi 30 päivää ja varmistetaan, että spektrin ja aikataason kaikki tiedot tallennetaan. Lopuksi valitaan halutut koneet siinä järjestyksessä, missä ne tullaan mittaamaan. Tämän jälkeen reitti siirretään kannettavaan analysaattoriin.

Yaran reitti mitattiin 14. helmikuuta 2011. Välineinä mittauksessa oli CSI 2130 – analysaattori sekä stroboskooppi, jolla laitteiden oikea pyörimisnopeus tarkastettiin. Tällä varmistettiin mittatulosten oikeellisuus. Mittareitissä olivat mukana kaikki laitteet, jotka oli luotu analysaattorin tietokantaan ennen varsinaista mittausta. Tavoitteena oli saada kaikista laitteista referenssimittaukset, jotta olisi nähty laitteiden sen hetkinen kunto.

Toinen syy kaikkien laitteiden sisällyttämiseen mittareitille oli se, että vähemmän kriittisiä laitteita oli ainoastaan kahdeksan. Toisaalta vähemmän kriittisistä laitteista saa nopeasti rakennettua uuden reitin poimimalla laitteet valmiista tietokannasta.

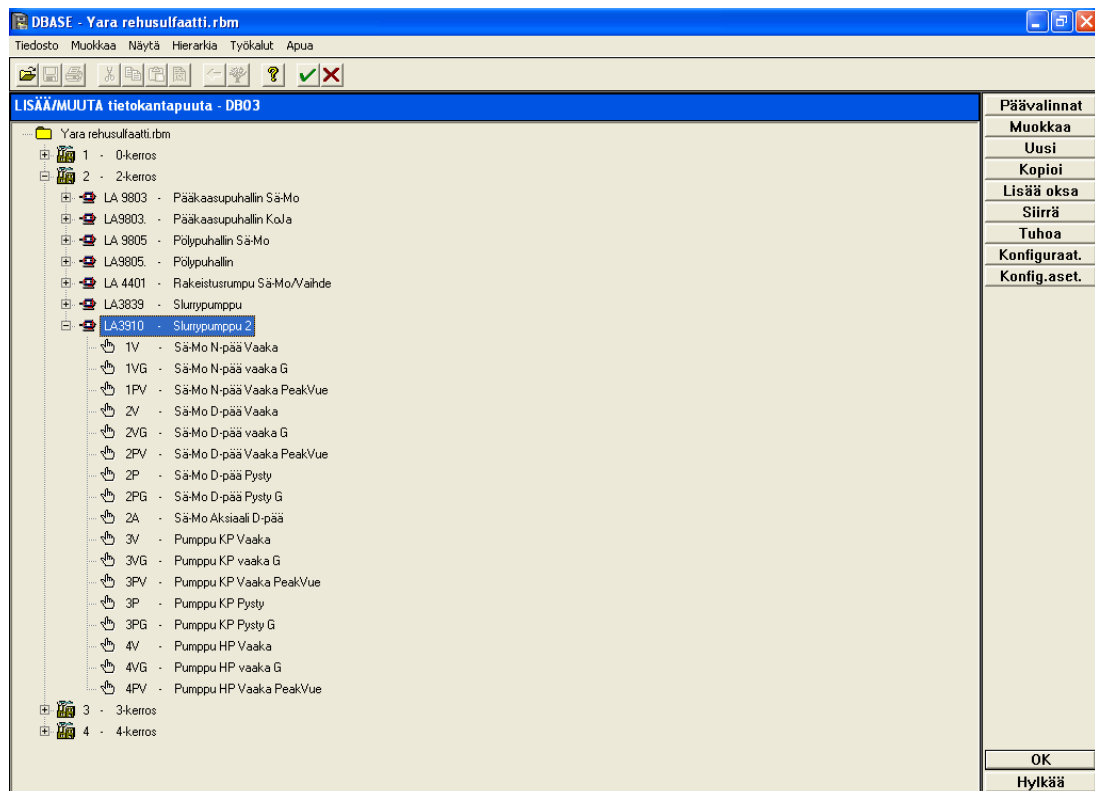
Mittaamisen alussa tarkistettiin laitteen pyörimisnopeus stroboskoopilla. Mittaaminen tapahtui joko moottorin puhaltimen päästä tai moottorin akselin päästä, jolloin kiilaura, tai jokin muu selkeä merkki helpottaa nopeuden määrittystä.

Stroboskooppi on laite, jossa valon sykkimisnopeutta tutkittavan kappaleen pinnalla voidaan säätää, jolloin nopeasti liikkuva kohte näyttää pysähtyvän. Jos stroboskoopin säätää sykimään 1500 kertaa minuutissa ja akseli pyörii 750 kertaa minuutissa, näkyy akselin kiilaura ”kahtena”. Stroboskooppi on erinomainen työkalu tutkittaessa hihnojen, kytkimien ja puhaltimien siipiä, mekaanisia välyksiä sekä kuntoa ja tässä tapauksessa pyörimisnopeuden mittaamisessa.

Saatu pyörimisnopeuslukema syötettiin analysaattoriin ja magneetilla varustettu anturi asetettiin huolellisesti puhdistettuun mittauskohtaan. Painamalla

analysaattorin yläreunassa olevan enter-näppäintä aloitti analysaattori ennalta ohjelmoidun mittauksen. Kun kaikki mittapisteestä tehtävät mittauksen oli tehty, siirrettiin anturi seuraavaan mittapisteeseen ja mitattiin tarvittavat mittaukset. Näin edettiin mittapiste kerrallaan, kunnes kaikki mittaukset oli suoritettu laitteesta.

Seuraavassa kuviossa 23 esitetään mittareitillä ollut moottori-pumppuyhdistelmä. Merkintä 1V tarkoittaa nopeusmittausta pisteestä yksi. Merkintä 1VG tarkoittaa kiihtyvyyden mittausta pisteestä yksi, ja merkintä 1PV tarkoittaa PeakVuen mittausta pisteestä yksi. Pisteiden lopussa oleva Vaaka kertoo mittauksen suunnan. Mittaus oli tehty vaakasuuntaan.



KUVIO 23. Yhden moottori-pumppuyhdistelmän mittaukset

Mittauspisteestä 2 mitattiin nopeus-, kiihtyvyy- ja Peakvue-mittaukset vaakasuuntaan, sekä nopeus- ja kiihtyvyyssmittaus pystysuuntaan. Edelleen tehtiin moottorin akselinsuuntainen nopeusmittaus. Tällä mittauksella tutkitaan kytkintä ja sen linjausta. Pumppu KP tarkoittaa pumpun käyttöpäätä (moottorin puoleinen

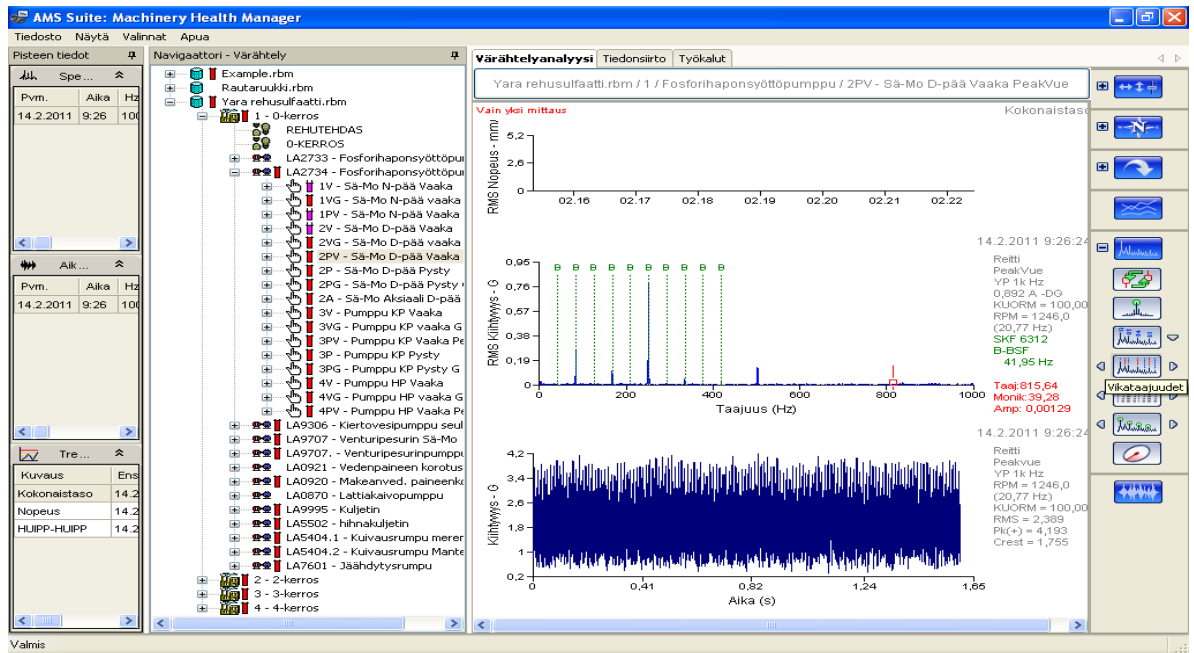
pää). Pumpusta tehtiin samat mittaukset kuin moottorista. Pumppu HP tarkoittaa pumpun huoltopäätä.

