

Alexi Honko

**VÄRÄHTELYANALYYSI JA KUNTOKARTOITUKSEN ROOLI ENNAKOIVASSA  
HUOLLOSSA**

# VÄRÄHTELYANALYYSI JA KUNTOKARTOITUKSEN ROOLI ENNAKOIVASSA HUOLLOSSA

Aleksi Honko  
Opinnäytetyö  
Kevät 2021  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-  
ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma, automaatiotekniikan suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Aleksi Honko

Opinnäytetyön nimi: Värähtelyanalyysi ja kuntokartoituksen rooli ennakoivassa huollossa

Työn ohjaaja: Satu Vähänikkilä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2021.

Sivumäärä: 36 + 1 liite

---

Täysin uuteen mittauskohteeseen, josta ei ole aiempaa värähtelydataa, tehdään alustava kuntokartoitus hyödyntämällä kannettavaa värähtelymittauslaitteistoa. Tavoitteena on muodostaa saadusta datasta johtopäätösraportti. Kohteena työssä on kaksi moottoria ja kaksi pumppua, joista ei ole aiempaa värähtelymittausdataa. Kohteessa ei myöskään ole kiinteää mittausjärjestelmää. Tämä tarkoittaa, että mittaustuloksia voidaan vertailla vain keskenään.

Mittauksessa käytetty laitteisto on Valmetin Maintenance Pad -mittaus- ja analysointilaitte, ja anturina käytettiin Valmetin WVS-100-värähtelymittausanturia. Tehdyistä mittauksista saatu data esitetään aikatasoesityksenä, spektreinä, sekä verhokäyräspektreinä. Mitattua dataa analysoidaan käyttämällä PSK-standardeja, alan kirjallisuutta ja ammattilaiskonsultointia. Mittausten perusteella laadittiin johtopäätösraportti laitteiston kunnosta ja annettiin jatkotoimenpide-ehdotuksia.

Tulosten perusteella moottorit vaikuttavat olevan kunnossa, mutta pumppuihin ehdotetaan huoltoa ja jatkotutkimusta lisääntyneen värähtelyn vuoksi, sekä suositellaan tehostettua kunnonvalvontaa ja lisämittauksia.

---

Asiasanat: kunnonvalvonta, värähtely, mittaustekniikka, ennakoiva huolto.

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering, Option of automation technology

---

Author: Aleksi Honko

Title of thesis: Vibration analysis and the role of condition surveys in predictive maintenance

Supervisor: Satu Vähänikkilä

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2021.

Number of pages: 36 + 1 appendix

---

Objective of the thesis is to do a vibration analysis and a maintenance survey to a target without previous vibration history data. Then, formulate a conclusion report from the data. In this work two motors and two pumps will be measured. There is no existing fixed measurement system.

The measurement device is a Valmet Maintenance Pad, and the sensor is the WVS-100, also manufactured by Valmet. The measured data will be presented as a function of time, spectra, and envelope spectra. Analysis will be conducted using PSK-standards, field literature and professional guidance. A conclusion report was formed from the analyzed data, and overall health of the machines, with further recommendations for future follow-up maintenance and condition monitoring.

It could be deduced from the results that the motors seem to be in good shape, however the pumps might need more frequent checkups. More measurements and increased condition monitoring was recommended.

---

Keywords: Condition monitoring, vibration, measurement technology, predictive maintenance.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	MITTAUSKOHDDE .....	7
3	VÄRÄHTELYMITTAUS KUNNONVALVONNAN JA ENNAKOIVAN HUOLLON TYÖKALUNA.....	10
3.1	Mittausjärjestelmien luokittelu.....	10
3.2	Värähtelymittausten hyödyt ja kustannukset .....	11
4	MITTAUKSEN VALMISTELU .....	13
4.1	Mittaussuunnitelma .....	13
4.2	Mittalaite .....	16
4.3	Valmet Maintenance Pad .....	17
5	VÄRÄHTELYMITTAUKSEN TEORIAA.....	21
5.1	MEMS ja pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi.....	21
5.2	Käytettävät valvontamenetelmät .....	23
6	MITTAUSTAPAHTUMA.....	27
7	MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI .....	28
8	YHTEENVETO .....	33
	LÄHTEET.....	34
	LIITTEET .....	37

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on suorittaa yleinen kuntokartoitus kahteen moottoriin ja pumppuun käyttämällä kannettavaa Valmet Maintenance Pad -mittaus- ja analysointilaitetta sekä muodostaa tuloksista johtopäätösraportti. Värähtelymittaus suoritetaan Valmetin langattomalla WVS-100-värähtelymittausanturilla. Kuntokartoituksilla voidaan muodostaa yleinen kuva laitteiden kunnosta ja arvioida lisätoimenpiteiden tarpeellisuutta. Dataa kerätään värähtelymittauksen avulla, koska se mahdollistaa laitteiden tutkimisen käynnin aikana ilman laitteiden purkamista. Tämä on työhön sopiva mittaustapa, koska mittaus tehdään aktiivisessa käytössä oleviin tuotannon laitteisiin.

Analyysin tueksi lähteinä käytetään kohteesta saatuja laitetietoja, värähtelymittaukseen ja prosessiteollisuuden kuntokartoitukseen sopivia PSK-standardeja sekä ulkopuolista ammattilaisohjeistusta. Opinnäytetyön tarkoituksena on saada käytännön kokemusta kunnossapidon mittauksista ja niihin liittyvistä standardeista ja käytännöistä.

Lähtökohtana oli, että kohteeseen, johon ei aiemmin ollut tehty värähtelymittausta, tehtäisiin alustava kuntokartoitus, jotta huollon tarve voitaisiin määrittää. Mitattua dataa analysoidaan PSK-standardien mukaisesti ja luotujen päätelmien perusteella tehdään ehdotuksia jatkotoimenpiteistä ja huolloista.

## 2 MITTAUSKOHDE

Hydnum Oy on Muhoksella sijaitseva yritys, joka erikoistuu hyötyajoneuvojen ja työkoneiden korkealuokkaisten akustisten sisustusmattojen valmistamiseen (1, Etusivu). Tuotantoprosessi on mittauksen aikana jatkuvassa käytössä, ja mitattava prosessinosa on tuotannolle kriittinen. Mittauksessa keskitytään kahteen moottoriin ja pumppuun prosessin mäntähydrauliikassa.

Kohteena työssä ovat mäntähydrauliikan moottorit M03 ja M04 (kuvat 1, 2 ja 3) sekä kaksi pumpua M03.TH ja M04.TH (kuvat 4 ja 5).



*KUVA 1. M03 moottorin arvokilpi*

Asea Motorsin valmistamat moottorit ovat molemmat teholtaan 55 kW. Moottorien jännite on 380 V, virta 110 A ja tehokerroin 0,83. Moottorien pyörimisnopeus on 1480 r/min ja suojausluokka IP54. (2, s. 1.) Moottoreille ei ole aiemmin tehty värähtelymittausta tai kuntokartoitusta, joten tuloksia ei ole mahdollista verrata samankaltaisen kohteen objektiivisesti moitteettomaan käyntiin. Molemmat moottorit ja pumput ovat kuitenkin lähtötiedoiltaan keskenään samanlaisia, joten kohteita voitiin vertailla keskenään.



KUVA 2. M04 moottorin arvokilpi



KUVA 3. M03 moottorin laakereiden huoltotiedot

Pumput (kuvat 4 ja 5) ovat Rexrothin aksiaalimäntäpumppeja mallia L A10VSO100 DFR1/31 R-PPA12N00. Pumppujen nimellispaine on 280 baaria, enimmäispaine 350 baaria ja pyörimisnopeus 1500 r/min. Lähtötietoina mittauksessa tiedetään, että moottorit on otettu käyttöön 8/2017 tehdyn kunnostuksen jälkeen. Moottori M04 (kuva 2) käytettiin tuolloin huollossa ja laakeroititiin. Kyseistä hiljattain huollettua moottoria on käytetty päämoottorina prosessissa. Moottori M03 on käämitty ja

laakeroitu kunnostuksessa vuonna 2010 (kuva 3), jonka jälkeen se on toiminut varamoottorina vuoteen 2017 asti. Moottoreita huolletaan ja laakerit rasvataan 3 kk välein. Moottorien D- ja N-laakerit ovat molemmat tyyppiä 6214 C3. (2, s. 1.)



KUVA 4. M03.TH pumpun arvokilpi



KUVA 5. M04.TH pumpun arvokilpi

### **3 VÄRÄHTELYMITTAUS KUNNONVALVONNAN JA ENNAKOIVAN HUOLLON TYÖKALUNA**

Ennakoiva huolto, tai joissain lähteissä ennakoiva kunnossapito, pyrkii ratkaisemaan koneiden, laitteiden ja prosessien vikaantumisia ennen konkreettista hajoamista. Tällöin koneita ei tarvitse korvata yhtä usein, ja suunnittelemattomia seisokkeja tuotannossa pystytään vähentämään. Tämä puolestaan lisää tuotannon tehokkuutta ja turvallisuutta, vähentää huoltokuluja ja nostaa prosessin tuottavuutta.

Kunnonvalvonta on ennakoivan huollon alalaji, jossa hyödynnetään mitattua dataa parannusten ja ratkaisujen tekemiseksi (3, s. 2). Värähtelymittaus on ennakoivaa huoltoa, ja tarkemmin luokiteltuna kunnonvalvontaa. Värähtelymittausta käytetään, koska normaalinkin käynnin aikana lukuisat teollisuuden koneet luovat ympärilleen tärinää. Muutokset koneiden tärinässä voivat olla hyvä indikaattori kulumisesta tai vikaantumisesta. Pahimmassa tapauksessa voimakkaan värähtelyn kantautuessa ympäristöön ja muihin laitteisiin myös ympäröivien koneiden vikaantuminen kiihtyy (4, s. 52). Värähtelyanalyysi pyrkii mittaamaan ja arvioimaan värähtelyä käyttämällä mittalaitteita sen havaitsemiseen. Värähtelyanalyysistä saatujen tulosten perusteella voidaan tehdä päätöksiä huolloista ja vaurioihin pystytään puuttamaan ajoissa. Kun laitteelle tyypillinen värähtely tunnetaan, voidaan sitä vertailla myöhempisiin mittauksiin. Tämän avulla laitteiden käyttöikä ja suorituskyky voidaan valvoa ja arvioida.

#### **3.1 Mittausjärjestelmien luokittelu**

Valvontaan on kehitetty useita erilaisia järjestelmiä sopimaan erilaisille mitattaville kohteille. Tässä ne luokitellaan PSK-standardin 5705 mukaisesti kolmeen ryhmään:

1. Kiinteät järjestelmät
2. Puolikiinteät järjestelmät
3. Kannettavat mittauslaitteet. (5, s. 6.)

Kiinteät järjestelmät sopivat parhaiten laitteille, joissa vikaantumisnopeus on suuri, kuormitus vaihtelevaa tai mittausväli lyhyitä. Tällöin dataa saadaan kerättyä juuri silloin, kun sitä halutaan. Jatkuvat toimiset järjestelmät sopivat PSK standardin 5705 mukaisesti nopeasti vikaantuviin laitteisiin kuten turbiineihin, kompressoreihin ja generaattoreihin. (5, s. 7.) Nopeasti vikaantuvat laitteet vaativat jatkuvaa valvontaa, jos huolto- ja korjauskustannuksissa halutaan säästää. Kohteessa tuleekin punnita kiinteän järjestelmän hankinnan kuluja ja ennakoivalla huollolla luotua säästöä, mikä on hyvin prosessikohtaista.

