

Matias Kallio

# Värähtelymittaukset koneiden kunnonvalvonnassa

Opinnäytetyö

Syksy 2016

SeAMK Tekniikka

Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Tutkinto-ohjelma: Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Sähköautomaatio

Tekijä: Matias Kallio

Työn nimi: Värähtelymittaukset koneiden kunnonvalvonnassa

Ohjaaja: Ismo Tupamäki

Vuosi: 2016 Sivumäärä: 45 Liitteiden lukumäärä: 1

---

Tämän opinnäytetyön aiheena oli koneiden kunnonvalvonta, värinän mittausta sekä värinän aiheuttamat ongelmat teollisuudessa.

Tavoitteena oli tutustua värinän eri muotoihin ja syntymekanismiin. Lisäksi selvitettiin mittauksessa käytettäviä työkaluja ja laitteita sekä paneuduttiin teollisuuden kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan. Värinänmittausta käytetään teollisuudessa yhtenä keinona ennakoitaessa koneen vikaantumista ja elinikää. Nykyään värinän mittaamiseen käytetään useimmiten kiihtyvyyssantureita ja mittaustulokset analysoidaan tietokoneen avulla.

Tämän työn pohjalta luotiin myös laboratoriotyöohje Seinäjoen Ammattikorkeakoulun mittaustekniikan -kurssille. Kurssin laboratoriotyössä pääsee tutustumaan kiihtyvyyssantureihin ja värinämittauksiin.

Avainsanat: kunnonvalvonta, laakerit, värähtelymittaukset

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Automation Engineering

Specialisation: Electric Automation

Author: Matias Kallio

Title of thesis: Vibration analysis in a machine's condition monitoring

Supervisor: Ismo Tupamäki

Year: 2016      Number of pages: 45      Number of appendices: 1

---

The subject of this Bachelor's thesis was machine condition monitoring, vibration analysis and problems in industry caused by vibration. Condition monitoring has become an important factor for many companies resulting from tight delivery schedules.

The objective was to get familiar with different forms of vibrations and the origin of vibration. A part of this thesis was also to investigate what kind of tools and equipment are used for vibration analysis. Furthermore, the aim was to get better knowledge of the maintenance and condition monitoring in industry where vibration analysis is used as one method to predict machine breakdowns and lifetime. Nowadays accelerometers are often used in vibration analysis and the results are analysed with computers.

Based on the laboratory work of this Bachelor's thesis instructions were created for the Measurement Technology course of Seinäjoki University of Applied Sciences. The course's laboratory work makes it possible to get familiar with accelerometers and vibration measurements.

Keywords: condition monitoring, bearing, vibration analysis

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>9</b>
1.1 Työn tausta.....	9
1.2 Työn tavoite.....	9
1.3 Työn rakenne.....	9
1.4 SeAMK Tekniikka.....	10
<b>2 KUNNOSSAPITO JA KUNNONVALVONTA.....</b>	<b>11</b>
2.1 Kunnossapidon määritelmä.....	11
2.2 Kunnossapito.....	11
2.2.1 Korjaava kunnossapito.....	12
2.2.2 Ennakoiva kunnossapito.....	12
2.2.3 Parantava kunnossapito.....	13
2.3 Kunnonvalvonta.....	13
2.4 Käyttövarmuus.....	14
<b>3 VÄRÄHTELY.....</b>	<b>16</b>
3.1 Värähtelyn synty.....	16
3.2 Yhden vapausasteen värähtelijä.....	16
3.3 Harmoniset värähtelytyypit.....	17
3.3.1 Vapaa värähtely.....	17
3.3.2 Vaimeneva värähtely.....	18
3.3.3 Pakkovärähtely.....	19
3.4 Suureet ja parametrit.....	20
3.5 Taajuusspektri.....	21
<b>4 MITTAUSTAVAT, ANTURIT JA TULOSTEN ANALYSOINTI.....</b>	<b>22</b>
4.1 Värähtelymittausmenetelmät.....	22
4.2 Mittalaitteiden asennustavat.....	23