Referenssilaitteesta tehtiin yhteensä 17 eri mittausta. Määrä tuntuu aika suurelta, mutta kun kyseessä on referenssimittaus, saatavat tiedot ovat tarpeellisia. Muille reitin laitteille tehtiin vastaavat mittaukset. Jos laite ei ollut käynnissä mittauksen aikana, mittaus jätettiin suorittamatta. Yksi mitattava laite oli niin hankalassa paikassa, että sen mittaaminen ilman suoja-aitojen purkamista oli mahdotonta. Tässä tapauksessa laite jätettiin mittaamatta. Ennalta suunnitellun reitin mittaamiseen kului yksi työpäivä.

## **6.7 Mittausten analysoiminen**

Mittaamisen jälkeen mittatulokset siirrettiin kannettavasta analysaattorista tietokoneelle, jolla analysointi suoritettiin. Mittatulosten analysointiin kului aikaa noin viisi työpäivää. Analysoimisessa keskityttiin erilaisten vikojen hakuun, koska kyseessä ei ollut uusi tehdas ja laitteet olivat olleet käytössä useita vuosia.

Mittatulosten tulkinnessa käytin apuna ammattikorkeakoulun Mobius-materiaaleja (Mobius 2005) sekä PSK 5707 -standardeja, joihin on taulukoitu esimerkein yleisimpiä vikojen ilmenemismuotoja. Mitatuista spektreistä etsin esimerkiksi laakerin ohitustaajuuksia ja niiden kerrannaisia. Kerrannaisten esiintyminen kertoo, että kyseessä on säännöllisesti toistuva ilmiö. Kuviossa 24 fosforihapon syöttöpumpun PeakVue-mittauksessa esiintyvä vierintäelimen vaurio.



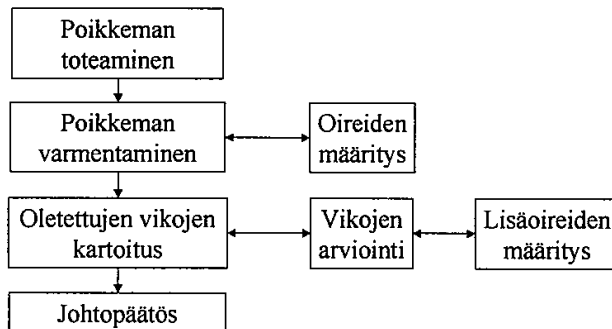
KUVIO 24. Vierintäelimen vika PeakVue-spektrissä

Analysoiminen tehtiin Machine health manager -ohjelman värähtelyanalyysi-osiossa. Kuviossa 24 on nähtävissä nopeuden tehollisarvo, kiihtyvyysspektri ja tässä tapauksessa PeakVue-spektri sekä kiihtyvyys aikatasolla. Jos koneesta olisi tehty useampia nopeuden rms-arvon mittauksia, taulukkoon muodostuisi trendi, joka kertoo nopeuden tehollisarvon muutoksen. Kiihtyvyysspektrissä on nähtävissä laakerin vierintäelimen vikataajuudelle ja sen kerrannaisille osuvat amplitudit.

PSK 5707:n mukaan vian määrittästä tehtäessä käytetään hyväksi myös aistien varaista havainnointia, värähtelymittaustuloksia ja koneen historiatietoja sekä muita mittaustuloksia. Vian määrittäminen käynnistyy, kun laitteen toiminta muuttuu, tai mittatulos havaitaan muutosta. Mittatulos voi ylittää hälytysrajan, joka antaa kunnonvalvonnalle impulssin tehdä lisätutkimuksia laitteesta. (PSK 5707 2004)

Vianmäärittäminen on monivaiheinen tapahtuma. Vikojen syyt eivät aina ole yksiselitteisiä. Jotta vian syyt selviävät, on tulkittava koneen oireiden aiheuttajat. Vian määrittäminen vaikeuttaa samojen oireiden liittyminen useaan eri vikaan. Johtopäätöstä tehtäessä poistetaan epätodennäköiset syyt ja varmistetaan

todennäköiset aiheuttajat. (Mikkonen ym. 2009, 290.) Kuviossa 25 selvitetään vianmäärityksen etenemistä vaiheittain.



KUVIO 25. Vian määrityksen eteneminen (PSK 5707, 2004)

Yleisiä aikatasosignaaleissa havaittavia oireita ovat korkeat iskumaiset huiput, jakson epäsäännöllisyys ja hitaasti tapahtuvat muutokset. Värähtelyspektristä haettavia asioita on esimerkiksi pyörimistaajuuden amplitudi, joka viittaa epätasapainoon, pyörimistaajuuden harmoniset ja aliharmoniset amplitudit, yksittäiset spektrihiiput, toistuvat amplitudiryhmät ja värähtelyn voimakkuus eri mittaussuunnissa. (PSK 5707, 2004.)

## 7 PUHALTIMEN TASAPAINOTUS

Pääkaasupuhaltimen värähtelyn tehollisarvo oli syksyllä 2010 kohonnut hälytysrajalle ja sen yli. Pääkaasupuhallin on liitetty kiinteään värähtelyn ja laakerin lämpötilan valvontaan. Kiinteän järjestelmän on toimittanut SPM, ja värähtelyn tehollisarvot näkyvät valvomon monitoreissa. Yhtenä opinnäytetyön osana oli pääkaasupuhaltimen tasapainotus.

Kaikissa pyörivissä laitteissa on jonkin verran epätasapainoa, valmistusepätarkkuuksien vuoksi. Yleisimpiä epätasapainon syitä ovat epätasainen likaantuminen, epätasainen kuluminen, irronneet tasapainotusmassat, siiven katkeaminen tai palojen irtoaminen. (PSK 5707, 2004.)

Ennen tasapainotusta puhallin oli puhdistettu. Värähtelymittalaitteena käytettiin Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulun CSI 2130- värähtelyanalysointilaitetta. Ennen mittauksen aloitusta, määritettiin akselin nollapiste takometriä varten ja merkittiin sama nollakulma puhaltimen siipeen huoltoluukun kautta. Puhaltimen siipien lukumääräksi varmistettiin 9 kpl. Aiempia tasapainotuspainoja oli eri siipipyörisissä 3 kpl.

Tämän jälkeen huoltoluukku suljettiin ja analysointilaitteeseen asetettiin 1-tason tasapainotuksen vaatimat asetukset. Kiihtyvyyssanturin paikat olivat kaavunpuoleisen laakeripesän horisontaalinen ja vertikaalinen suunta. Vaadituksi hyväksytyksi oli valmistajan tehtaalla määritetty G 2.5. Taulukossa 8 on esitetty sallitut tärinärasitusalueet, hälytysalue ja pysäytysraja. Taulukko 9 esittää värähtelyn nopeuden tehollisarvon ja värähtelyn suunnan asteissa moottorin pyöriessä 469,8 RPM.

TAULUKKO 8. Tärinärasitustaulukko

	luokka III mm/s
Koeajossa sallittu tärinärasitusalue	alle 2,8
Käytössä sallittu tärinärasitusalue	alle 4,5
Hälytysalue	4,5...7,1
Pysäytysraja	11,2

Suoritettiin vertailumittaus nopeudella 469,8 RPM ensin horisontaaliseen suuntaan, sitten vertikaalisesti.

TAULUKKO 9. Nopeuden tehollisarvot

Suunta	RPM	Vrms	Vaihekulma
Horisontaali	469,8	0.0919 mm/s	280,6 astetta
Vertikaali	469,8	0,0284 mm/s	271,4 astetta

Mittausten perusteella ei ollut aihetta tasapainotukseen. Puhaltimen epätasapaino johtui puhaltimen siipien epätasaisesta likaantumisesta. Epätasapaino poistui puhaltimen pesulla.

## 8 TULOKSET JA POHDINTA

Värähtelyanalysointilaitteisto CSI-2130 osoittautui erittäin hyväksi kunnossapidon työvälineeksi. Yara Finlandin rehufosfaattitehtaan laitteista löytyi yllättävän paljon erilaisia vikoja. Tämä johtui osittain siitä, että nyt mitatuista laitteista osa ei ole ollut mittaavan kunnonvalvonnan piirissä tätä aikaisemmin. Yleisimpiä vikoja olivat erilaiset laakeriviat. Helmikuussa tehty mittaus toi esiin 13 eri vikaa, joista 11 oli laakerivikoja, yksi linjausvirhe ja yksi puhaltimen epätasapaino.