Puolikiinteät järjestelmät sopivat hyvin vaikeasti luokse päästäviin laitteisiin. Ne asennetaan mittauspisteisiin ja johdotetaan laitteen luota siten, että mittaus voidaan suorittaa muualta esimerkiksi kannettavalla laitteella. Kannettavat järjestelmät sopivat standardin mukaan hitaasti vikaantuville laitteille, kertaluontoisiin mittauksiin ja täydentämään muuta mittausdataa. (5, s. 7.) Tässä työssä käytetään kannettavaa järjestelmää kertaluontoisen kuntokartoituksen muodostamiseksi. Kohteessa ei itsessään ole kiinteää järjestelmää, joten kannettava järjestelmä oli suoraviivaisin tapa kerätä värähtelydataa.

Mittausjärjestelmien valitseminen perustuu mitattavan kohteen ominaisuuksiin. Kriittiset kohteet vaativat enemmän valvontaa kuin prosessille ei-kriittiset kohteet. Esimerkiksi laite, joka saattaa vikaantuessaan pysäyttää tuotannon kokonaan, on kriittisempi kuin laite, joka ei vaikuta toimintaan lainkaan tai vain hidastaa sitä. (5, s. 6.) Kaikki tuotannon laitteet kattavaa valvontaa harjoitetaan käytännössä harvoin.

### **3.2 Värähtelymittausten hyödyt ja kustannukset**

Kuten muissakin kunnossapidon osa-alueissa, värähtelymittauksesta saatavien konkreettisten tuottojen realisoiminen voi olla haastavaa. Tämä johtuu siitä, että kunnossapidon kannattavuutta on vaikea tarkastella suorilla taloudellisilla laskelmilla (6, s. 42). Heikki Aalto toteaa kirjassaan Kunnossapitotekniikan Perusteet, että kunnossapidon hyödyt on helpointa hahmottaa tuotannon lisäarvosta saatuna tuottona: "Kyseessä on investointiprojekti, jossa panoksina ovat investoinnit kunnossapidon laitteisiin, järjestelmiin ja koulutukseen sekä tuottoina samoilla tuotantopanoksilla saatava kasvanut tuotanto." (6, s. 46.) Hyötyjen realisoitumiseen kuluu aikaa, eikä niiden vaikutus ole aina välittömästi havaittavissa.

Kuinka nämä hyödyt sitten toteutuvat kertaluontoisissa ja suppeammissa värähtelyanalyysissä? Kertaluontoisissa mittauksissa välittömät kustannukset ovat suhteellisen pieniä, eikä niihin liity yrityksen puolesta maksettavia koulutuskuluja, jos analyysi suoritetaan alihankintana. Spekuloisin vielä, että kertaluontoisia mittauksia tuotannon kriittisiin kohteisiin tehdään pääasiassa alihankintana, koska tuotannon omalla kunnonvalvonnalla ei ole syytä tehdä kertaluontoisia mittauksia kohteeseen, jossa mahdollisuus kiinteämpiin järjestelmiin on olemassa. Kynnys mittauksille on siis matalampi, eivätkä mittaukset vaadi sitoutumista uuteen kunnonvalvontasuunnitelmaan.

PSK 6202:n mukaan kuntokartoituksen tehtävänä on saada puolueeton kokonaiskuva kohteesta ja selvittää merkittävimmät korjaustarpeet ja toimenpiteet (7, s. 3). Kuntokartoitus kertoo kohteen kunnon ja mahdollisen toiminta-ajan, mutta sen lisäksi kertaluontoiset mittaukset voivat myös olla hyviä tilaisuuksia kerätä perusteluja jo olemassa olevaan kunnonvalvontaan tehtävistä parannuksista. Analyysillä voidaan auttaa havaitsemaan ja konkretisoimaan kustannuksia, jotka voisivat olla paremmin hallittavissa aktiivisemmalla kunnonvalvonnalla tai kiinteällä järjestelmällä. Aikaisessa vaiheessa havaitut vikaantumiset ovat aina halvempia korjata kuin kokonaisen koneen korvaaminen. Kertaluontoiset mittaukset voivat siis olla hyvä työkalu, kun halutaan selvittää, mitkä prosessin osat vaativat kattavampaa kunnonvalvontaa. Tämän kautta pystytään tekemään parempia päätöksiä tulevaisuuden kunnossapidon kannalta ja paremmin valjastamaan kunnossapidosta saatavia hyötyjä.

## 4 MITTAUKSEN VALMISTELU

Opinnäytetyön tavoitteena on suorittaa yleinen kuntokartoitus kohteeseen. Lähtökohtaisesti kartoitus tulee olemaan suppea mittauksen kertaluontoisuuden vuoksi. Kattavampaan kartoitukseen tarvittaisiin lisää dataa, mutta sellainen ei kuulunut työn tavoitteisiin. Lopulliseen raportointiin käytetään PSK Standardin 5705 Johtopäätösraporttipohjaa (5, s. 16).

Nopea kuntokartoitus on pikainen yleiskatsaus tutkittavasta laitteesta, ja antaa suuntaa mahdollisiin jatkotoimenpiteisiin. Normaalisti ennakoivan huollon toimenpiteisiin kuuluu pitkäaikaisempi ja toistuva mittausaikataulu, jolla saadaan luotua kattavampaa dataa tutkittavasta laitteesta. Nopea kuntokartoitus ei välttämättä pysty paljastamaan piileviä vikoja laitteessa, mutta se on hyvä työkalu, jolla tunnistetaan laitteiden käytettävyyttä lähitulevaisuudessa.

### 4.1 Mittaussuunnitelma

Vaikka kyseinen mittaus itsessään on suhteellisen nopea, eikä reitti sisällä useita mittauspisteitä, on silti hyvä valmistautua ja selvittää mahdollisimman paljon tapahtumasta etukäteen. Mittaustoimenpiteen suunnitteluun käytettiin avuksi PSK standardia 5707. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. Valvontamenetelmänä mittauksessa käytetään aikataso-, spektri- ja verhokäyrävalvontaa. Maintenance Pad -laitteisto mahdollistaa myös STA-analyysin, mutta sen käyttö ei kertaluontoisessa mittauksessa ole kannattavaa, koska näytteitä on vähän. Raja-arvoiksi mittaukselle valittiin PSK standardin 5704, taulukon 1 mukaiset koneiden tärinärasitusarvojen rajat (Taulukko 1).

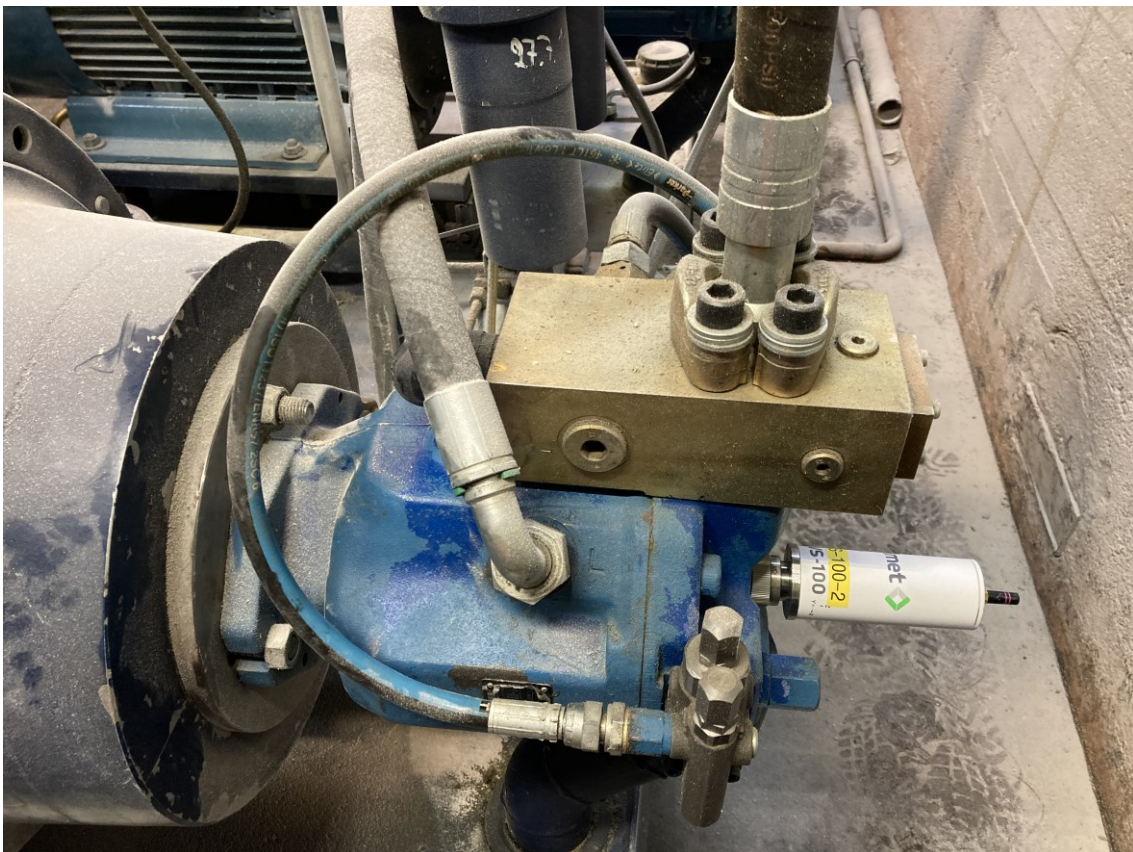
TAULUKKO 1. Koneiden tärinärasitusalueet (8, s. 5)

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

Standardissa koneet luokitellaan käyttötehon, akselikorkeuden ja -liitoksen sekä alustan jäykkyyden mukaan. Mitattavat koneet tässä työssä kuuluvat ryhmään 2. Standardissa luokituksista kerrotaan seuraavasti. Ryhmään 2 kuuluvat "Keskokokoiset koneet, joiden nimellisteho on enintään 300 kW ja sähkökoneet, joiden akselikorkeus on välillä 160 mm ja 315 mm". (8, s. 4.)

Alustan luokittelusta kerrotaan seuraavasti: "Alusta on mittaussuunnassa jäykkä, kun sen alin ominaistaajuus on vähintään 25 % suurempi kuin pääasiallinen herätetaajuus, joka useimmissa tapauksissa on pyörimistaajuus. Kaikki muut alustat ovat joustavia." (8, s. 4.) Alustassa on kumipehennyksiä alustan ja moottorien jalkojen välissä, mutta kokonaisuudessaan alusta voidaan luokitella jäykäksi. Tämä antaa mittausten tärinärasituksen rajaksi 4,5 mm/s. Myös pumpuille luokiteltiin tärinärajaksi 4,5 mm/s. Ne luokiteltiin luokkaan 4 jäykällä alustalla, koska niillä on yhteiset akselit pumppujen kanssa.