4.3	Anturit.....	24
4.3.1	Siirtymäanturi.....	24
4.3.2	Nopeusanturi.....	25
4.3.3	Kiihtyvyyssanturi.....	26
4.4	Muita mittaustapoja.....	27
4.4.1	Lämpötilamittaukset.....	27
4.4.2	Virta-analyysimittaukset.....	27
4.4.3	Kulumishiukkasanalyysit.....	28
4.4.4	Akustisen emission mittaukset.....	28
4.4.5	Hyötysuhdemittaukset.....	28
4.5	Tulosten analysointi.....	29
4.5.1	Trendiseuranta.....	29
4.5.2	Spektrianalyysi.....	29
4.5.3	Verhokäyräanalyysi.....	31
4.5.4	Kepstrianalyysi.....	32
4.5.5	Vektorivalvonta.....	34
4.5.6	Aikatasovalvonta.....	34
4.5.7	Profiilivalvonta.....	35
4.5.8	Ratakäyrävalvonta.....	36
5	VÄRÄHTELYMITTAUSHARJOITUKSEN VALMISTELU.....	37
5.1	Värähtelymittauskohteiden valmistelu.....	37
5.2	Mittalaitteiden esittely.....	38
5.2.1	LMS Scadas Mobile SCM01 -tiedonkeruulaite.....	38
5.2.2	Kiihtyvyyssanturi PCB Piezotronics 333B32.....	39
5.2.3	LMS Test.Xpress -ohjelmisto.....	39
5.3	Harjoituksen eteneminen.....	40
6	YHTEENVETO.....	42
	LÄHTEET.....	44
	LIITTEET.....	45

## Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Kunnossapidon osat. ....	12
Kuva 2. Käyttövarmuuden termien liittyminen toisiinsa. ....	15
Kuva 3. Värähtelevä systeemi aikatasossa.....	16
Kuva 4. Harmoninen värähtely.....	18
Kuva 5. Vaimeneva värähtely .....	19
Kuva 6. Värähtelysignaalin parametrit .....	20
Kuva 7. Signaalit aika- ja taajuustasossa.....	21
Kuva 8. Siirtymäanturi.....	24
Kuva 9. Nopeusanturi .....	25
Kuva 10. Kiihtyvyyssanturin rakenne .....	27
Kuva 11. Spektri ja koneesta tulevat eri vikataajuudet.....	30
Kuva 12. Verhokäyräanalyysin periaate.....	32
Kuva 13. Spektri (yllä) ja sitä vastaava kepstri (alla).....	33
Kuva 14. Vektorivalvonta .....	34
Kuva 15. Profiilivalvonta.....	36
Kuva 16. Tuulettimet asennettuna värinän mittaamiseksi .....	37
Kuva 17. Peltiliuskan asennustapa. ....	38
Kuva 18. LMS SCADAS Mobile SCM01 .....	39
Kuva 19. Peltiliuskan värähtelysignaali .....	40
Kuva 20. Asetuksien muutos tuulettimia mitatessa .....	41

Kuva 21. Tuulettimien värähtelysignaalit.....41

Kuva 22. Beckhoff EL3632 -tiedonkeruukortti antureineen .....42

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>IEPE</b>	Integrated Electronic Piezoelectric accelerometer. Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi omalla sisäisellä vahvistimella.
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform. Diskreetin Fourier'n muunnoksen laskemiseen käytettävä algoritmi.
<b>RMS</b>	Root Mean Square. Neliöllinen keskiarvo eli tehollisarvo.



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Yrityksille on nykyisin yhä tärkeämpää tilausten toimitusvarmuus. Keskeytynyt tuotanto voi aiheuttaa suuret taloudelliset tappiot verrattuna yhden koneen tai laitteen korjauskustannuksiin. Tämän vuoksi teollisuuden kunnossapito on muuttunut aiemmasta vikoja korjaavasta mallista vikoja ennakoivaksi. Ennakoivassa kunnossapidossa on tarkoituksena ehkäistä tuotantokatkoja mittaamalla ja valvomalla koneiden nykyistä tilaa. Tuotantokatkoja pystytään minimoimaan suunnittelemalla huoltotauot etukäteen. Yhtenä keinona koneen tilan selvittämiseksi käytetään värinänmittausta. Mittauksia on tehty aiemmin ihmisen omiin aisteihin perustuen, mutta automaation lisääntyessä värinänmittaus on muuttunut automaattiseksi ja jatkuvaksi tapahtumaksi.

Seinäjoen Ammattikorkeakoululla on käytettävissä värinänmittauslaitteisto, jota haluttiin hyödyntää enemmän opetuksessa. Laitteelle ei ollut tehty ennen laboratoriotyöohjetta, mistä tuli idea tämän lopputyön tekemiseen.

## 1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on selvittää aluksi värähtelyn synty ja sen muodot sekä värähtelyn vaikutukset koneisiin kunnossapidon kannalta. Työssä käydään läpi millaisia eri antureita värähtelymittauksiin on käytettävissä, sekä muita mittaustapoja, joita kunnossapidossa voidaan käyttää. Tavoitteena on myös tutkia erilaisia mittaustietojen analysointitekniikoita.

## 1.3 Työn rakenne

Luvussa yksi käydään läpi opinnäytetyön rakenne. Luvussa kaksi tutustutaan teollisuuden kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan. Luvussa kolme käydään läpi värähtelyn syntyä ja erilaisia värähtelytyyppejä. Luvussa neljä tutustutaan erilaisiin

mittaustapoihin, antureihin sekä mittaustulosten analysointiin. Luvussa viisi tutustutaan värähtelymittausharjoitukseen. Luku kuusi sisältää tulokset ja pohdintoja opinnäytetyöstä.