Kunnossapidon kehittämisen kannalta värähtelyanalysointilaitteen käyttöön ottaminen kunnonvalvonnassa olisi suotavaa. Analysointilaitteisto soveltuu hyvin vianhakuun, reittimittauksiin, tasapainotuksiin ja käyttöönottotarkastuksiin. Ajoitettujen reittimittausten avulla saadaan selvää tietoa koneen käynninaikaisesta kunnosta ja tarvittavat remontit pystytään ennakoimaan mittaus tulosten perusteella. Tämä tuo taloudellista säästöä laitokselle vähentämällä yllätyksellisiä vikaantumisen aiheuttamia seisokkeja.

Kriittisimmät viat raportoitiin Yaralle välittömästi sähköpostitse niiden selvittyä. Lopullisen raportin vioista lähetin noin kahden viikon kuluttua mittauksen suorituksesta. Raportit lähetin myös opettajilleni, Lauri Hankkilalle ja Raimo Hentelälle, joille suuret kiitokset avusta, hyvistä neuvoista ja tulosten läpikäymisestä.

Opinnäytetyöni osoittautui hyvin laajaksi, ja erilaisia työvaiheita oli paljon. Aluksi selvitettiin laitteiden kriittisyysluokat ja sijainnit tehtaalla. Laitetietoja kootessa oli ongelmia tietojen saamisen kanssa. Kaikkia tietoja ei ollut tehdastietokannassa, luultavasti niitä ei oltu saatu alun alkujaan laitetta hankittaessa. Osan tiedoista sain suoraan valmistajilta, osan kaivoin esille verkosta ja suurimman osan löysin tehdastietokannasta.

Seuraavassa vaiheessa hahmottelimme alustavan reitin laitteineen ja määrittelin mittauspisteiden paikat. Tämän vaiheen valmistuttua opettelin tietokannan ja reitin teon värähtelyanalysointilaitteistoille. Apua tähän löytyi Maintpartnerin kunnonvalvojalta Esa Patolalta ja Kunnox Oy:ltä, joille kiitokset ovat myös paikallaan. Seuraava

vaihe sisälsi mittaamisen ja tulosten analysoinnin. Tähän aikaa kului noin puolitoista viikkoa.

Oman kehittymisen kannalta opinnäytetyö on ollut opettavainen. Mittareitin laadinta kaikkine vaiheineen on opettanut hyvin paljon. Analysoiminen oli hyvin aikaa vievää, mutta samalla äärimmäisen opettavaista.

Nykyaikaisilla mittalaitteilla saadaan paljon tietoa koneiden kunnosta. Tuloksia voisi parantaa luomalla hyvät perusvalmiudet mittaavaan kunnonvalvontaan. Kaikki uudet kriittiset laitteet pitäisi tilata kiinteät mittausnipat valmiiksi asennettuna. Tällä tavoin saataisiin varmuutta mittatulosten oikeellisuuteen. Stroboskooppia kannattaisi käyttää kytkimien kunnan tarkastukseen, hihnojen tarkastukseen sekä mekaanisten välysten hakemiseen. Kaikki tämä onnistuu koneiden käydessä.

Koneiden linjaukseen käytettävien laserlinjauslaitteiden hinnat ovat halventuneet, ja käyttämällä näitä päästään todella pieniin linjausvirheisiin. Lämpökuvauksen hyödyntäminen kunnonvalvonnassa antaa nopean yleiskuvan laitteiden kunnosta. Panostamalla perusasioihin saadaan säästöä jo pikaisella aikajänteellä.

## LÄHTEET

ABB OY. 2000. ABB TTT-käsikirja 2000-7. Kunnonvalvonta ja huolto.

Hentelä, R. 2009. Värähtelymittauksen perusteet. Koulutusmateriaali. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu Tekniikan ja liiketalouden yksikkö.

Järviö, J. 2004. Kunnossapito .2. täydennetty painos. Hamina: KP-media OY.

Kautto, J. Mittaava käynnissäpito seminaarimateriaali. Fortum 2009.

Maintpartner Oy 2010. Yritysinfo. Www-dokumentti. Saatavissa:  
[http://www.maintpartner.fi/maintpartner.asp?luokka\\_id=1&main=1](http://www.maintpartner.fi/maintpartner.asp?luokka_id=1&main=1) .Luettu 12.1.2010.

Mikkonen, H. , Miettinen, J., Leinonen, P., Jantunen, E., Kokko, V., Riutta, E., Sulo, P., Komonen, K., Lumme ,V., Kautto, J., Heinonen, K., Lakka, S. & Mäkeläinen, R. 2009. Teoksessa H.Mikkonen (toim.) Kuntoon perustuva kunnossapito. Käsikirja.1. painos. Kera-va: KP- Media Oy, 2009

Mobius Software P/L. 2005. Koulutusmateriaali. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu.

Nohynek, P., Lumme, V.1996. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 1. painos. Loviisa: KP-Tieto Oy.

PSK 5702. 2007. 3 painos. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittapisteen valinta ja tunnistaminen. PSK Standardisointiyhdistys.

PSK 5704. 2002. 6 painos. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vastaanottotarkastus ja tärinärasitusrajat. PSK Standardisointiyhdistys.

PSK 5705. 2006. 5 painos. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnitelu. PSK Standardisointiyhdistys

PSK 5706. 2002. 3 painos. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Valvontamenetelmät. PSK Standardisointiyhdistys.

PSK 5707. 2004. 4 painos. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmäärittäminen. PSK Standardisointiyhdistys

PSK 6800. 2008. Laitteiden kriittisyysluokittelu teollisuudessa. PSK Standardisointiyhdistys

Seilonen T., Kempainen M. 1996.Värähtelymittaukset Kemira Agro Oy:ssä. Insinööriyö. Kajaanin teknillinen oppilaitos. Konetekniikan osasto.

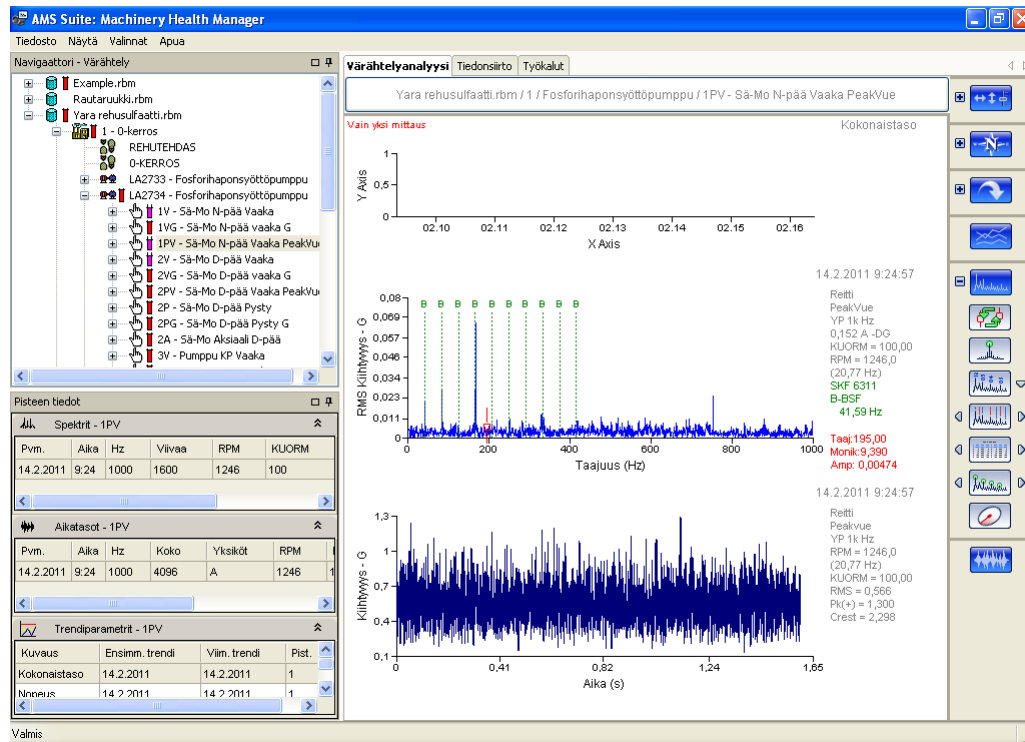
SKF. 2009. Kunnonvalvontakoulu. Luentomateriaali.