Kohteen käytännön mittauksesta ei ollut varmuutta ennen varsinaista mittaustapahtumaa, joten mittapisteen tarkkoja paikkoja ei voitu määrittää etukäteen. Käytännön mittauksessa paras tapa mittapisteen määrittämiseen onkin paikan päällä, koska kuvista ja kuvauksista on vaikea päätellä, minne anturi sopii, tai onko mitattavan kohteen ja anturin välillä liikaa rajapintoja hyvän mittaustuloksen saavuttamiseksi. Suunnitteluvaiheessa kuitenkin tiedettiin, että mittaus suoritetaan molemmille moottoreille vapaasta ja käyttöpäädystä, pysty-, vaaka- ja aksiaalisuunnassa, sekä molemmille pumpeille vaaka- ja aksiaalisuunnassa. Kuvassa 6 näkyy aksiaalisuuntainen mittaus.



*KUVA 6. Pumpun M03.TH aksiaalisuuntainen mittaus*

Sopiva aika mittaustapahtumalle valittiin tilaajan kanssa. Mittauskohde on prosessille kriittinen, mutta tämä ei vaikeuttanut mittaustapahtuman aikataulutusta, koska mittaus suoritetaan prosessin normaalin käynnin aikana.

## 4.2 Mittalaite

Mittauslaitteena työssä käytetään Valmetin Maintenance Padiä ja langatonta WVS-100-värähtelysensoria (kuva 7). Sensorissa on 3,6 VDC:n uudelleenladattava 3100 mAh:n Li-ion akku, mikä mahdollistaa sensorin langattoman toiminnan. (9, s. 2.) Sensori kommunikoi WLAN-verkon ylitse ja sisältää 516 MB sisäisen muistin datan puskurointiin. Tämä mahdollistaa mittauksen eri aikaväleillä ja taajuuksilla sekä mittausten tallentamisen. Varsinainen mittaus tapahtuu kahdella sensorin sisäisellä anturilla. Pietsosähköisellä kiihtyvyyssanturilla voidaan mitata korkeampia värähtelytaajuuksia ja kolmiakselisella MEMS-kiihtyvyyssanturilla (kuva 13) matalampia värähtelytaajuuksia. (9, s. 1.)



KUVA 7. Valmet WVS-100-sensori

Mittalaitteen käyttöä pystyttiin harjoittelemaan ennen varsinaista mittaustapahtumaa, jotta laitteen operointi ja hyvät mittauskäytännöt olisivat mahdollisimman hyvin hallussa. Harjoituksessa Maintenance Padiin luotiin valmiiksi reitti, jota tulnaisiin käyttämään oikeassa mittaustapahtumassa. Tällöin varsinainen mittaus saataisiin suoritettua nopeammin. Mittalaitetta testattiin Oamkin hybridilaboratoriossa olevaan moottoriin. Kun laite oli käyttövalmis, se laitettiin latautumaan mittausta varten.

### 4.3 Valmet Maintenance Pad

Valmet Maintenance Pad (kuva 8) on IP65-luokiteltu, Windows 10 IoT Enterprise LTSB- käyttöjärjestelmällä varustettu tablettitietokone, jota käytetään mittaustulosten analysointiin. Maintenance Padin ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa langaton värähtely ja liipaisumittaustoiminto, datan keruu, välitön mittaustulosten analysointi edistyneillä analysointityökaluilla, reittien jatkuva käytettävyys ja historiadatan hallinta. Tabletissa on myös sisäänrakennettu kamera, viivakoodinlukija ja Bluetooth. (10, s. 3–4.)



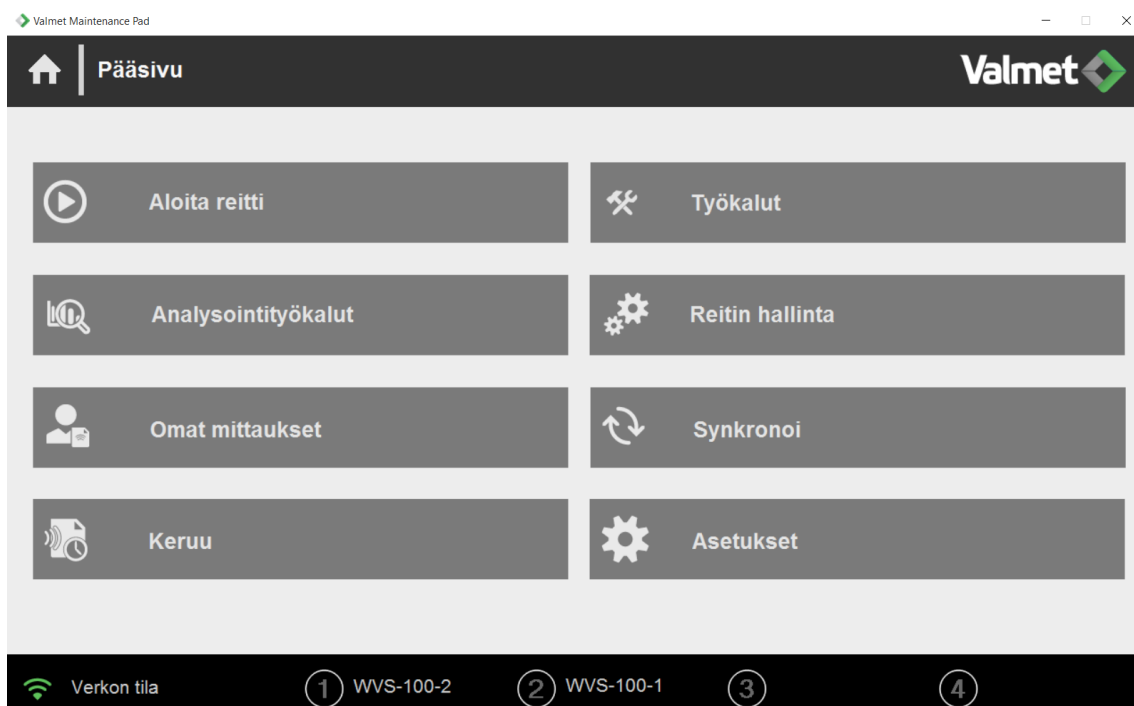
*KUVA 8. Maintenance Pad mittaus (10, s. 1.)*

Maintenance Padin mittaukset tapahtuvat etukäteen luotujen reittien kautta (kuva 9). Reitit ovat mittausjärjestys, jonka avulla Maintenance Padiin luotuja koneita voidaan mitata. Ennen mittauksia Maintenance Padille luodaan reitillä mitattavat koneet. Koneelle ilmoitetaan nimi, mittauspisteet sekä muuta tunnistustietoa koneesta. Jokaiselle mittauspisteelle ilmoitetaan käytettävä kanava, tehtävät mittaukset, näytteiden määrä, mittauksen kesto, spektrin resoluutio yms. Mittauspiste sisältää tarkennettua tietoa koneesta ja mittauksesta.



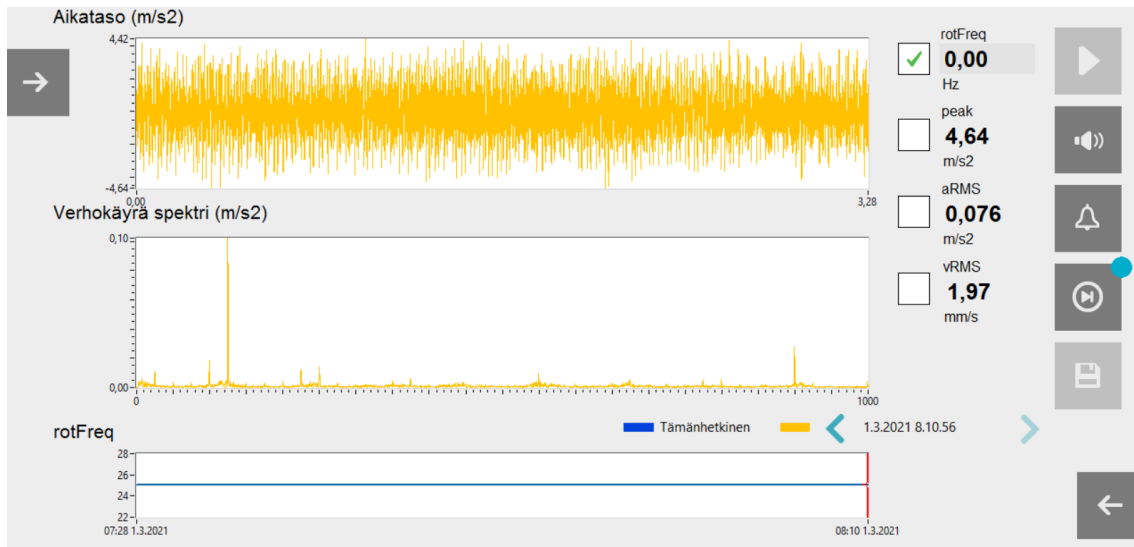
KUVA 9. Reitin hallinta

Kun mitattavat koneet ja niiden mittapisteiden tiedot on kirjattu Maintenance Padiin, voidaan alkaa luomaan reittiä. Reitti nimetään ja sille asetetaan keruuväli. Keruuväli kertoo, miten usein reitti suoritetaan. Reitille kerrotaan, mitkä koneet käydään läpi reittiä suoritettaessa, ja sitten mittaus on valmis suoritettavaksi. Mittaus käynnistetään 'Aloita reitti'- painikkeesta (kuva 10).



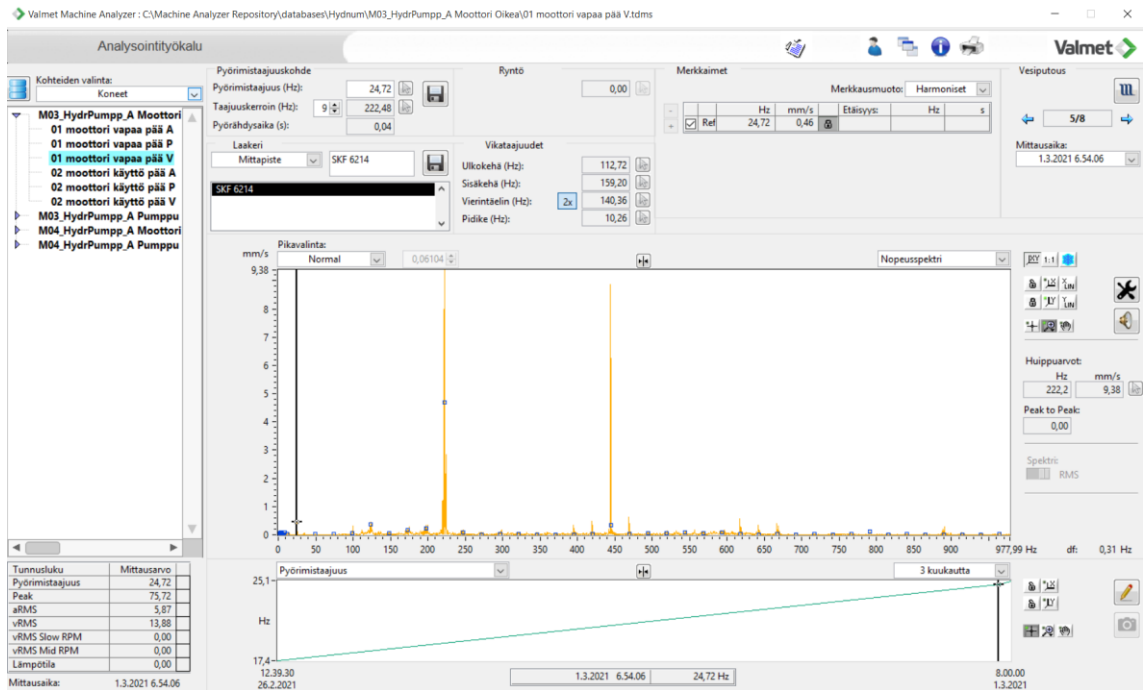
KUVA 10. Päänäkymä

Mittausnäkömstä näkee mittauksenaikaisen aikatason ja verhoikärspektrin (kuva 11). Oikean yläkulman 'play'- painikkeesta suoritetaan mittaus, joka on aiemmin määritetyn mittauksen keston pituinen. Mitattu näyte voidaan tallentaa tietokantaan alhaalla oikealla olevasta tallennus-painikkeesta.