#### **1.4 SeAMK Tekniikka**

Seinäjoen Ammattikorkeakoulun Tekniikan yksikössä opiskelee n. 1400 opiskelijaa. Tutkinto-ohjelmia ovat automaatiotekniikan, konetekniikan, rakennustekniikan ja tietotekniikan insinöörikoulutus sekä rakennusmestarikoulutus. Lisäksi tarjolla on kaksi ylempään amk-tutkintoon johtavaa koulutusohjelmaa. Opiskelijoilla on mahdollisuus myös lähteä kansainväliseen vaihtoon ja saada näin kaksoistutkinto automaatiotekniikan ja tietotekniikan koulutusohjelmissa. (SeAMK [Viitattu 21.10.2016].)

## 2 KUNNOSSAPITO JA KUNNONVALVONTA

### 2.1 Kunnossapidon määritelmä

SFS-EN 13306 määrittelee kunnossapidon seuraavasti:

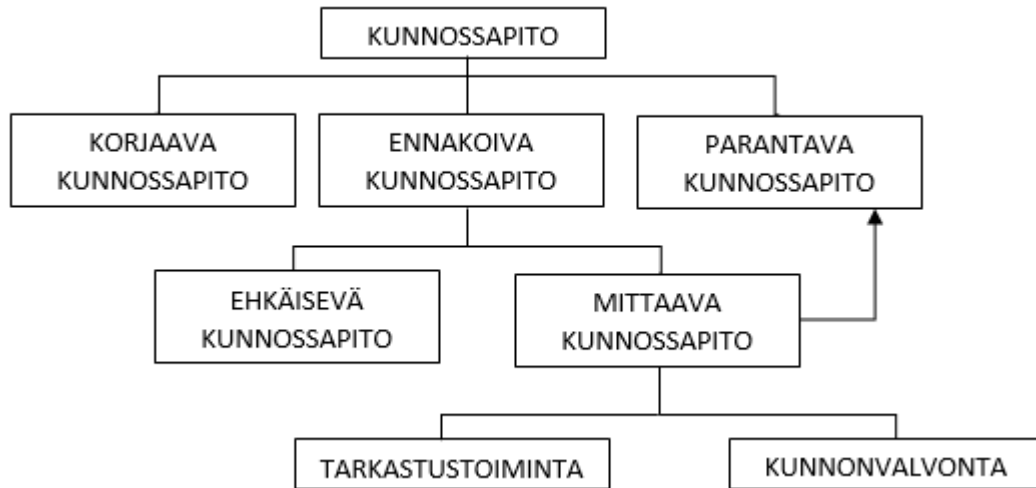
*”Kaikki koneen elinjakson aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimenpiteet, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa koneen toimintakyky sellaiseksi, että kone pystyy suorittamaan halutun toiminnon.”* (SFS-EN 13306, 8).

### 2.2 Kunnossapito

Kunnossapidon tavoitteena on yleisesti koneiden ja rakennusten kunnosta huolehtiminen. Kun kunnossapitoa tehdään tuotannossa, on kyse koneiden kunnonvalvonnasta sekä huollosta. Yleinen kunnossapito taas varmistaa perusedellytykset tuotannolle kuten ilman, lämmön, sähkön ja veden saannin. (Opetushallitus [Viitattu 21.10.2016].)

Tehtaalle on edullista, että tuotanto tapahtuu edullisesti, turvallisesti ja laadukkaasti. Koneet ja laitteet tulee suunnitella soveltumaan käyttötarkoitukseensa mahdollisimman hyvin. Tuotannon käynnistyttyä laitteelle tai koneelle on tärkeää hyvin toimiva kunnossapito, jotta koneen suorituskyky pysyy mahdollisimman hyvänä. Aiemmin riitti, että koneen suorituskyky pysyi samana, mutta nykyään kunnossapidon täytyy parantaa suorituskykyä ja maksimoida koneen elinikä. (Opetushallitus [Viitattu 21.10.2016].)

Kunnossapito voidaan jakaa kolmeen osaan: korjaavaan, ennakoivaan ja parantavaan kunnossapitoon. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.) Kuvassa 1 nähdään myös mittaavan kunnossapidon sijoittuminen ja merkitys kunnossapidossa.



Kuva 1. Kunnossapidon osat.  
(ABB:n TTT-Käsikirja 2000).