Yara Finland 1. 2010. Yritysinfo. Www-dokumentti. Luettu 12.1.2011.Saatavissa:  
[http://www.yara.fi/about/yara\\_in\\_finland/index.aspx](http://www.yara.fi/about/yara_in_finland/index.aspx)

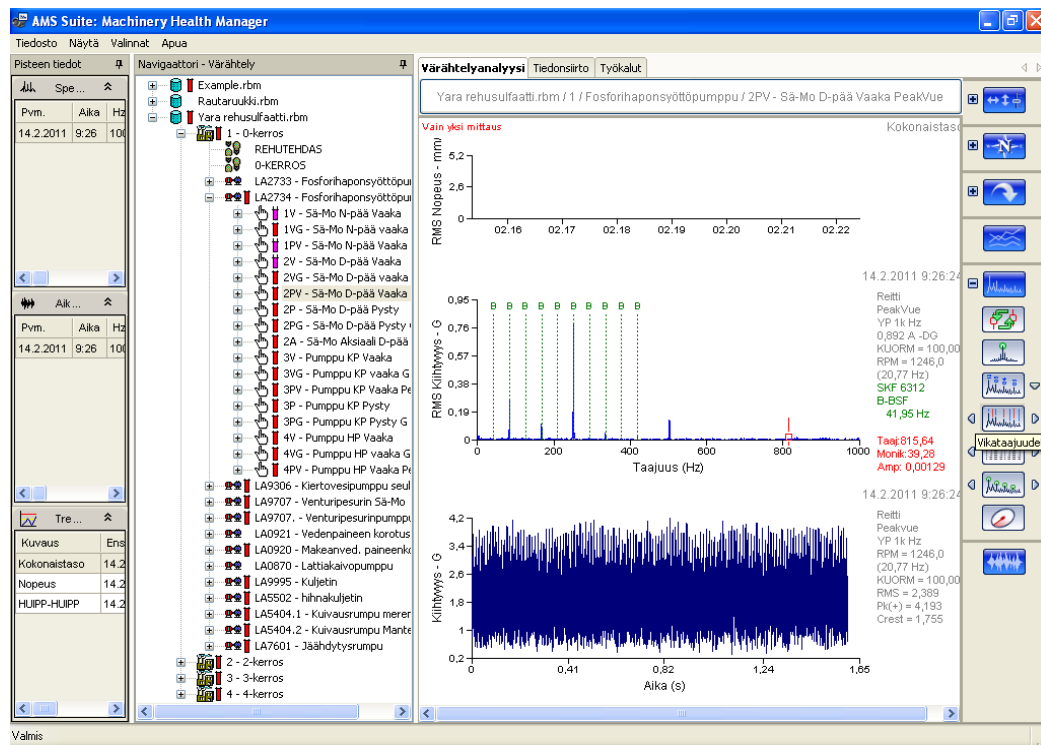
Yara Finland 2. 2010. Yritysinfo. Www-dokumentti. Luettu 12.1.2011. Saatavissa:  
[http://www.yara.fi/about/yara\\_in\\_finland/production\\_sites\\_in\\_finland/kokkola/index.aspx](http://www.yara.fi/about/yara_in_finland/production_sites_in_finland/kokkola/index.aspx)

## **LIITTEET**

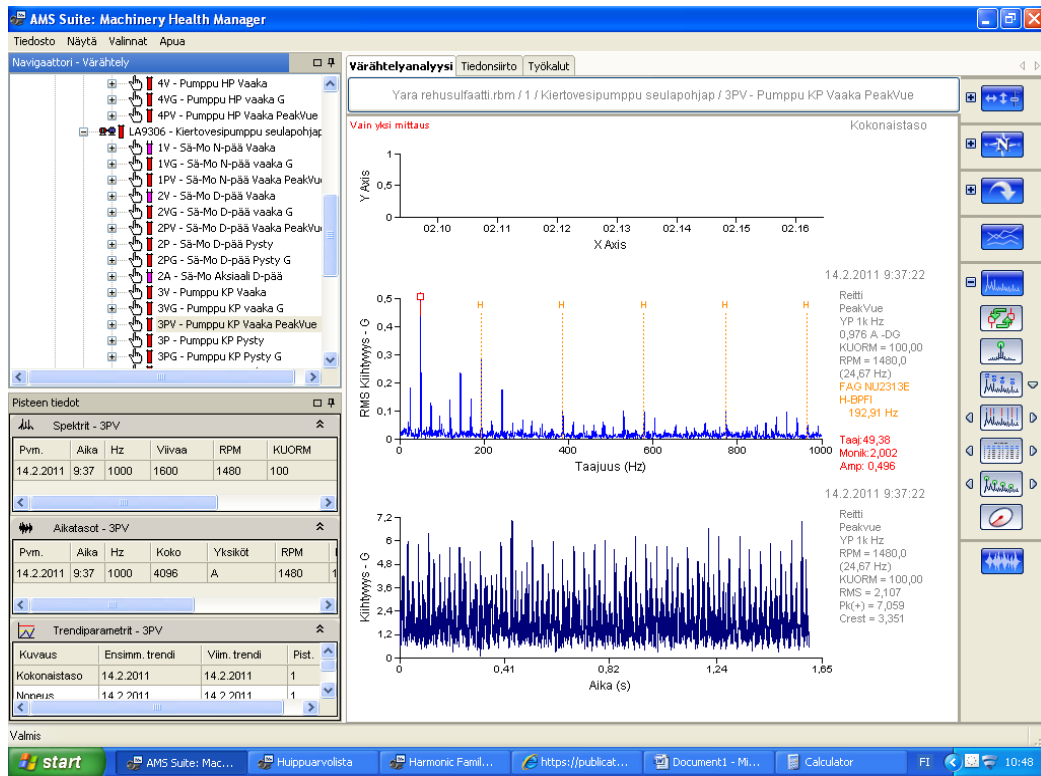
LIITE 1. Värähtelymittausraportti 1/1-9/1



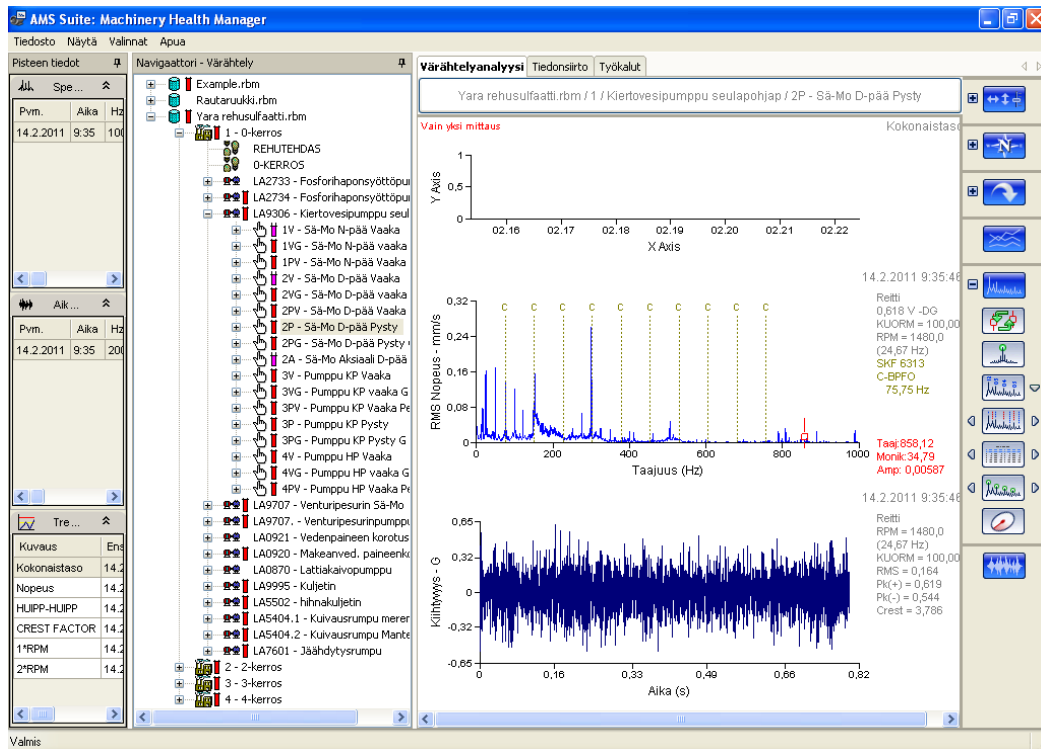
Fosforihappopumppu LA 2734. Moottorin N-pään laakerissa alkava vierintäelimen vika.