KUVA 11. Mittausnäkömää

Mittaustulosten analysointiin käytetään Analysis Workbench -ohjelmaa. Mittausten suorittamisen jälkeen valitaan tietokanta, josta dataa tuodaan työpöydälle. Analysis Workbench visualisoi dataa aikatasossa ja spektreissä (kuva 12).



KUVA 12. Analysis Workbench

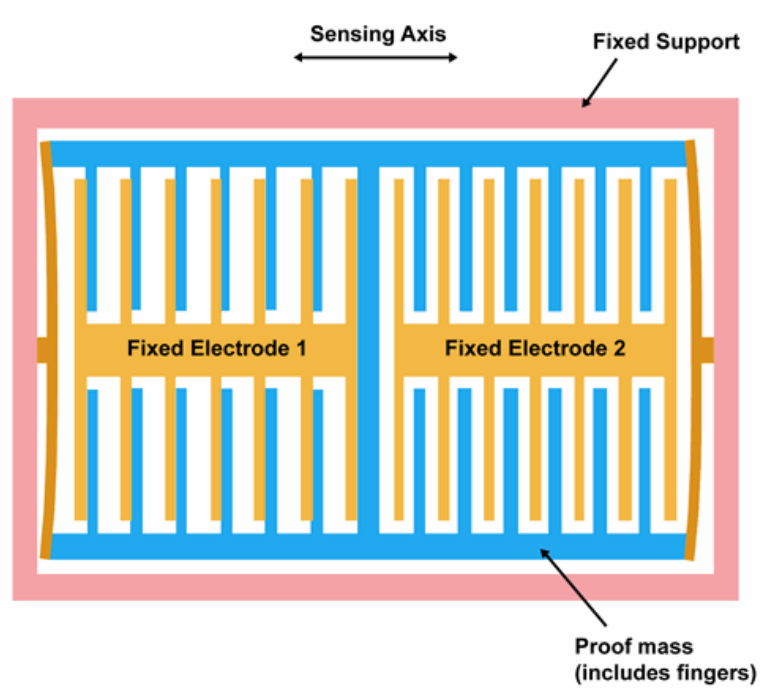
Analysis Workbench mahdollistaa monipuolisen mittausdatan tutkimisen. Ohjelma laskee laakerien vikaantumistaajuudet ilmoitetun laakerityypin ja pyörimistaajuuden perusteella. Liikkuminen eri mitauspisteiden välillä on nopeaa, ja kuvaajia pystyy zoomaamaan. Workbench kertoo myös mittaus-  
ten tunnuslukuja sekä pyörimistaajuuden monikertoja.

## 5 VÄRÄHTELYMITTAUKSEN TEORIAA

Värähtelymittaus perustuu valvottavan koneen synnyttämään mekaaniseen värähtelyyn ja sen muutoksiin. Matalampia värähtelytaajuuksia mitataan tyypillisesti nopeutena (m/s) ja korkeataajuisista, yli 1 kHz:n värähtelyä, mitataan kiihtyvyytenä ( $m/s^2$ ). Joitain todella matalia taajuuksia mitataan siirtymänä.

### 5.1 MEMS ja pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi

Matalien värähtelytaajuuksien mittaamiseen WVS-100 sisältää kolmiakselisen MEMS-kiihtyvyyssanturin. MEMS on lyhenne sanoista Micro ElectroMechanical Systems. Jacopo Iannacci kuvaa kirjassaan RF-MEMS Technology for High-Performance Passives the Challenge of 5G mobile applications hyvin mikrosysteemien tyypillisiä ominaisuuksia: "MEMS device always features tiny structural parts that move, bend, stretch, deform and/or contact together. These peculiarities make microsystem devices particularly suitable for the realization of a very-wide[sic] variety of micro-sized sensors and actuators." (11, s. 1–2.) Mikrokokoisenkin kiihtyvyyssanturin toiminta pohjautuu fyysiseen ilmiöön, jossa kappale pyrkii pysymään paikallaan inertian vuoksi. Muutos nopeudessa synnyttää voiman esimerkiksi jouseen, mikä voidaan tulkita mitattavana suureena, kuten jänniteviestinä (kuva 13).

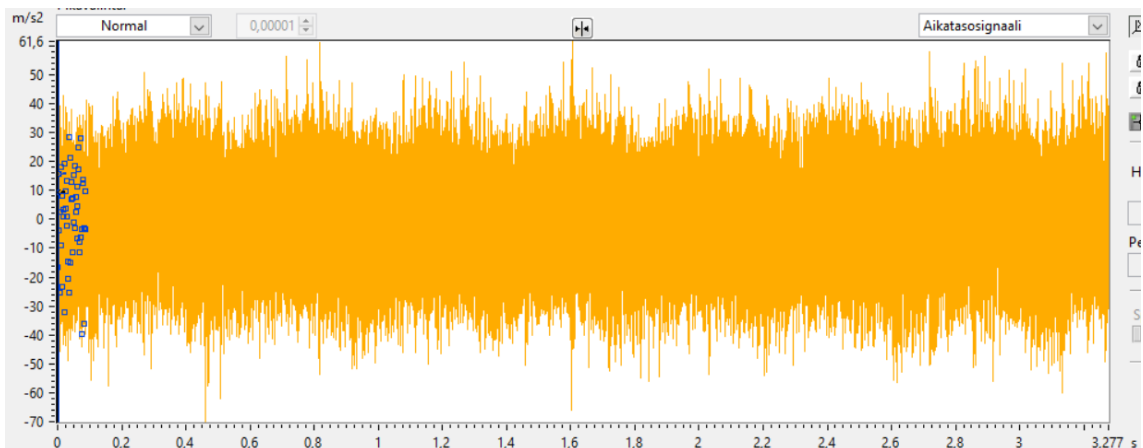


KUVA 13. MEMS Kiihtyvyyssanturi (12, linkit -> Home -> Technology -> MEMS Accelerometers)

Korkeampien taajuuksien mittaamiseen sensori sisältää pietsosähköisen anturin. Pietsosähköisissä kiihtyvyyssantureissa käytetään samannimisiä materiaaleja mittaamaan kiihtyvyyttä. ABB:n TTT-käsikirjassa pietsosähköistä anturia kuvataan seuraavasti: “Kiihtyvyyssanturin toiminta perustuu Newtonin toiseen lakiin  $m a = F$ . Yleisimmin käytetyssä anturissa on massa, joka on kiinnitetty pietsosähköiseen kiteeseen. Värähdellessään massa aiheuttaa kiteeseen varauksen joka on verrannollinen kiihtyvyyteen.” (3, s. 12.)

## 5.2 Käytettävät valvontamenetelmät

Värähtelymittauksesta saatua dataa voidaan esittää monella eri tavalla. Tässä työssä laitteiden tutkimiseen käytettiin aikataso-, verhokäyrä- ja spektrianalyysiä. Aikatasoesitys kuvassa 14 kertoo, kuinka suuri kiihtyvyyden muutos tapahtuu mittauksen aikana.



KUVA 14. Aikatasosignaali

Monesti aikatasosignaalia voidaan verrata aiemmin luotuihin hälytys- ja vikarajoihin, mutta myös ilman ennalta määritettyjä rajoja aikatasosignaalista voidaan havaita PSK Standardissa 5707 mainittuja jakson epäsäännöllisyyksiä, transientteja, hitaita muutoksia ja korkeita, iskumaisia huippuja (13, s. 5). Aikatasoesityksestä voidaan myös laskea tunnuslukuja kuten värähtelyn amplitudi, tehollisarvo, peak-to-peak-arvo sekä jaksonaika. Myös kiihtyvyyden ja nopeuden amplitudeille voidaan laskea tehollisarvo  $v_{RMS}$  ja  $a_{RMS}$ .

Mittauksesta saadusta datasta muodostetaan myös nopeus- ja kiihtyvyysspektrejä. Toisin kuin aikatasossa esitetty signaali, spektri näyttää eri taajuuksien osuudet kokonaissignaalista. Aikatasossa oleva signaali on monen erilaisen aallon summa, ja käytännön mittauksissa signaali tulee aina sisältämään myös kohinaa ja häiriöitä. Ottamalla kaikki signaalin eri komponentit ja erottelemalla ne taajuustasolle voidaan niistä muodostaa spektri. Tätä prosessia kutsutaan Fourier-muunnokseksi, ja sitä voidaan käyttää jaksottomien funktioiden esittämiseen.

Funktion  $f(t)$  Fourier integraaliesitys:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{KAAVA 1}$$

jossa:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{KAAVA 2}$$

Näitä kahta yhtälöä kutsutaan Fourier-muunnospariksi. Kaava 1 kuvaa funktion  $F(\omega)$  Fourier käänteismuunnosta ja kaava 2 funktion  $f(t)$  Fourier-muunnosta. (14, s. 720.) Kokonaisuudessaan funktion  $f(t)$  Fourier-muunnos ilmoitetaan kaavalla 3 (14, s. 721).

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{KAAVA 3}$$

Fourier-muunnos on yleisissä tapauksissa kompleksiarvoinen funktio, joka määrittelee signaalin jatkuvan spektrin. Muunnoksen itseisarvo  $|F(\omega)|$  muodostaa spektrin amplitudin ja vaihekulma  $\arg(F(\omega))$  spektrin vaiheen (14, s. 728).

Koska käytännössä mittausta ei pystytä suorittamaan äärettömällä määrällä mittapisteitä, käytetään diskreettiä Fourier-muunnosta muodostamaan rajallinen jono tasavälisiä havaintoja. Diskreetti Fourier-muunnos jonolle 'f[n]',  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , on määrittelyltään myöskin jono 'F[k]', jossa on yhtä monta lukua 'N' (14, s. 746–748).