### 2.2.1 Korjaava kunnossapito

Korjaava kunnossapito huolehtii vaurioiden korjaamisesta, kun vaurio on jo syntynyt. Tämä on usein kallista koska yksittäinen kone tai tehtaassa tuotanto seisoo katkoksen ajan. Pienessä tehtaassa saattaa olla varalla vanha kone hajonneen tilalle, mutta suurissa laitoksissa, kuten paperitehtaissa, tämä varakoneen olemassaolo on mahdotonta. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

### 2.2.2 Ennakoiva kunnossapito

Ennakoiva kunnossapito pyrkii ehkäisemään tuotantokatkokset tai koneen toimintakyvyn heikkenemisen. Huoltoajankohdat suunnitellaan etukäteen mittaustulosten perusteella. Tämänkaltaiseen kunnossapitoon sisältyy esimerkiksi tarkastaminen, testaaminen, kunnonvalvonta sekä koneen vikahistorian analysointi. Kunnonvalvonnan tehtävänä on koneen jatkuva muutosten seuranta mittaussuureesta. Kun muutos havaitaan, ennakoivassa kunnossapidossa selvitetään syyn aiheuttaja, sekä arvioidaan paljonko koneen käyttöikä on jäljellä. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

### **2.2.3 Parantava kunnossapito**

Parantavan kunnossapidon perustana on koneelle tai laitteelle tehty analyysi ongelman perimmäisen syyn selvittämiseksi. Tämän jälkeen kehitetään ratkaisu ongelmaan, saatujen tietojen perusteella. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

Parantavassa kunnossapidossa on useita eri vaihtoehtoja. Siinä voidaan esimerkiksi vaihtaa koneen komponentteja uusiin ilman että suorituskyky kohenee. Esimerkkinä tästä on vanhojen tasavirtakäyttöjen vaihtaminen uusiin taajuusmuuttajaohjattuihin oikosulkumoottoreihin. Jos kone on osoittautunut epäluotettavaksi, voidaan sille tehdä uudelleensuunnittelu. Tällöin koneesta on tarkoitus saada luotettava ilman muutoksia suorituskykyyn. Viimeisenä vaihtoehtona on tehdä koneelle modernisaatio, jotta se vastaa jälleen nykyisiä vaatimuksia. Esimerkiksi paperikoneilla on pitkä käyttöikä ja niitä täytyy modernisoida uusille paperilaaduille. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

### **2.3 Kunnonvalvonta**

Teollisuuden kunnossapidossa yksi tärkeimmistä keinoista on nykyään kunnonvalvonta, joka on osa ennakoivaa kunnossapitoa. Perinteisesti koneiden kuntoa on valvottu aistien avulla, esimerkiksi kuuntelemalla laakerien ääntä tai tunnustelemalla koneiden värinää. Näitä perinteisiä ja hyvin toimivia keinoja käytetään edelleen. Nykyään kunnonvalvontaa täydentää myös erilaiset mittausten menetelmät, joilla pystytään mittaamaan esimerkiksi koneen värähtelyä, lämpötilaa tai sähkömoottorin virran suuruutta. Tässä opinnäytetyössä keskitytään värähtelymittaukseen, mutta myös muita mittaustapoja käydään läpi. (Nohynek & Lumme 2004, 13.)

Kunnonvalvonnan keskeisin päämäärä on tunnistaa vikaantumisen oireet ja vakavuus, jotta kohteen korjaus voidaan suunnitella ja toteuttaa hyvissä ajoin ennen kuin vika muuttuu vaurioksi. Tämä vähentää koneiden seisokkiaikaa, koska vikojen ei anneta kehittyä vaurioiksi. Esimerkiksi paperiteollisuudessa on näin onnistuttu saavuttamaan korkeat käyttöasteet. Teollisuuden kannattavuus vastaavasti nousee, koska koneiden tuottavuus kasvaa ja elinikä pitenee. Lisäksi varaosien

määrää varastossa ja ennakoimattomia seisokkeja voidaan vähentää. Myös riski ympäristöä kuormittaviin päästöihin pienenee. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

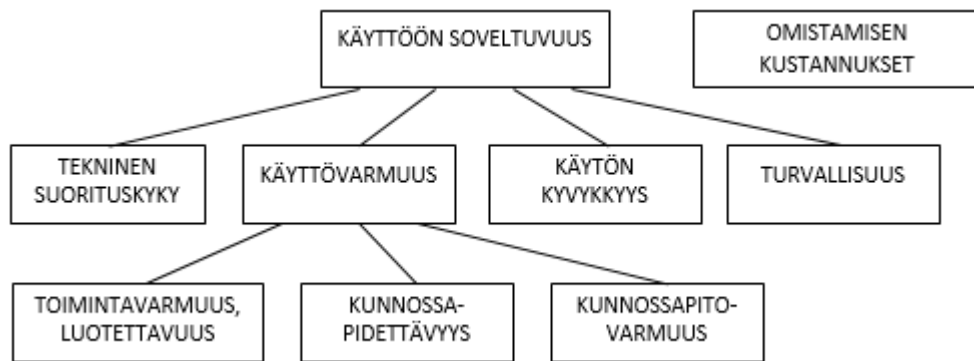
Kunnonvalvonnan toimenpiteisiin kuuluu koneen tai laitteen nykytilan määrittäminen mittausten avulla, sekä arvioida mahdolliset ajankohdat vikaantumiselle ja huoltoajankohdille. Pelkkä mittausdata ei takaa oikeaa vikadiagnoosia, vaan tarvitaan myös historiatietoa koneesta tai sen vaurioista, joiden avulla uusia mittauksia analysoidaan. (Nohynek & Lumme 2004, 13.)