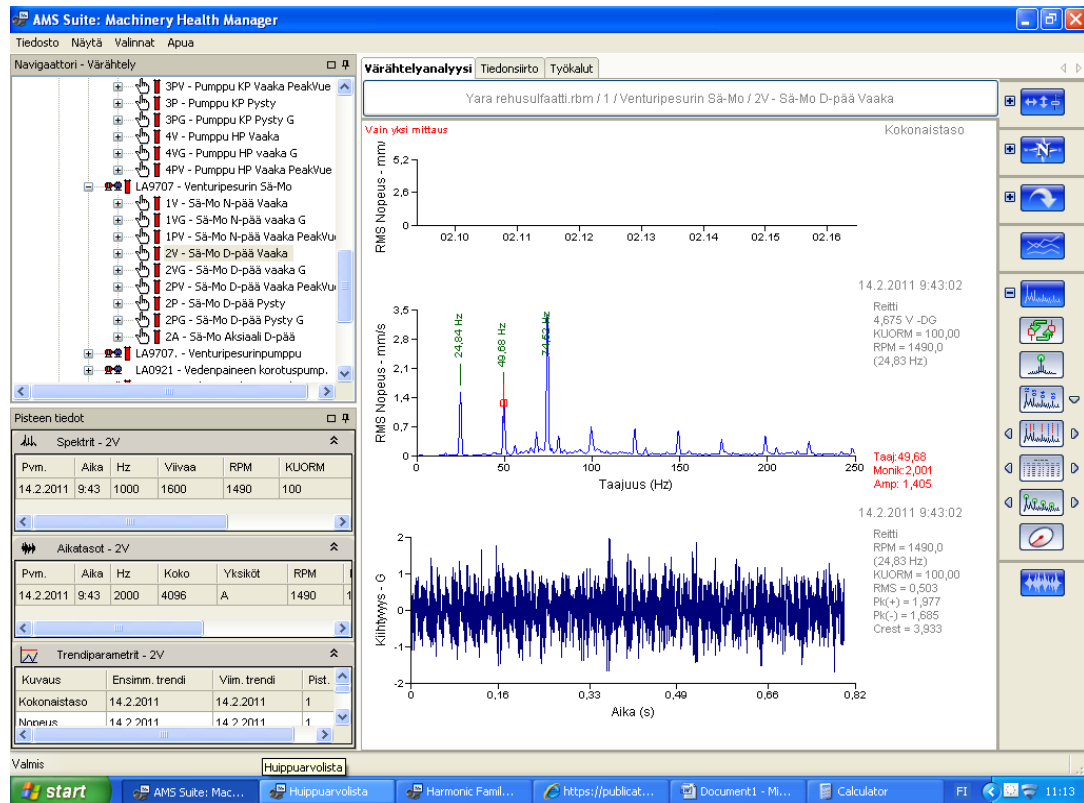
Saman moottorin D-pää. Laakerivika edennyt jo selvästi, vierintäelimen vika



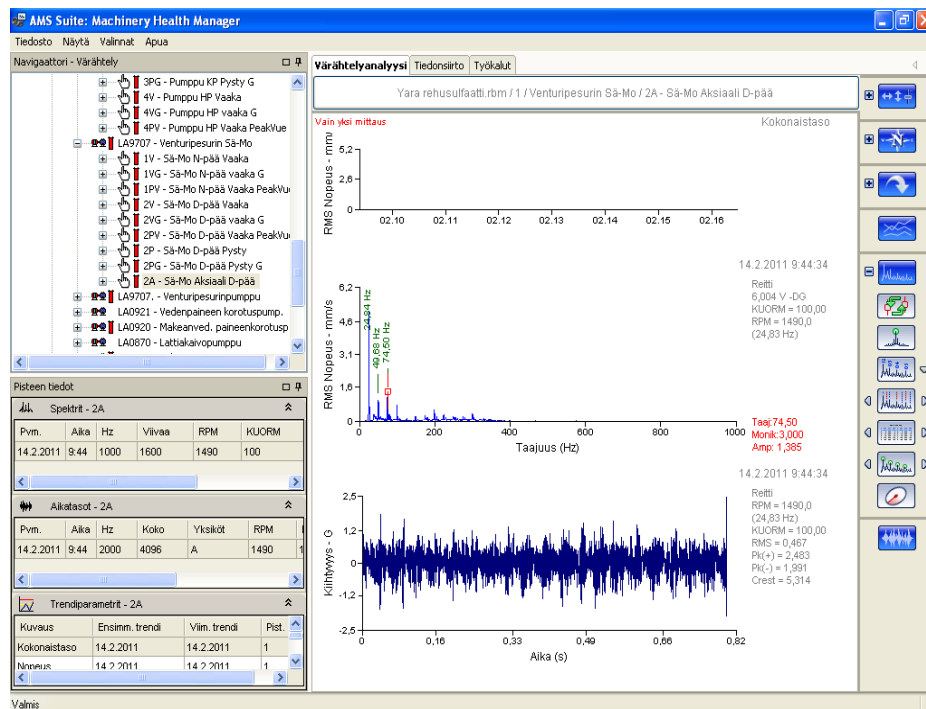
Kiertovesipumppu LA9306, pumpun käyttöpään laakerissa sisäkehän vika



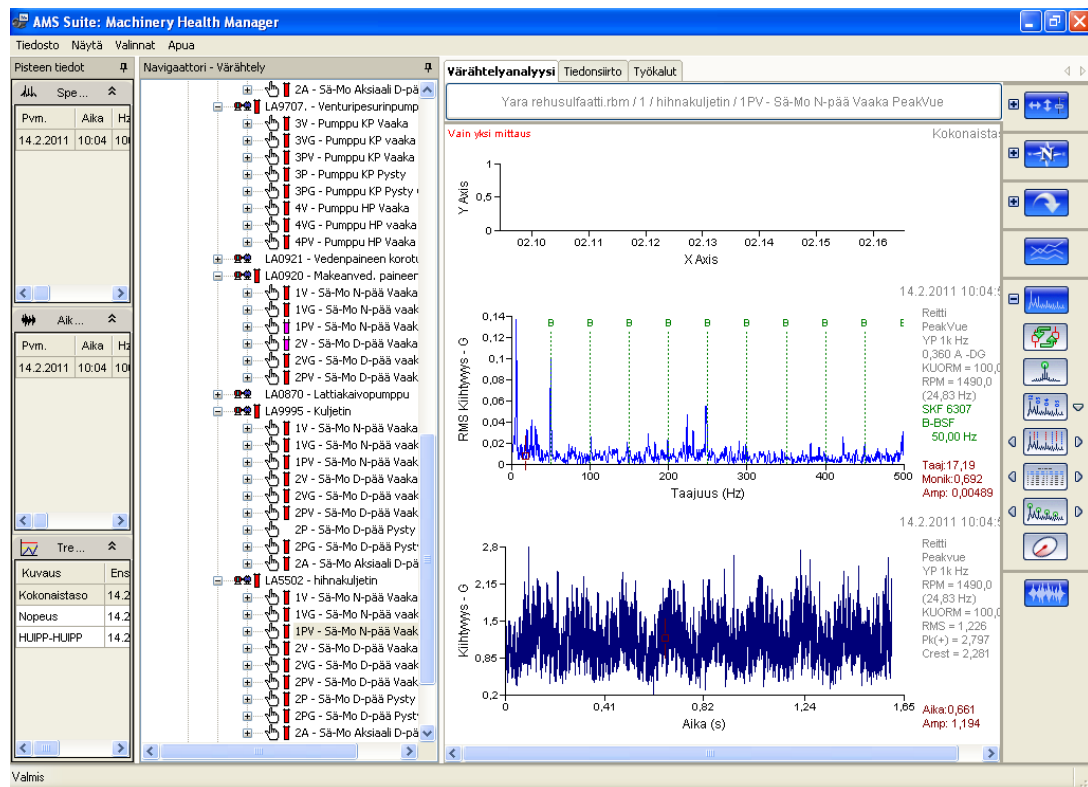
LA9306 kiertovesipumppu, moottorin D-päässä, jo edennyt ulkokehävika