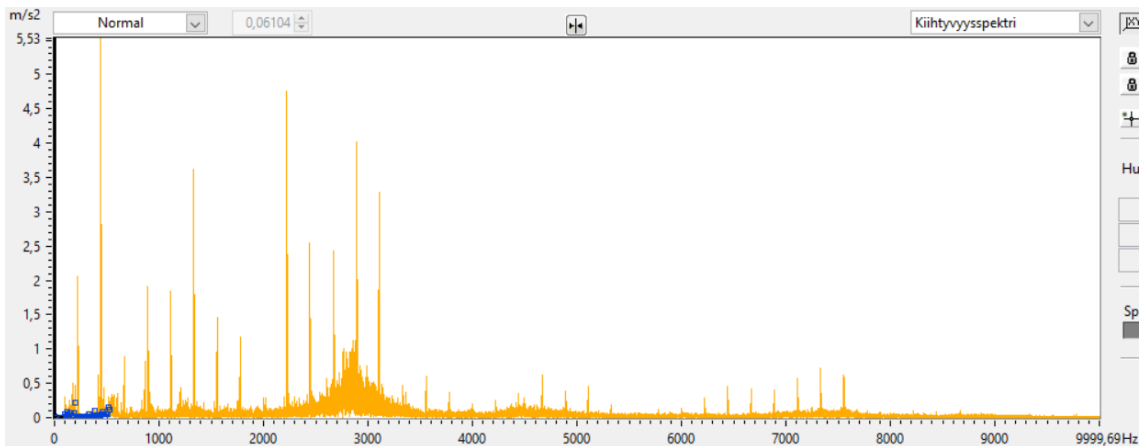
$$\mathcal{D}\{f[n]\} = F[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{-jnk \frac{2\pi}{N}} \quad \parallel N = \text{jonon lukujen määrä.} \quad \text{KAAVA 4}$$

Samana funktion diskreetti käänteismuunnos on

$$\mathcal{D}^{-1}\{F[k]\} = f[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F[k] e^{jnk \frac{2\pi}{N}} \quad \text{KAAVA 5}$$

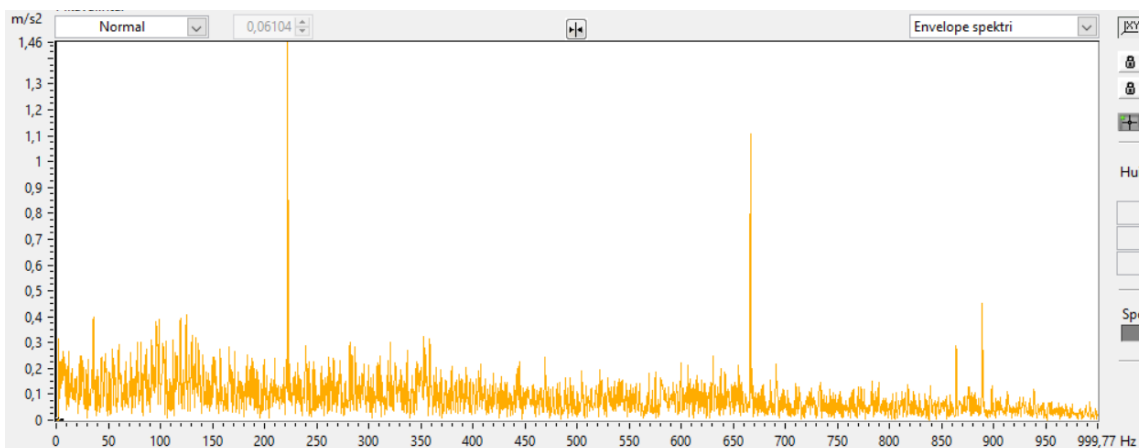
Fourier-muunnokset suoritetaan tyypillisessä spektrianalyysissä FFT:llä eli fast Fourier transform -algoritmilla. Algoritmeja on useita erilaisia, ja ne ovat tapa suorittaa muunnoksia nopeammin ja tehokkaammin. Tyypillisesti laskennassa käytetään spektrien muodostamiseen tarvittavien muutosmatriisien alamatriisien säännönmukaisuuksia. Ne tunnistamalla voidaan suoritettavien laskujen määrää huomattavasti vähentää. (15, s. 80.)

Muodostetusta spektristä (kuva 15) on helppoa lukea, jos jokin taajuus on hallitsevana mitatussa signaalissa. Kuvasta nähdään kiihtyvyyden amplitudi sekä taajuus, jolla värähtely tapahtuu. Nopeusspektri sen sijaan kertoo nopeuden amplitudin tietyllä taajuudella. Spektreistä voidaan myös nähdä, jos värähtely on harmonista, tai jos jokin värähtely tapahtuu synkronoidusti tai ei-synkronoidusti pyörimistaajuuden kanssa. Näiden havaintojen avulla voidaan alkaa sulkemaan pois erilaisia vikoja.



KUVA 15. Kiihtyvyysspektri

Verhokäyräanalyysissä dataa käsitellään korostamaan konevioista johtuvaa tärinää. Käytännössä signaali tarvittaessa esivahvistetaan ja siitä otetaan tarkasteltavaksi sopiva taajuusalue ylipäästösuodatuksella. Taajuusalue riippuu tarkasteltavasta kohteesta. Suodatuksen jälkeen signaalia voidaan vahvistaa uudelleen. Viimeisenä signaalille tehdään demodulaatio eli aikatasosignaali tassaunnataan ja siitä alipäästetään verhokäyrä. Tästä verhokäyrästä muodostettu spektri korostaa laitteen vikataajuuksia ja tekee niistä näkyvämpiä (kuva 16). (15, s. 85.)



KUVA 16. Verhokäyräspektri kuvasta 10, taajudelta 0 – 999,77 Hz

Diagnosoitavan laitteen tai prosessin osan mekaaniset ominaisuudet täytyy pystyä tunnistamaan, kun mitatusta datasta muodostettuja kuvaajia aletaan tulkitsemaan. Ovatko laitteessa olevat laakerit vierintä- vai liukulaakerit, tai onko koneessa vaihteita tai hihnakäyttöjä? Nämä ominaisuudet tulevat vaikuttamaan vikojen eliminointiprosessiin, jossa esiintyviä oireita suljetaan pois. On myös huomioitava, että jotkin laitteet ovat todella voimakkaasti värähteleviä normaalinkin toiminnan aikana. Tästä hyvänä esimerkkinä toimivat mäntäpumput, jotka aiheuttavat voimakasta iskumaista värähtelyä, kun männät liikkuvat edestakaisin sylintereissä. Voimakaskaan värähtely ei siis aina ole suora indikointi viasta.

Värähtelyä onkin syytä tutkia erilaisten karakterististen käytösten perusteella. Näistä esimerkkejä antaa PSK Standardi 5707:

Amplitudi pyörimistaajuudella, harmonisen värähtelyn osuus, aliharmonisen värähtelyn osuus, epäharmonisen värähtelyn osuus, eri komponenttien väliset amplitudisuhteet, laajakajaistainen satunnaisvärähtely, yksittäiset spektrihuiput, amplitudit perustaajuudella ja monikerroilla, amplitudi summa- ja erotustaajuuksilla, sivunauhojen amplitudi, värähtelyn voimakkuus eri mittaussuunnissa, eri komponenttien ja mittaussuuntien vaihe-erot. (13, s. 5.)

Standardin luvussa 6 on hyviä mallikuvia, jotka helpottavat poikkeamien tunnistamista antamalla esimerkkejä, miltä ne saattavat näyttää spektrianalysissä.

Myös B.K.N Raon kirja "Handbook of condition monitoring" sisältää hyvät, vaikkakin yksinkertaistetut taulukot erilaisten oireiden tyyppillisestä ja todennäköisestä esiintymisestä. Kirjassa oireita erotellaan muutenkin kuin vain hallitsevien taajuuksien lisäksi, ja sitä voi hyödyntää myös muunlaisten mittausten yhteydessä (4, s. 146–151).

Spektrivalvonta perustuu myös spektrimaskien käyttöön. Spektrimaskilla tarkoitetaan hälytys- tai vauriorajaa, jonka avulla valvotaan eri taajuuksien amplitudeja. Jos jokin taajuus ylittää maskin, siitä annetaan hälytys. Taajuuden amplitudin korkeus voi määrittää hälytyksen tason, jolloin korkea amplitudi tarkoittaisi kriittisempää hälytystä. (15, s. 102–103.) Tässä työssä spektreille ei voitu luoda maskeja, koska kohteesta ei ollut aiempaa värähtelydataa, eikä mittauksia voitu suorittaa tarpeeksi pelkällä kertaluontoisella mittauksella.

## 6 MITTAUSTAPAHTUMA

Mittauksen kohteena oli kaksi moottoria ja kaksi pumppua. Näytteitä otettiin molemmista moottoreista ja pumppuista, pysty-, vaaka- ja aksiaalisuunnassa, moottorien käyttö- ja vapaasta päästä, pois lukien moottorien vapaan pään akselin suuntaiset mittaukset. Mittauksia ei pystytty suorittamaan näistä pisteistä, koska anturia ei saatu hyvälle paikalle kohteessa. Yksi pumpun M03 aksiaalisuunnan mittausnäytteistä jäi puuttumaan, joten siitä on vain kaksi näytettä kolmen sijaan.

Kohteita mitattiin kahdessa eri prosessin vaiheessa:

1. kun moottorit ajavat suurimmilla nopeuksilla ja pumppujen tuottamat virtaukset ovat korkeimmat
2. kun mäntähydrauliikan säiliötä täytetään ajojen välissä.

Tällöin laitteista saataisiin dataa niiden käynti- ja lepotilassa.

Moottorin M04 ja siihen liittyvän pumpun mittaukset jäivät kesken alkavan huollon vuoksi. Tärkeät mittaukset laitteiden toiminnasta ajon aikana saatiin tallennettua kaikilta laitteilta, mutta moottorin M04 tapauksessa dataa ajojen välisestä täytöstä saatiin vain vapaan pään pystysuuntaisella mittauksella. Tämän ei kuitenkaan pitäisi haitata lopullista kuntokartoituksen muodostamista.

Mitattavien kohteiden luokse ei ollut vaikea päästä. Moottorit ja pumput ovat erillisessä huoneessa, ja niiden ympärillä on paljon tilaa. Ainoat ongelmat mittausten kannalta olivat moottorien ympärillä olevat kehikot. Mittaus saatiin tehtyä tarpeeksi hyvästä paikasta muuttamalla mittausanturin paikkaa.

Mittaus moottorin tuulettimen suojan päältä osoittautui myöhemmin epäluotettavaksi, mutta mitaushetkellä parempaa mittausta paikkaa ei ollut. Jatkossa vapaan pään pystysuorasta mittauksesta voisi saada luotettavampia mittaustuloksia, jos moottorin tuulettimen suojan voisi poistaa. Tämä vähentäisi anturin ja mitattavan kohteen välisiä rajapintoja ja siten parantaisi mittauksen hyvyyttä. Näistä mittaustuloksista on tarkempi kuvaus seuraavassa luvussa.

## 7 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Mittaustuloksien tutkiminen aloitettiin kokoamalla mittausten tunnuslukuja Excel-taulukkoon (kuva 17). Tämä mahdollistaa saatujen tulosten nopean vertailun keskenään. Tässä luvussa myös tutkitaan saatuja aikataso- ja spektrikuvaajia.