## 2.4 Käyttövarmuus

Käyttövarmuudella tarkoitetaan yksittäisen komponentin, laitteen tai tuotantolinjan kykyä toimia vaaditulla suorituskyvyllä vaadittuna aikana. Käyttövarmuuden tärkeys on alettu ymmärtää vasta viime vuosikymmenien aikana, koska keskeytykset tuotannossa aiheuttavat helposti isoja tappioita. Hajonneen osan tai koneen hinta on usein vain murto-osa keskeytyneen tuotannon tappioista. Jotta tuotannon riskejä saadaan vähennettyä, teollisuudessa on alettu panostamaan ennakoivaan kunnossapitoon ja vikojen ennaltaehkäisyyn. (Knowpap [Viitattu 21.10.2016].)

Käyttövarmuus voidaan jakaa kolmeen eri osatekijään (kuva 2):

- Toimintavarmuudella kuvataan miten luotettavasti laite tai kone toimii ja sen mittarina käytetään keskimääräistä vikaantumisväliä.
- Kunnossapidettävyyys kertoo miten helppo tai vaikea kohde on korjata. Mittarina käytetään keskimääräistä korjausaikaa.
- Kunnossapitovarmuus kuvaa, miten helposti kohde voidaan palauttaa toimintakuntoon. Sen mittarina on keskimääräinen odotusaika. (Opetushallitus [Viitattu 21.10.2016].)



Kuva 2. Käyttövarmuuden termien liittyminen toisiinsa. (Opetushallitus [Viitattu 21.10.2016]).

Kaikilla käyttövarmuuden osatekijöillä on omanlaisensa vaatimukset ja siksi niiden kehittäminen vaatii erilaisia menetelmiä ja välineitä. Yhdessä nämä muutokset parantavat käyttövarmuutta kokonaisuutena ja samalla kehittävät kunnossapidon tehokkuutta. (Opetushallitus [Viitattu 21.10.2016].)

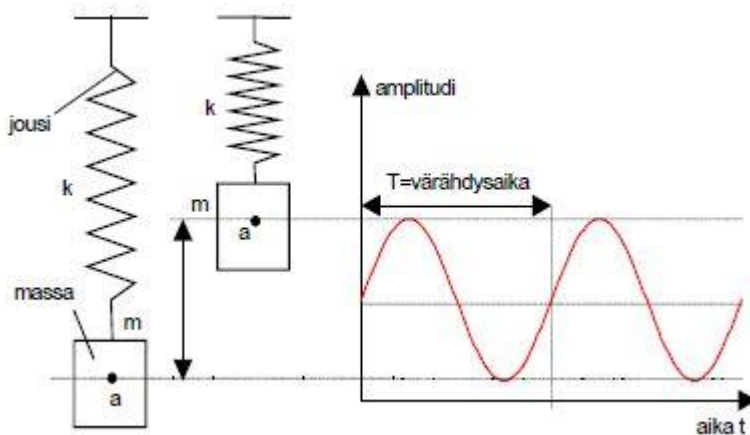
### 3 VÄRÄHTELY

#### 3.1 Värähtelyn synty

Mekaaninen värähtely on rakenteen, koneen tai koneen osan liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä. Jatkuakseen värähtely tarvitsee suuntaansa tai suuruuttaan vaihtavan voiman, tällainen voima syntyy esimerkiksi akselin pyörimisestä. (Nohynek & Lumme 2004, 40.)

#### 3.2 Yhden vapausasteen värähtelijä

Värähtelevä mekaaninen systeemi sisältää kineettistä energiaa, potentiaalienergiaa sekä kyvyn hävittää energiaa. Värähtelevän systeemin energia vaihtelee potentiaalin (jousi) ja kineettisen (massa) välillä. Energiaa häviää, kun systeemiin lisätään vaimennin, joita käytetään esimerkiksi pilvenpiirtäjissä maanjäristysalueilla. Tällainen yhden vapausasteen värähtelijä on helpoin tapa tarkastella värähtelyä. Yksi vapausaste eli siirtymissuunta on kuitenkin käytännön sovelluksissa harvinainen, ja todellisuudessa tavallinen kone sisältää ainakin kuusi eri vapausastetta. Lisäksi on hyvä huomata, että käytännössä mikään laite ei ole täysin jäykkä. (Nohynek & Lumme 2004, 40.) Värähtelevä systeemi voidaan kuvata kuten kuvassa 3 on esitetty.