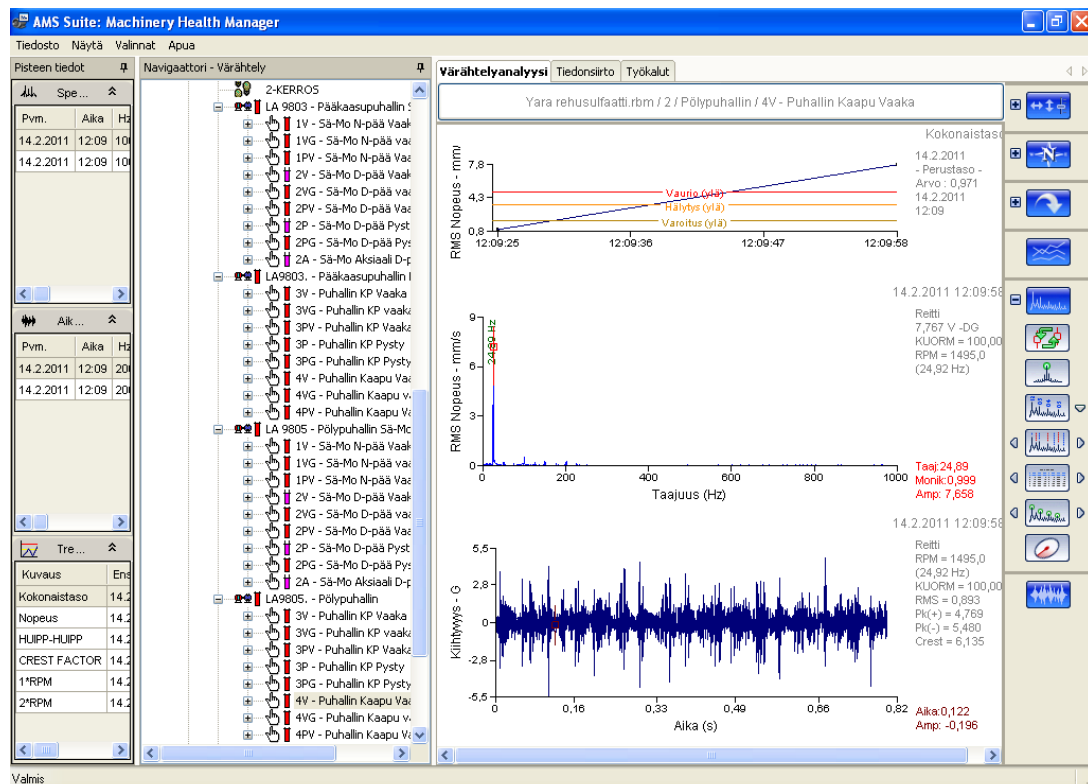
LA9707-venturipesurin sähkömoottorin D-pää viittaa hieman taipuneeseen akseliin, irtonaisuuteen kiinnityksessä (pehmeä tassu) tai lievään linjauvirheeseen.



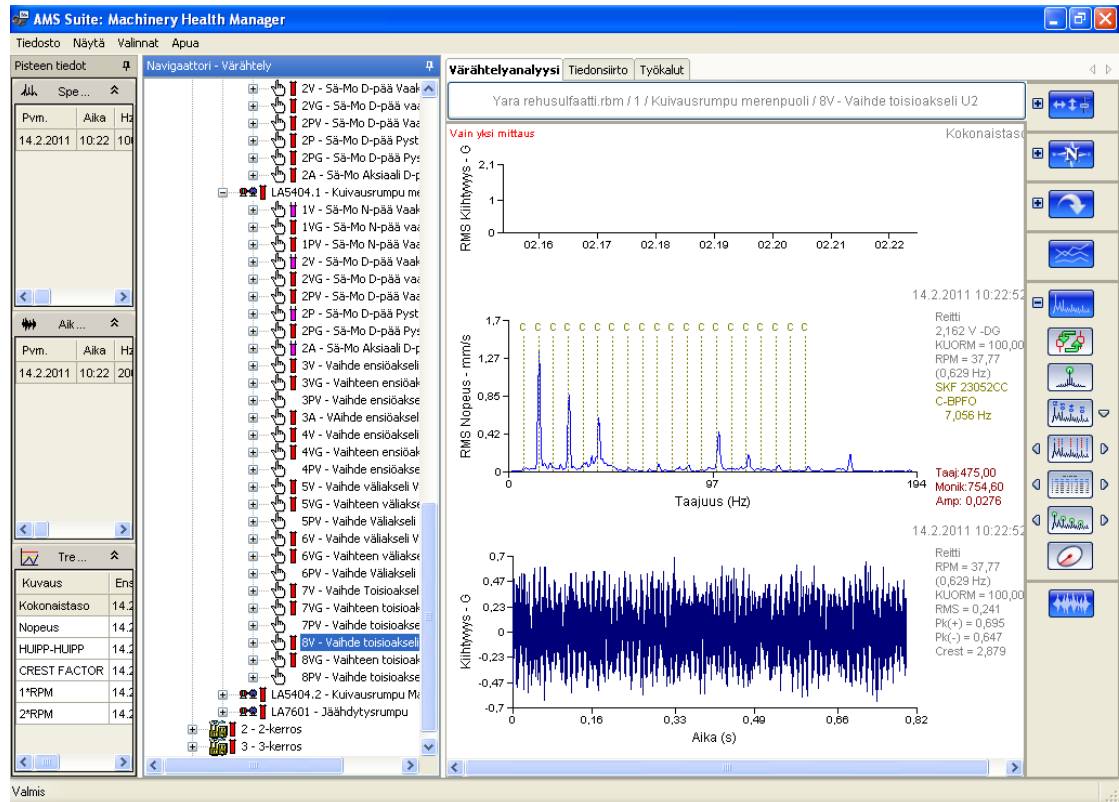
Mittaus samasta moottorista akselisuuntaan, pyörimistaajuuden 1, 2 ja 3 moniker-ta koholla. Akselisuuntainen mittaus vahvistaa lievän kulmittaisen linjauvirheen moottorin ja pumpun välillä.



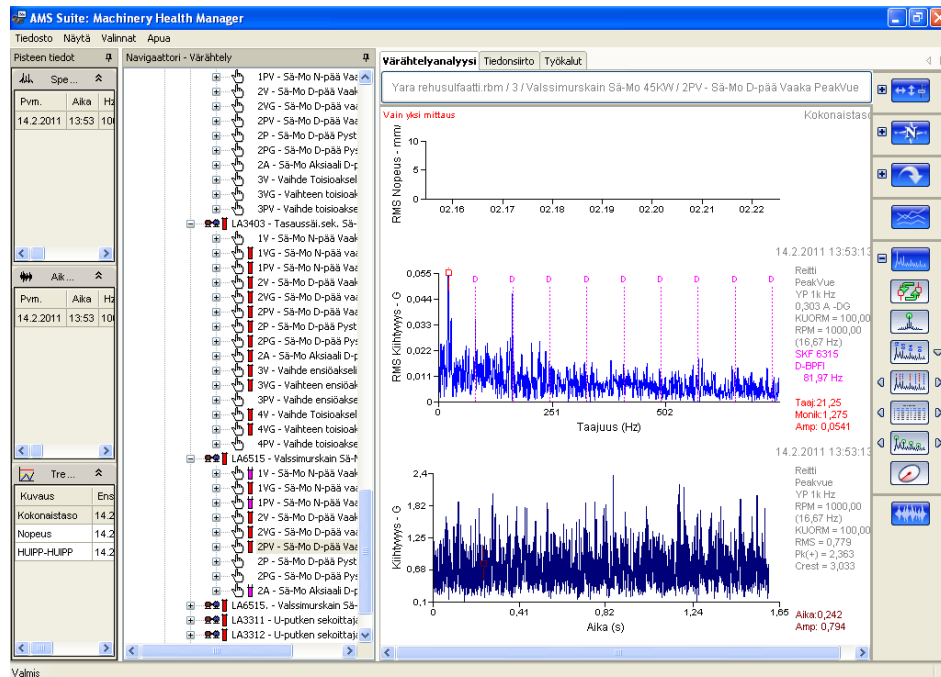
LA502 hihnakuuljetin moottorin N-päässä alkava vierintäelimen vika



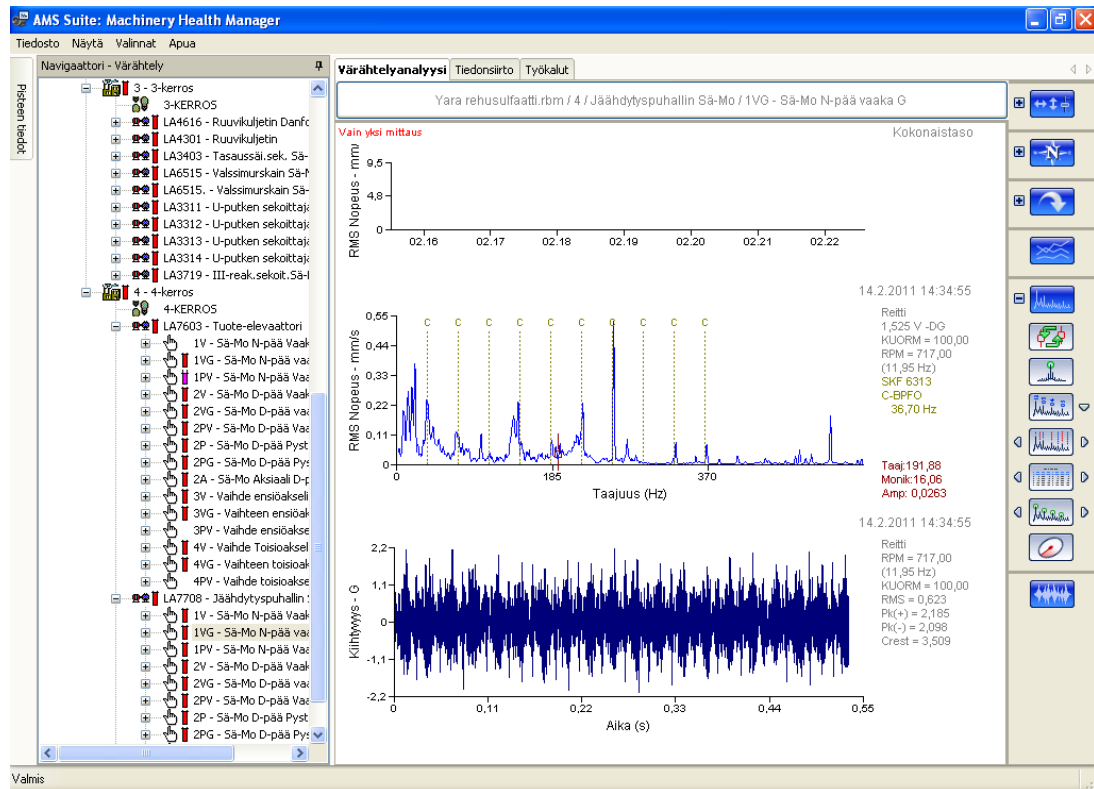
Pölypoistopuhallin LA 9805, mittaus kaavun puoleista laakerista osoittaa korkeaa värähtelyä pyörimistaajuudella, johtuu puhaltimen epätasapainosta, joten suositte-  
len puhaltimen pesua.