01 moottori vapaa pää P	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3
Peak	21,20	17,64	18,35	7,27	7,40	7,15 (m/s <sup>2</sup> )
aRMS	0,15	0,13	0,14	0,10	0,10	0,12 (m/s <sup>2</sup> )
vRMS	6,39	5,39	5,44	2,99	3,16	2,27 (mm/s)
vRMS Slow RPM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00 (mm/s)
vRMS Mid RPM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00 (mm/s)
Envelope peak	1,03	3,30	1,03	1,09	0,62	0,49 (m/s <sup>2</sup> )

KUVA 17. Mittauksen tunnuslukuja Excel-taulukossa

Kuvassa 17 näkyy mittauksen eri tunnuslukuja. Punaisella merkatut vRMS-luvut on merkattu, koska ne ylittävät PSK Standardin mukaisen tärinärasituksen rajan (Taulukko 1). Se saattaa olla merkinä viasta, joten niihin tulee tutustua tarkemmin. Korkeita vRMS-arvoja löytyi M03 moottorin vapaan pään pystysuuntaisista ja vaakasuuntaisista mittauksista sekä M03 pumpun vapaan pään vaakasuuntaisista mittauksista. Mittauksista laskettiin myös huippukertoimet, jotka saattavat myös kertoa mahdollisista vioista (kuva 18).

Huippukertoimet							
M03_HydrPumpp_A Moottori Oikea	Käynnin aikana			Täytön aikana			
01 moottori vapaa pää P	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	141,33	135,69	131,07	72,70	74,75	59,58	dB
01 moottori vapaa pää V	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	20,61	16,76	12,90	14,71	16,02	14,71	dB
02 moottori käyttö pää A	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	4,83	4,61	5,41	3,56	3,20	3,84	dB
02 moottori käyttö pää P	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	5,91	6,26	5,52	4,59	4,93	4,76	dB
02 moottori käyttö pää V	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	3,84	4,26	4,04	3,91	4,00	3,75	dB
M03_HydrPumpp_A Pumppu Oikea	Käynnin aikana			Täytön aikana			
03 pumppu vapaa pää A	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	4,85315	6,28101	-	4,39535	5,0854	4,41538	dB
03 pumppu vapaa pää V	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	5,98439	5,99869	5,92058	5,69807	5,02414	6,50931	dB
M04_HydrPumpp_A Moottori Vasen	Käynnin aikana			Täytön aikana			
01 moottori vapaa pää P	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	
	66,8182	68,3	62,8182	52,3656	61,0526		
01 moottori vapaa pää V	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3				
	7,33512	6,91233	7,36577				
02 moottori käyttö pää A	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Huippukerroin saadaan jakamalla huippuarvo 'aPEAK' RMS-arvolla 'aRMS'. Normaalisti noin 3 dB			
	5,40437	5,43478	5,11927	Korkeampi arvo saattaa kertoa viasta.			
02 moottori käyttö pää P	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3				
	4,62528	5,63993	4,94389				
02 moottori käyttö pää V	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3	Nohek, Petri ja Lumme, Veli Erkki Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset s. 95			
	5,56831	4,98886	4,97957				
M04_HydrPumpp_A Pumppu Vasen	Käynnin aikana						
03 pumppu vapaa pää A	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3				
	6,1745	6,45717	6,43478				
03 pumppu vapaa pää V	Mittaus	Mittaus 1	Mittaus 3				
	4,8063	5,49906	5,12834				

KUVA 18. Huippukertoimet Excel-taulukossa

Monet mittaustulosten korkeat huippukertoimet korreloivat myös rajat ylittävien värinärasitusten kanssa. Huippukerroin (Crest-factor) on desibeleissä ilmoitettava, aikatasosta laskettava tunnusluku, joka kasvaa, kun koneessa on kehittymässä iskumainen vika. Normaalikunnossa olevalla koneella huippukerroin on lähellä kolmea, ja vakavan vikaantumisen aikana se voi olla yli 10. Vikakehityksen loppuvaiheissa huippukerroin alkaa laskea takaisin lähelle kolmea, koska värähtelysignaalin tehollisarvo voi kasvaa voimakkaasti. (15, s. 95.)

Lasketut huippukertoimet olivat todella korkeita, mikä spektrien tutkimisen jälkeen vahvisti epäilyä pystysuuntaisten mittausten hyvydestä. Pystysuuntaisten mittausten kanssa päädyttiin lopputulokseen, että kyseiset mittaukset eivät olisi tarpeeksi luotettavia analysoitavaksi. Mittaus jouduttiin paremman paikan puutteessa suorittamaan moottorin tuulettimen suojan päältä, mikä saattoi aiheuttaa jopa värähtelyn vahvistumista. Tämän johdosta pystysuuntaiset mittaukset jätettiin suurelta osin huomioimatta. Muissa mittauksissa huippukerroin oli vielä sallittavissa lukemissa, mikä edelleen vahvisti virheellistä mittaustulosta pystysuunnassa.

Huippukerroin (dB)

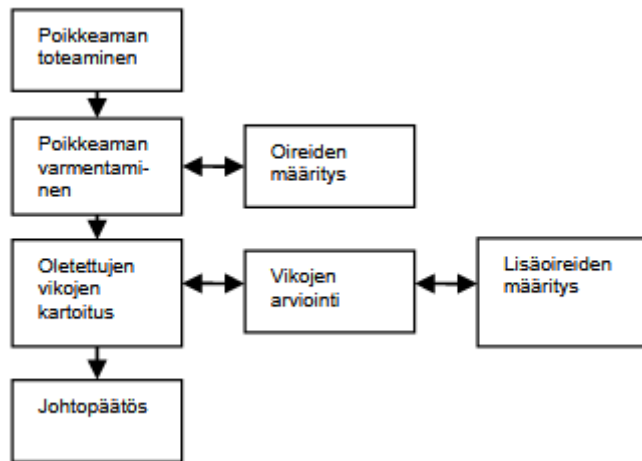
$a_{PEAK}$  = Kiihtyvyyden huippuarvo ( $m/s^2$ )

$a_{RMS}$  = Kiihtyvyyden tehollisarvo ( $m/s^2$ )

$$Huippukerroin = \frac{a_{PEAK}}{a_{RMS}} \quad KAAVA 6$$

Moottorien pyörimistaajuuden avulla voidaan laskea laakerikomponenttien vikaantumistaajuuksia, jotka oireillessaan näkyisivät spektreissä. Pyörimistaajuuden voi selvittää jakamalla pyörimisnopeuden 1500 r/min 60 sekunnilla. Tämä tarkoittaa, että moottorin pyörimistaajuus on noin 25 Hz. Pyörimistaajuuden näkee myös nopeusspektristä, jossa se tyypillisesti näkyy ensimmäisenä korkeana amplitudina ennen 100 Hz:ä. Pyörimistaajuus laskee hieman, kun laitteella on kuorma, mutta lähtökohtaisesti se pysyy samana.

Vikojen määrittämisessä käytin avuksi PSK Standardissa 5707 kuvattua vianmäärityksen kulkua (kuva 19).



KUVA 19. Vianmäärityksen kulku (13, s. 4)

Ensimmäisenä suljettiin pois viat, joita koneessa ei voi esiintyä sen mekaanisten ominaisuuksien vuoksi, kuten vaikka vaihteisiin, hammasrattaisiin tai liukulaakereihin liittyvät viat. Sitten voitiin keskittyä laitetypille kaikista tavallisimmin esiintyviin vikoihin, joita ovat muun muassa epätasapaino, löysä kiinnitys, laakeriviat, virheellisestä asennuksesta johtuvat viat, sähkökoneiden viat ja pumppujen viat.

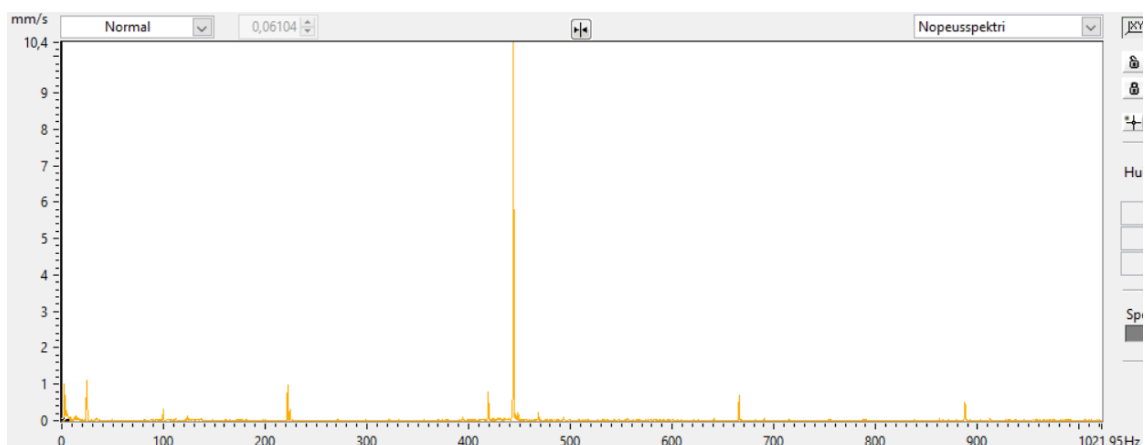
Havaintoja läpikäydessä ne osoittautuivat harmittomiksi, eikä vakavaa vikaantumista ollut havaittavissa. Monet tehdyistä havainnoista olivat yksittäisiä, matala-amplitudisia huippuja nopeus- ja kiihtyvyysspektreissä, eikä niiden harmonisia monikertoja esiintynyt. Myöskään laakereiden vikaantuuksien osalta mittauksissa ei ollut havaittavissa merkkejä selkeistä tai alkavista vioista.

Useista moottoreiden spektreistä kuitenkin löytyi useita pyörimistaajuuden 9x ja 18x monikertoja, mikä ei suoraan viitannut moottorin oirehdintaan, mutta saattoi johtua pumppujen luomasta iskumaisesta värähtelystä. Pumppujen spektreistä löytyi samankaltaisia monikertoja. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, ettei amplitudien kasvu pumppujen lapataajuudella ole varma merkki viasta. Lapataajuudella tapahtuva värähtely aiheutuu usein prosessin muuttuvista olosuhteista kuten imupaineen muutoksista, pumpun kierrosnopeudesta, venttiilien asennosta tai pumpun ominaiskäyrältä poikkeavalla ajoalueella ajamisesta. (16, s. 1).

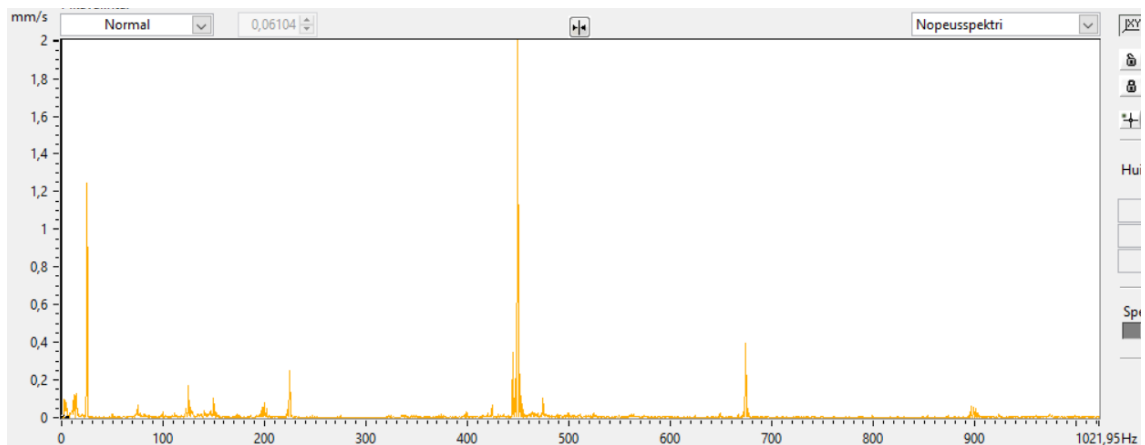
Pumppujen spektreissä silmään pisti myös laajakaistainen värähtely 2-3 kHz:n alueella, jota aluksi epäiltiin kavitoinniksi. Värähtely ei kuitenkaan johtunut kavitoinnista vaan mittausanturin magneetikiihtymisestä. Moottorin värähtely aiheuttaa resonanssia anturissa, mikä saa aikaan havaittavaa, suhteellisen matala-amplitudista värähtelyä kyseisellä alueella (kuva 15).