Kuva 3. Värähtelevä systeemi aikatasossa (ABB:n TTT-Käsikirja 2000).



Yhden värähdysliikkeen aikana massa liikkuu tasapainoasemansa molemmissa ylä- ja alamaksimikohdissa ja palaa takaisin lähtöasemaansa. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.) Kuvasta 3 nähdään myös värähdysaika sekä liikkeen siirtymä sinikäyränä.

### 3.3 Harmoniset värähtelytyypit

Seuraavassa osiossa käydään läpi erilaisia värähtelytyyppejä.

#### 3.3.1 Vapaa värähtely

Yhden vapausasteen värähtelijä, ilman herätettä ja vaimennusta, on nimeltään vapaasti värähtelevä. Se tunnetaan myös nimellä harmoninen värähtelijä, jonka liike on sinimuotoista, kuten kuvassa 4. (Nohynek & Lumme 2004, 42.) Sen liikeyhtälö on muotoa

$$F_I + F_S = 0 \tag{1}$$

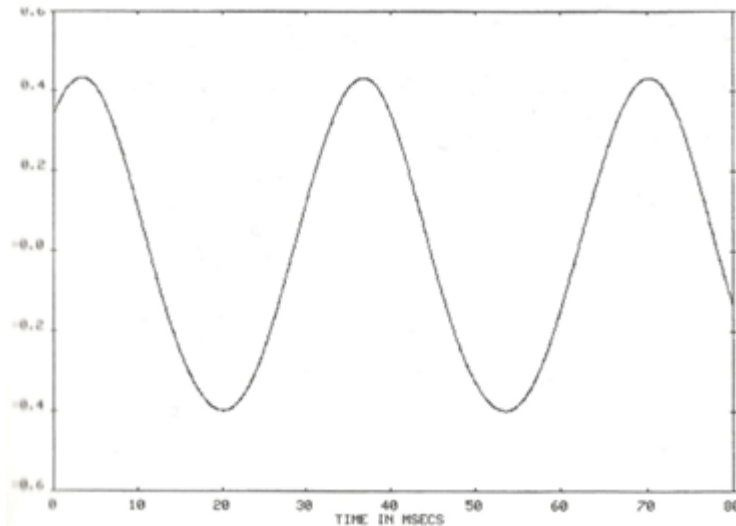
$$ma + ks = 0. \tag{2}$$

Liikeyhtälössä massa  $m$  kerrotaan kiihtyvyydellä  $a$ , jousivakio  $k$  kerrotaan siirtymällä  $s$ .

Harmoninen värähtelijä värähtelee ominaiskulmataajuudellaan  $\omega$ . Sen yhtälö on muotoa

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}. \tag{3}$$

(Nohynek & Lumme 2004, 42.)



Kuva 4. Harmoninen värähtely (Nohynek & Lumme 2004, 43).

### 3.3.2 Vaimeneva värähtely

Kun värähtelijään vaikuttaa vaimennus, mutta ei ulkoista herätettä, on kyseessä vaimeneva värähtely (kuva 5) (Nohynek & Lumme 2004, 42). Sen liikeyhtälö on

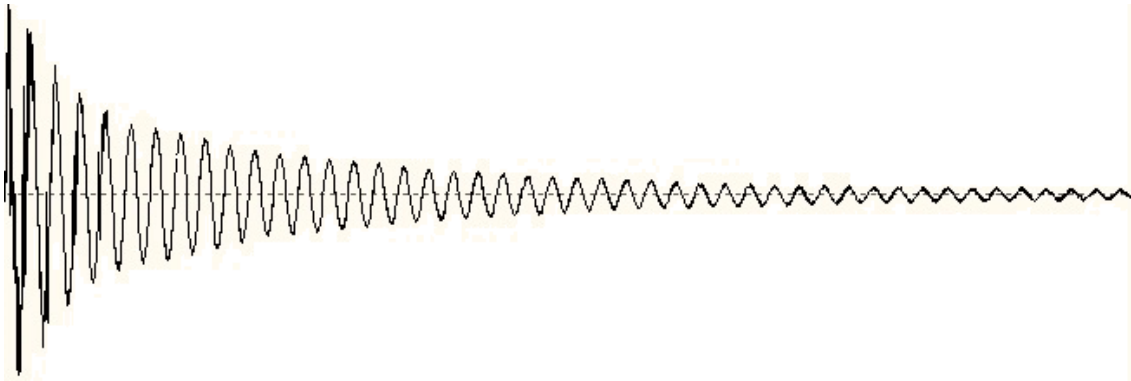
$$F_I + F_D + F_S = 0 \quad (4)$$

$$ma + cv + ks = 0. \quad (5)$$

Liikeyhtälössä  $c$  on viskoosivaimennuskerroin ja  $v$  tarkoittaa nopeutta. Vaimennustekijä  $\zeta$  kuvaa värähtelyn vaimenemista ja se lasketaan kaavalla