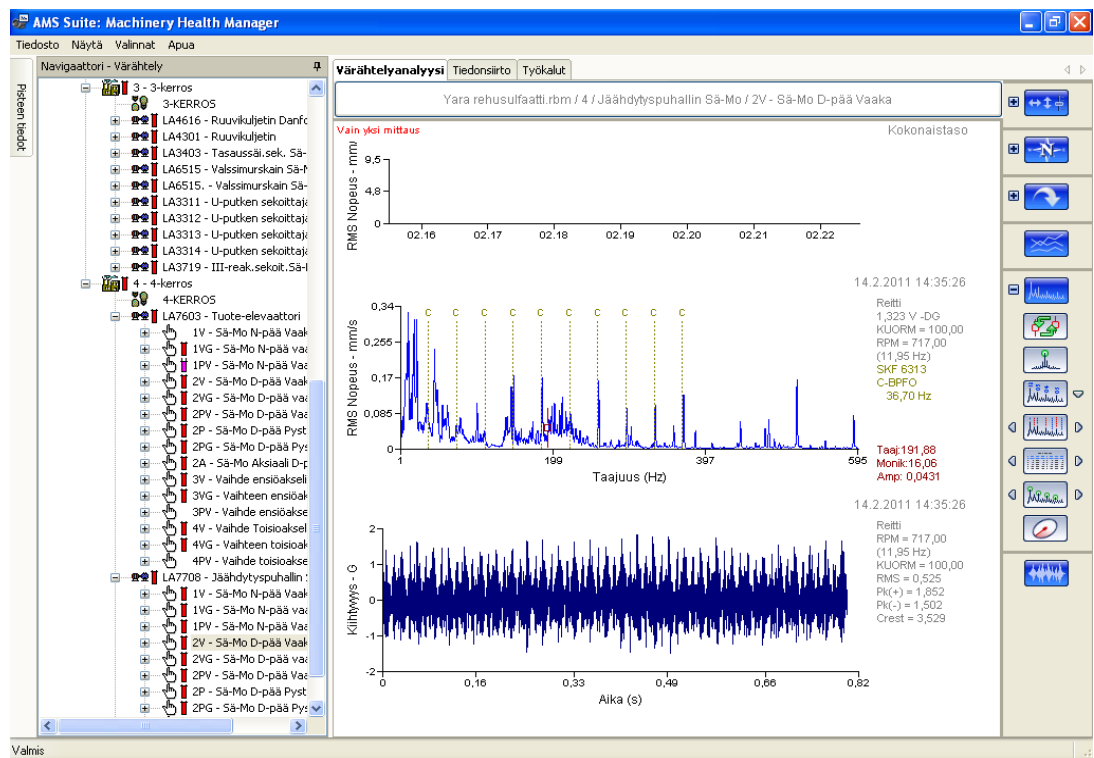
LA5404.1 Merenpuoleisen vaihdelaatikon ulostulon laakerista löytyy ulkokehän vikataajuus, hitaan pyörimisnopeuden vuoksi vika kehittyi hitaasti. Kuukausittain tehtävällä mittauksella päästäisiin kiinni vian etenemiseen, ja huollon ajankohta olisi helpommin määritettävissä mittaustrendin perusteella.



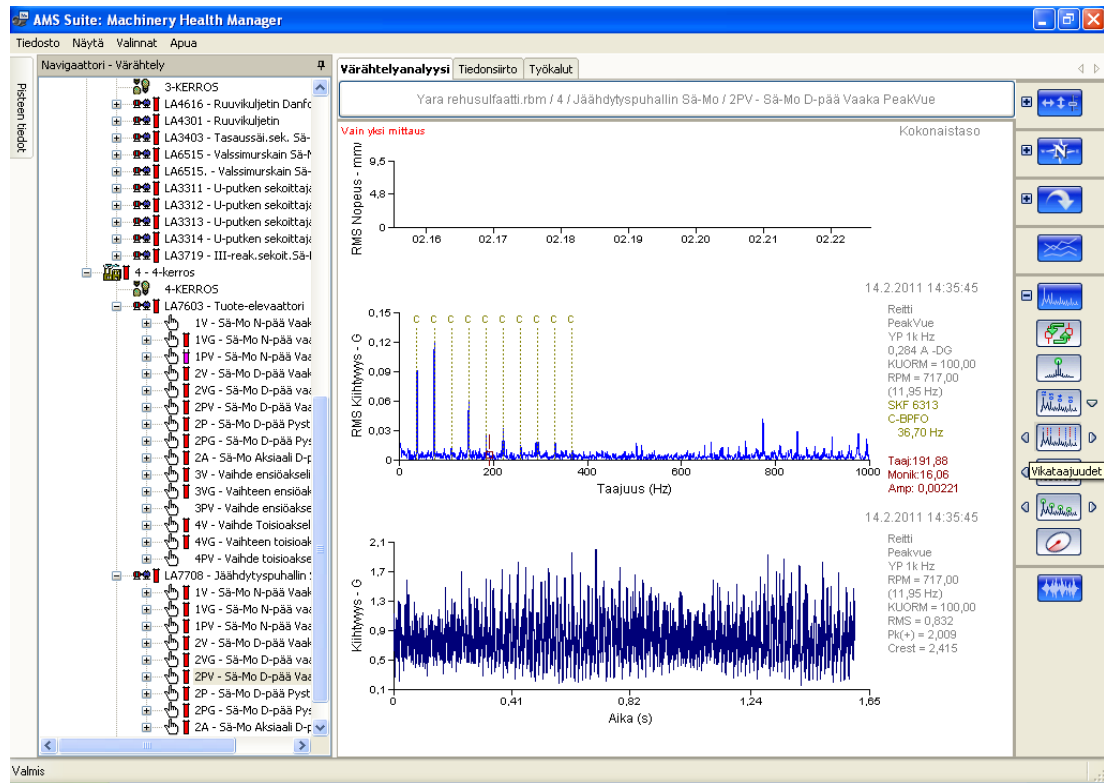
Valssimurskaimen sähkömoottorin D-pään laakerissa alkava sisäkehänvika. Isku-  
piikit hyvin alhaisella tasolla



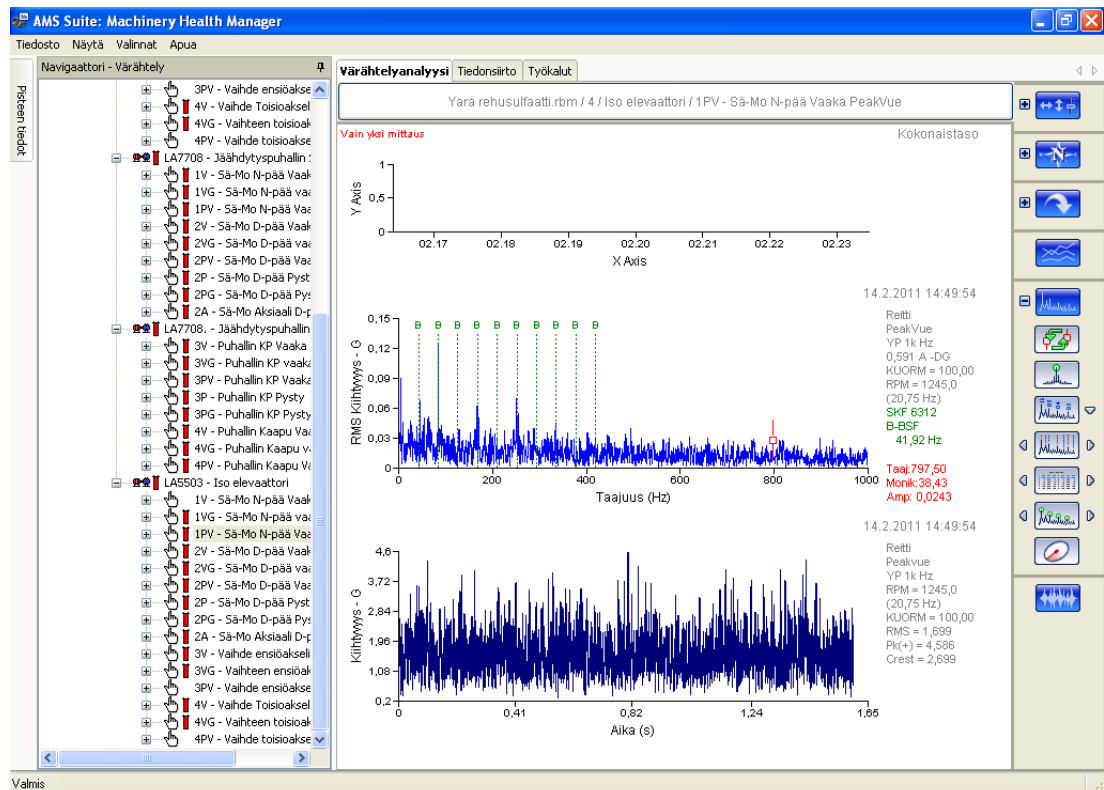
LA7708-jäähdytyspuhallin. Moottorin N-päässä ulkokehän laakerivika. Suosittelem laakerointia.