Prosessissa on käytössä kaksi Rexrothin aksiaalimäntäpumpua, mallia L A10VS0100 DFR1 / 31R-PPA12N00. Mäntäpumpuissa ei ole varsinaista juoksupyörää ja siivekkeitä, vaan virtaus syntyy, kun mäntä vetäytyy pois sylinteristään ja imee nesteen sisään pumpun imupuolella ja sitten palautuu ja pakottaa nesteen ulos painepuolella. Tyypillisesti tämänkaltaisissa pumpuissa on 9 mäntää, mikä tarkoittaa, että sylinterien vetäytyessä ja palautuessa tapahtuisi 18 iskua. (17, Category -> Analysis -> Non-Destructive Testing -> Vibration Points to Piston Pump Failure.) Siksi 9x ja 18x monikerrat spektreissä ovat tärkeitä tarkastelun kohteita kyseisiä pumppuja tutkittaessa. On kuitenkin huomioitava, että mäntäpumppuja on monia erilaisia, eivätkä kaikki samantyyppiset pumput välttämättä sisällä yhtä monta mäntää. Ennen mittaustulosten tutkimista on tärkeää tietää, min-käläinen tutkittava pumppu on rakenteeltaan.

M03.TH pumpussa 18x monikerrat olivat huomattavasti suurempia kuin M04.TH:ssa. Kuvista 20 ja 21 näkyvät molempien pumppujen nopeusspektrien korkeimmat huiput vaakatasosta mitattuna.



KUVA 20. M03.TH Nopeusspektri vaakataso



KUVA 21. M04.TH Nopeusspektri vaakataso

Värähtely oli voimakkaampaa toiseen pumppuun verrattuna, vaikka mäntäpumpuille on hyvin tyyppillistä aiheuttaa voimakasta iskumaista värähtelyä. Värähtely myös ylitti laitteelle oletetut tärinärajasitusrajat. Voimistunut värähtely voi mahdollisesti olla merkki pumpun kulumisesta. Hypotesina jatkotutkimukselle ehdotan, että jos pumppu M03.TH on kuluneempi, niin silloin myös sen kotelon tyhjennysvirta olisi suurempi.

Toimenpide-ehdotukseksi kehoitetaan valvomaan pumppujen koteloiden tyhjennysvirtauksia ja suorittamaan niille tarpeelliset huollot. Huoltoja ja tarkastuksia on myös syytä suorittaa tiheämmin, mikä onnistuisi parhaiten kiinteällä mittausjärjestelmällä. Aiheesta laadittu johtopäätösraportti on liitteessä numero 1.

## 8 YHTEENVETO

Kokonaisuudessaan pumppuhydrauliikasta ei löytynyt vakaviin ongelmiin liittyviä oireita. Värähtelymittausten tunnusluvut ja kuvaajat eivät viitanneet laakereiden kulumiseen tai muihin tyypillisiin vikaantumisiin. Korkeat huippukertoimet todennäköisesti johtuivat huonosta kiinnityksestä mittauksen aikana ja mäntäpumpun aiheuttamasta tärinästä. Molemmissa mäntähydrauliikoissa pumppu jakaa saman akselin moottorin kanssa, mikä saattaa lisätä luonnollisesti tapahtuvaa värähtelyä. Mäntäpumpuille on hyvin tyypillistä aiheuttaa muihin pumppuihin verraten voimakasta värähtelyä, mikä näkyi spektreissä toistuvina 9x ja 18x monikertoina.

Suurin osa ajasta käytettiin mittaustulosten analysointiin ja mahdollisten vikojen poissulkemiseen. Erityisesti mäntäpumppujen aiheuttama värähtely herätti kysymyksiä alussa, kun värähtelyn lähde ei ollut täysin selvä. Mittausdatasta ilmeni pumpun M03.TH värähtelyn olevan jopa viisi kertaa voimakkaampaa kuin pumpun M04.TH. Tämä mahdollisesti merkitsee pumpun kulumista.

Kuntokartoituksella voitiin todeta, että prosessin mäntähydrauliikka ja moottorit vaikuttavat olevan hyvässä kunnossa, mutta pumppujen huoltoa joudutaan ehkä lisäämään. Johtopäätösraportissa ehdotetaan kiinteän mittausjärjestelmän käyttöönottoa ja mittausvälien lyhentämistä. Ehdotetuista toimenpiteistä on helppo jatkaa mahdollisiin prosessin jatkotutkimuksiin tarpeen vaatiessa. Koska moottorit vaikuttavat olevan hyvässä kunnossa mittaustulosten perusteella, voidaan saatua dataa käyttää tulevaisuuden värähtelymittauksissa vertailun kohteena. Tämä helpottaisi vikojen hahmottamista ja mahdollistaisi korkeamman tason kunnonvalvonnan jatkoa ajatellen. Parannettu valvonta ja huolto myös vähentäisivät korjauksiin ja laitteiden korvaamiseen meneviä kuluja. Yleisesti kuntokartoituksella oli tuotannon kannalta positiivinen vaikutus.

Kunnonvalvonnan ja ennakoivan huollon rooli tulee kasvamaan huomattavasti automaation yleistyessä ja kehittyessä. Monet tuotannon laitokset luottavat työntekijän kokemukseen ja arvioon laitteistojen kunnon arvioinnissa. Järjestelmät, joissa käyttäjää ei välttämättä enää tarvita olemaan koneen läheisyydessä, tulevat tarvitsemaan muita korvaavia valvonnan muotoja. Värähtelymittaus voidaan suorittaa käynnin aikana, ilman koneen purkamista, ja siksi siihen tullaan turvautumaan jatkossa yhä enemmän.

## LÄHTEET

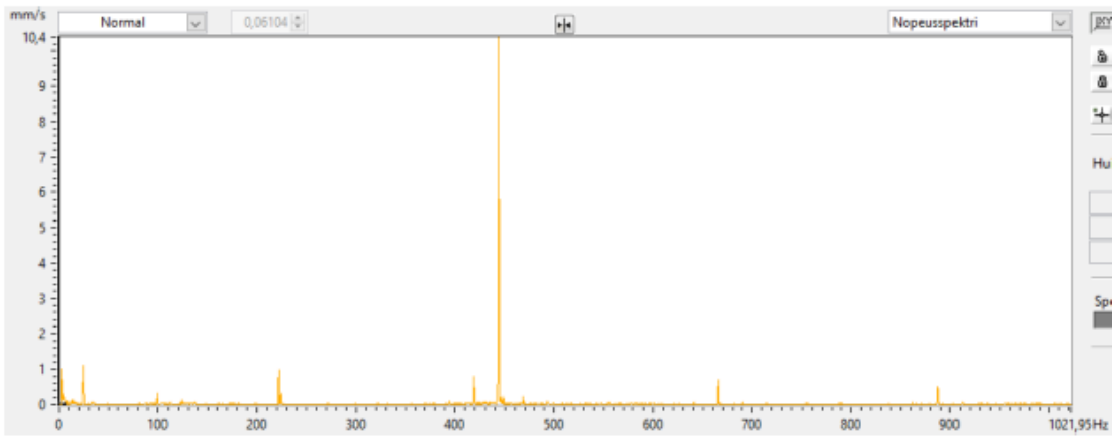
1. Hydnum Oy. Kotisivut. Saatavissa: <https://hydnum.com/>. Hakupäivä 12.04.2021.
2. Kailaste, Eero. Hydnum Oy 2021. Kohteen laitetiedot, opinnäytetyö. Sähköpostiviesti. Vastaanottajat Aleksi Honko, Juha Korpimäki. 16.2.2021.
3. ABB Oy 2000. ABB:n TTT-käsikirja 2000–07, Luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. Helsinki: ABB Oy. Saatavissa: [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23\\_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf). Hakupäivä 30.03.2021.
4. Rao, B.K.N. 1996. Handbook of condition monitoring, 1st Edition. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: Elsevier Advanced Technology.
5. PSK Standardisointiyhdistys ry 2006. PSK 5705 Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoinnin suunnittelu. Saatavissa: [https://psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK5705\\_5p.pdf](https://psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK5705_5p.pdf). Hakupäivä 22.03.2021.
6. Aalto, Heikki 1994. Kunnossapitotekniikan perusteet. Rajamäki: Kustannus Oy Kunnossapitotekniikka.
7. PSK Standardisointiyhdistys ry 2003. PSK 6202 Kunnossapidon käsitteet ja laitoksen kuntokartoitus. Prosessiteollisuuden kuntokartoitus. Saatavissa: <https://psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma62/psk6202.pdf>. Hakupäivä 11.2.2021.
8. PSK Standardisointiyhdistys ry 2013. PSK 5704 Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Vastaanototarkastus ja tärinärasitusrajat. Saatavissa: <https://psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK5704-7p.pdf>. Hakupäivä 22.03.2021.

9. Valmet Corporation 2016. BR81586\_EN\_01 Wireless Vibration Sensor WVS-100. Saatavissa: [https://www.valmet.com/globalassets/automation/distributed-control-system-dcs/condition-monitoring/br81586\\_en\\_01-wvs-100-sensor.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/automation/distributed-control-system-dcs/condition-monitoring/br81586_en_01-wvs-100-sensor.pdf). Hakupäivä 22.2.2021.
10. Valmet Corporation 2018. BR81268\_EN\_05 Valmet Maintenance Pad Portable data collector and analyzer- datalehti.
11. Iannacci Jacopo 2017. RF-MEMS Technology for High-Performance Passives. The Challenge of 5G mobile applications. Bristol: IOP Publishing Ltd. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1545-6>. Hakupäivä 22.03.2021.
12. Silicon Sensing 2017. Kuva www-sivuilla. MEMS Accelerometers. Saatavissa: <https://www.siliconsensing.com/technology/mems-accelerometers/>. Hakupäivä 24.03.2021.
13. PSK Standardisointiyhdistys ry 2019. PSK 5707 Kunnonvalvonnan värähtelymittaus Vianmäärittäminen. Saatavissa: [https://psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK5707\\_6p.pdf](https://psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK5707_6p.pdf). Hakupäivä 19.03.2021.
14. Croft, Anthony – Davison, Robert – Hargreaves, Martin – Flint, James 2013. Engineering Mathematics: A Foundation for Electronic, Electrical, Communications and Systems Engineers, 4th Edition. Edinburgh Gate, Harlow, Essex, CM20 2JE, England: Pearson Education Limited.
15. Nohynek, Petri – Lumme, Veli Erkki 1996. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Rajamäki: KP-Tieto Oy.
16. Leinonen, Jaakko. Valmet Oyj 2021. Mittaustulosten analysointi. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Aleksii Honko. 23.03.2021.