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}. \quad (6)$$

Kuvassa 5 ominaistajuus on matalampi kuin vapaassa värähtelyssä. Lopussa värähtely vaimentuu kokonaan. (Nohynek & Lumme 2004, 42-43.)



Kuva 5. Vaimeneva värähtely

### 3.3.3 Pakkovärähtely

Kappale alkaa värähdellä voiman taajuudella, kun herätteenä toimiva suuntaansa tai suuruuttaan vaihtava jaksollinen voima vaikuttaa kappaleeseen. Kun värähtelyä ylläpitää ulkoisen tekijän aiheuttama voima, on kyseessä pakkovärähtely. (Nohynek & Lumme 2004, 44.) Pakkovärähtelyn liikeyhtälö on

$$F_I + F_D + F_S = F \quad (7)$$

$$ma + cv + ks = F \sin(\omega_F * t). \quad (8)$$

Värähtelyn amplitudi voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$X = \frac{F}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} \quad (9)$$

Kaavassa  $k$  on jäykkyys,  $m$  on massa,  $c$  on vaimennus ja  $\omega$  on taajuus.

Vaihe-ero lasketaan kaavalla:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega c}{k - \omega^2 m} \quad (10)$$

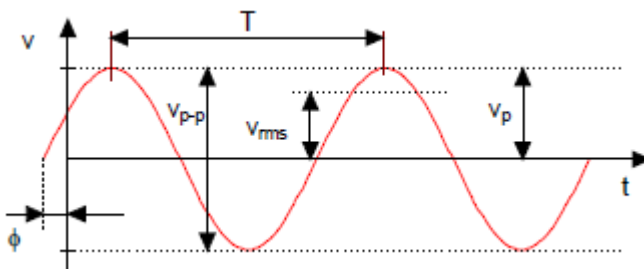
Värähtelyn lähestyessä ominaistajuutta ainoastaan rakenteen vaimennus rajoittaa värähtelyn voimakkuutta. Tällöin amplitudi voi kasvaa hyvinkin suureksi. Taajuus  $\omega$  vaikuttaa myös vaihe-eroon, voiman vaihe-erossa tapahtuu  $180^\circ$  muutos, kun voiman taajuus muuttuu ominaistajuuden alapuolelta sen yläpuolelle. Tämä tarkoittaa, että koneen värähtelyn amplitudit muuttuvat pieniksi, sillä kone ja

pakkovärähteelijä ovat vastakkaisessa vaiheessa toisiinsa nähden. Ominaistaajuuden kohdalla vaihe-ero on  $90^\circ$ . (Nohynek & Lumme 2004, 44-45.)

### 3.4 Suureet ja parametrit

Kappaleessa 3.2 kuvatun siirtymäsuurteen lisäksi nopeus ja kiihtyvyys ovat tärkeitä mittaussuureita. Nopeus saadaan selville derivoimalla siirtymä kerran ajan suhteen. Kiihtyvyys ilmaisee kappaleen nopeuden muutoksen tietyn ajan kuluessa. Derivoimalla nopeus jälleen kerran saadaan kiihtyvyys. Nopeus ja siirtymä on mahdollista myös laskea kiihtyvyydestä käänteisesti integroimalla. (Nohynek & Lumme 2004, 45.)

Kuvassa 6 näkyvät nopeussuureeseen liittyvät parametrit. Myös siirtymälle ja kiihtyvyydelle voidaan käyttää samoja parametreja.



Kuva 6. Värähtelysignaalin parametrit (ABB:n TTT-Käsikirja 2000).