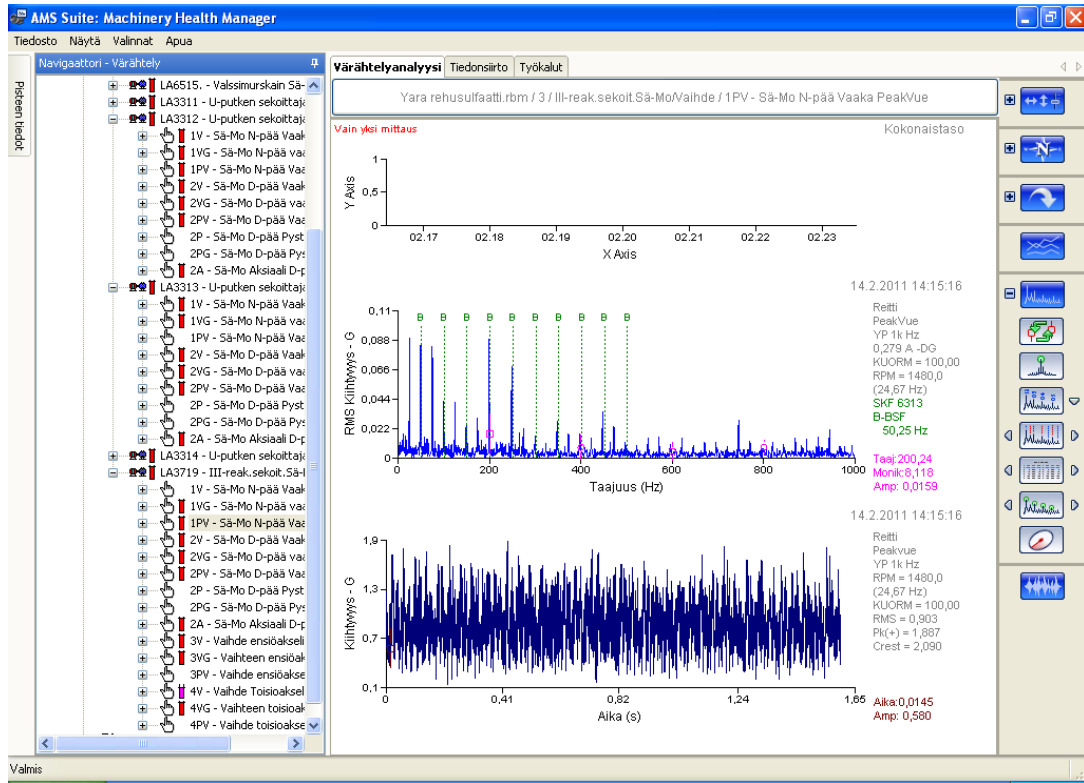
Sama vika moottorin D-päässä



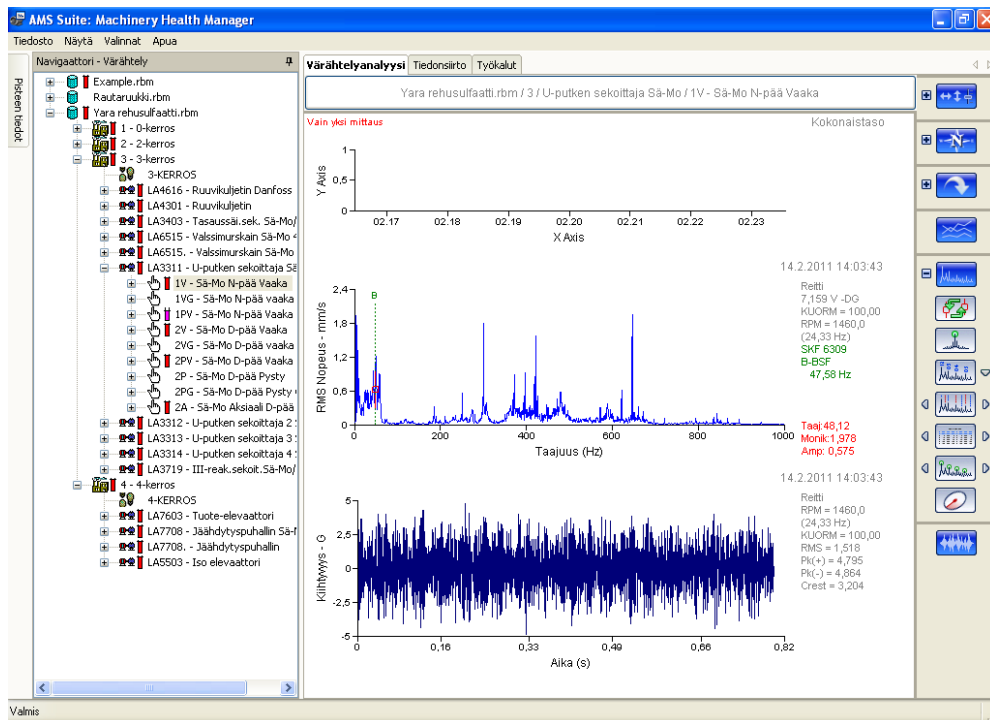
Vielä PeakVue samasta moottorista



LA5503 elevaattori, alkava vierintäelimen vika moottorin N-pään laakerissa



LA3719 reaktorin sekoitin, moottorin N-päässä alkava vierintäelimen vika.



LA3311 U-putken sekoittaja. Sähkömoottorin laakerivika. Suosittelem laakerointia pikaisesti. Tulosta verrattu muihin samankokoisiin moottoreihin kohteessa (3312,3313,3314). Osa spektrin piikeistä voi johtua rakenteesta, pitkä akseli alas säiliöön, jossa sekoittajan lapa mahdollisesti vaurioitunut.

## Yhteenveto

- CSI2130-analysaattori paljasti yllättävän paljon alkavia vikoja. Osa selittyy sillä, että kaikki laitteet eivät ole olleet ennakoivan SPM -mittauksen piirissä (vaihdelaatikot ja useita moottoreita).
- Toinen asiaan vaikuttava seikka oli nopeuksien tarkka mittaus mittauksen yhteydessä sekä laakeritietojen oikeellisuus.

## Mittareiltä mitattiin:

- Värähtely nopeuden suhteen
- Värähtely kiihtyvyyden suhteen
- Sekä PeakVue, joka mittaa korkeimmat spektrin huiput 40 kHz:iin saakka. Laakeriviat esiintyvät ensimmäisenä korkeilla taajuuksilla.
- Jatkon kannalta olisi järkevää suorittaa mittaukset kuukausittain, jotta laitteiden vikaantumista voisi seurata trendeistä. Näin huollon tarve voitaisiin jaksottaa tilanteen mukaiseksi.
- Mittauksia oli kaikkiaan lähes 500

## Löytyneet viat:

- LA 2734 moottorin N-pää vierintäelimen laakerivika
- LA 2374 moottorin D-pää sama
- LA9306 moottori laakerivika
- LA9306 pumppu laakerivika
- LA9707 linjausvirhe
- LA5502 alkava vierintäelimen vika
- LA9805 epätasapainoa
- LA5404 vaihdelaatikon ulostulon laakerivika
- LA6515 moottorin alkava laakerivika
- LA7708 moottorin molemmat laakerit
- LA5503 moottorin alkava laakerivika
- LA3719 laakerivika moottorin N-pää
- LA3311 pitkälle kehittynyt laakerivika