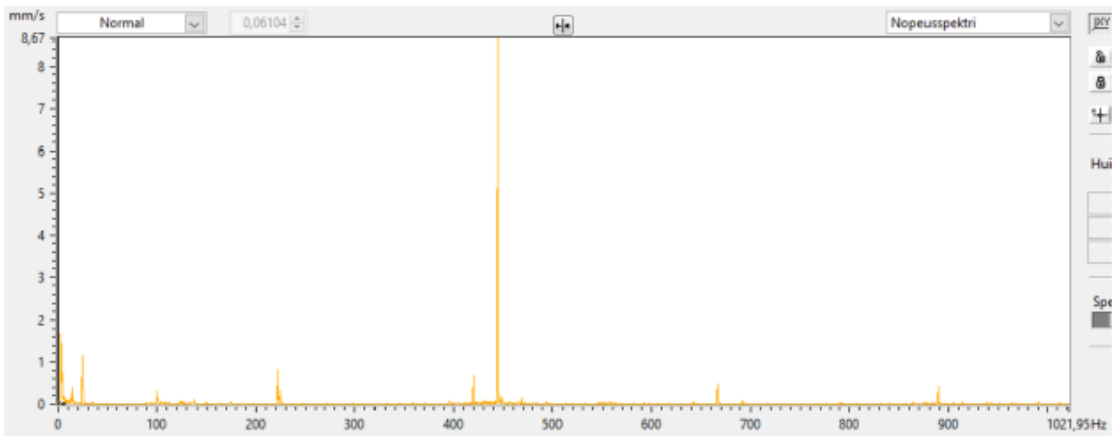
17. Wolfe, Garrett 2018. Vibration Points to Piston Pump Failure. Efficient Plant Magazine 2020.  
Saatavissa: <https://www.efficientplantmag.com/2018/03/vibration-points-piston-pump-failure/>. Ha-  
kupäivä 29.03.2021.

<b>JOHTOPÄÄTÖSRAPORTTI</b>		No:	01			
		Työno:	1X			
		Pvm:	05.04.2021			
		Laatija:	Aleksi Honko			
<b>Konetiedot</b>		<b>Konekaavio</b>				
Laitos:	Hydnum Oy					
Paikka:	Muhos					
Laitapaikka:	M03, M04, M03.TH, M04.TH					
Konetyyppi:	Moottori, pumppu (TH)					
Käyttöolosuhteet:	Tuotanto					
Teho:	Moottorit 55 kW					
Varakone on/ei:	-					
Kriittisyys:	Korkea					
Asento:	Vaaka					
Perustus:	Jäykkä					
<b>Pistetiedot</b>						
Pisteen tunnus	Koneenosa	Sijainti	Suunta	1/min	Laakerityyppi	
M03 moottori	vapaa pää		P, V, A	1470	Moottoreissa 6214 C3, D -ja N	
	käyttö pää		P, V, A			
M04 moottori	vapaa pää		P, V, A	1470		
	käyttö pää		P, V, A			
M03.TH pumppu	käyttö		V, A	1500		
M04.TH pumppu	käyttö		V, A	1500		
<b>Mittaustiedot</b>						
Tiedon tyyppi:	Viimeisin mittauspvm: 01.03.2021					
	Nopeusspektrit Pumpusta M03.TH	Liitteessä	1			
	Nopeusspektrit Pumpusta M04.TH	Liitteessä	2			
		Liitteessä				
		Liitteessä				
		Liitteessä				
		Liitteessä				
		Liitteessä				
		Liitteessä				
<b>Muut havainnot:</b>						
Yksi M04-moottorin kiinnityksistä vaikutti löysältä. Pumpun puoleinen nurkka.						
Molempien moottorien käyttöpäissä pieniamplitudisia spektrihiippuja laakerien vikataajuuksilla tai niiden lähetyillä. Ei kuitenkaan harmonista tai vahvaa, joten mahdollisesti laakerille tyypillistä värähtelyä, eikä indikoi viasta.						
<b>Oireiden määrittäminen (PSK 5707):</b>						
Pumpun M03.TH värähtely on voimakkaampaa, kuin M04.TH:n. Eryyisesti vaakatasoon mitatut 18x-kerrannaiset lähenevät 10 mm/s, verrattuna M04.TH:n noin 3 mm/s. Ei havaittavia 9x sivunauhoja.						

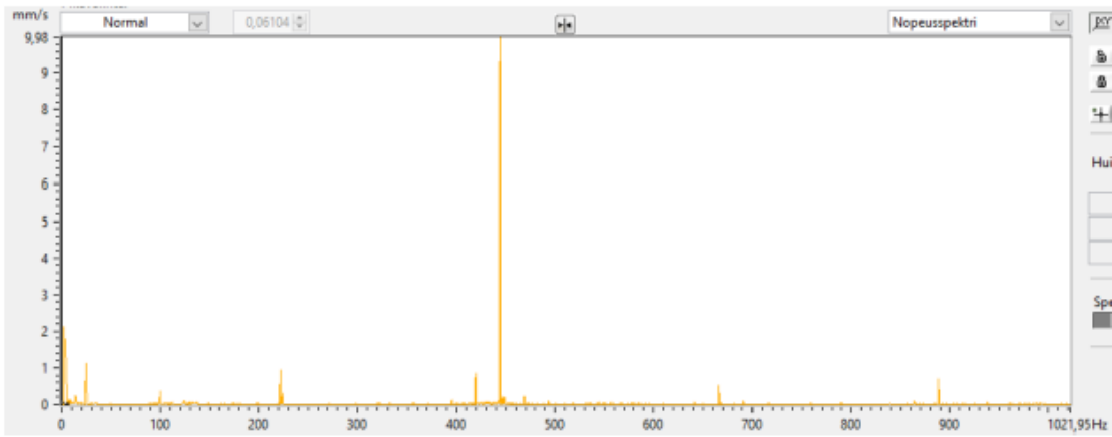




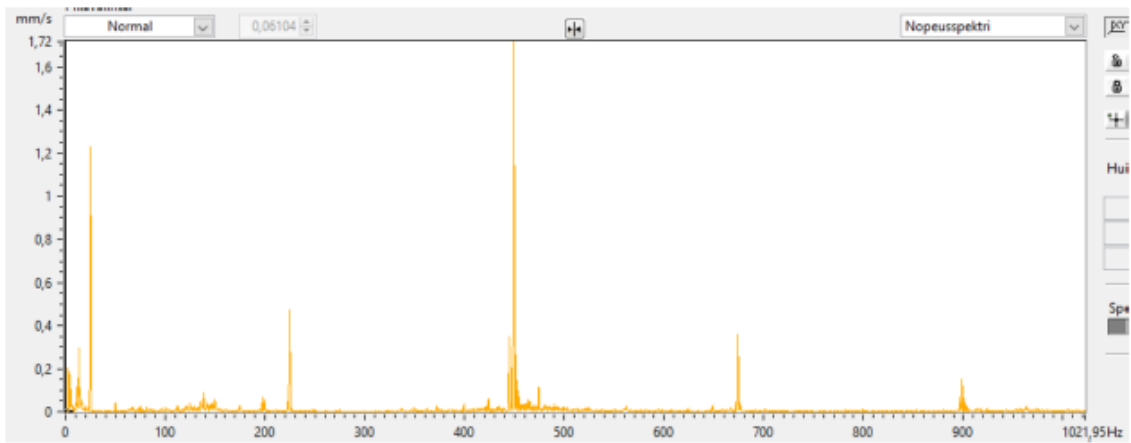
Kuva 1 M03.TH vaakataso 1



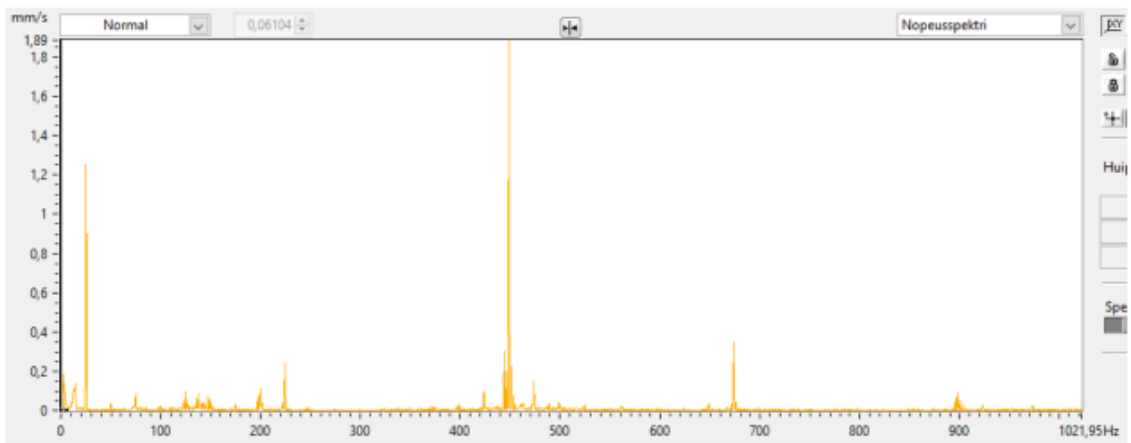
Kuva 2 M03.TH vaakataso 2



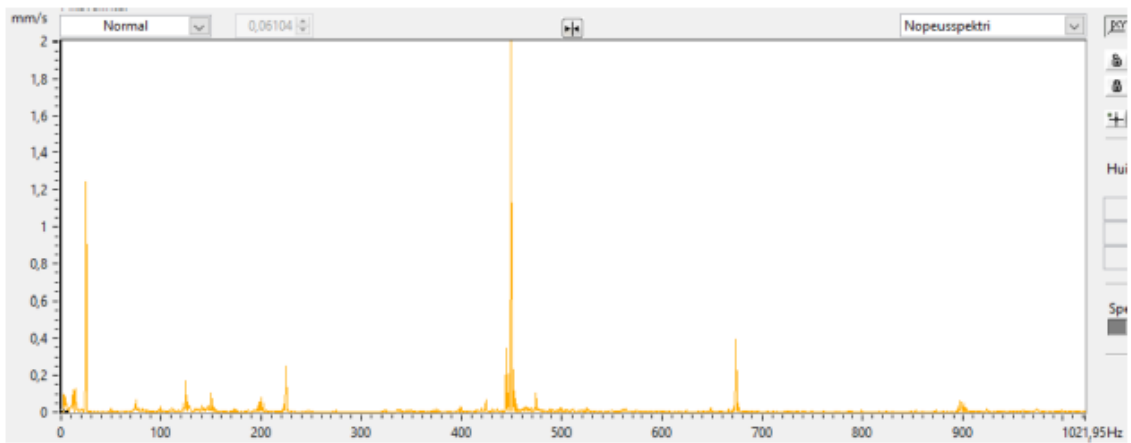
Kuva 3 M03.TH vaakataso 3



Kuva 4 M04.TH vaakataso 1



Kuva 5 M04.TH vaakataso 2



Kuva 6 M04.TH vaakataso 3