- $T$  on värähdysaika. Taajuus  $f$  saadaan värähdysten käänteisluvusta.
- Huippuarvo  $V_p$  kuvaa suurimman arvon aikatasosignaalin itseisarvosta.
- Huipusta-huippuun arvo  $V_{p-p}$  kertoo suurimman ja pienimmän arvon erotuksen ja on yleensä kaksinkertainen huippuarvoon nähden.
- Tehollisarvo  $V_{RMS}$  kuvaa värinän tehoa ja on yleisesti käytössä Euroopassa. Jos värinäsignaali on kuvan 6 siniaallon mukainen saadaan tehollisarvo kaavasta:

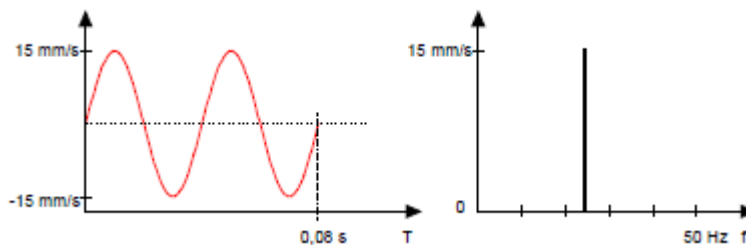
$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

- Vaihekulma  $\phi$  on kohta, johon värähtely on edennyt vertailukohtasta.

(ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

### 3.5 Taajuusspektri

Toinen yleisesti käytetty tapa tutkia värähtelyä perustuu taajuustasoon, joka tunnetaan myös nimellä taajuusspektri. Taajuustasossa (kuva 7) vaaka-akselilla on taajuus ja pystyakseli kertoo amplitudin. Koska normaalisti koneessa tai laitteessa on useita eri osia, jotka aiheuttavat värähtelyä, ja joiden erottelu toisistaan olisi muutoin haastavaa, on taajuusspektri hyvä keino esittää nämä erilaiset värähtelykomponentit. (Nohynek & Lumme 2004, 68.)



Kuva 7. Signaalit aika- ja taajuustasossa (ABB:n TTT-Käsikirja 2000).

Spektrin laskenta perustuu Fourier-sarjojen käyttöön. Siinä minkä tahansa signaalin voidaan osoittaa olevan eri amplitudeista ja taajuuksista koostuvien sinimuotoisten signaalien summa. Tähän aiheeseen palataan luvussa 4. (Nohynek & Lumme 2004, 68.)

## 4 MITTAUSTAVAT, ANTURIT JA TULOSTEN ANALYSOINTI

### 4.1 Värähtelymittausmenetelmät

Kunnonvalvonnan yleisimmin käytetty menetelmä on värähtelymittaus. Oikein käytettynä se on tehokas menetelmä kunnonvalvonnassa. Ihmisen tekemät aistihavainnot ovat edelleen tehokas menetelmä, koska kokeneelle koneen käyttäjälle voi kehittyä kyky havaita oireita etukäteen. Laakerivikoja voi havaita esimerkiksi kädellä koittamalla tai puukepillä kuuntelemalla. (Nohynek & Lumme 2004, 13.)

Värähtelymittausmenetelmät jaetaan kahteen luokkaan:

Luokka 1: Yksinkertaiset menetelmät yleistärinän valvontaan ja vierintälaakereiden kunnonvalvontaan

Luokka 2: Monimutkaiset menetelmät koneiden yksityiskohtaiseen valvontaan ja laakereiden kunnonvalvontaan. (Knowpap [Viitattu 21.10.2016].)

Mikäli koneessa ei ole useita erillisiä akseleita pyörimässä eri nopeuksilla, ovat luokan 1 -mittalaitteet riittävän herkkiä tällaiseen kunnonvalvontaan. Luokan 1 -värähtelymittalaitteita tarvitaan yleensä kaksi kappaletta. Ensimmäisellä mittarilla mitataan kokonaistärinää taajuusalueella 10–1000 Hz. Tämä mittaus kertoo koneen akselien pyörimiseen liittyvistä vioista, liitosten löysyydestä tai linjausvirheistä. Toisella mittarilla mitataan vierintälaakereiden korkeataajuisia värähtelyä, jota tapahtuu tyypillisesti yli 2000 Hz:n alueella. Tällaista värähtelyä tapahtuu, jos laakerin voitelukalvo häviää tai laakeri on muuten vioittunut. Erityiset ultraäänilaitteet kuuluvat myös luokan 2 -mittalaitteisiin. Niitä voidaan käyttää myös kaas- ja nestevuotojen löytämiseksi. (Knowpap [Viitattu 21.10.2016].)

Luokan 2 -mittalaitteet ovat usein yksi- tai monikanavaisia spektrianalysaattoreita. Näillä voidaan valvoa erinopeuksisten akselien lisäksi myös hihnakäyttöjä tai hammasvaihteita. Mittauksen tarkoituksena on erottaa koneen aiheuttaman värähtelyn eri osataajuuudet ja suuruudet toisistaan. Tällä tavoin pystytään tunnistamaan eri koneenosien aiheuttama värinä ja seuraamaan sen kehittymistä.

Luokan 2 -mittalaitteilla on mahdollista tehdä myös signaalinkäsittelyä johon kuuluu esimerkiksi keskiarvostettu aikatasoanalyysi, verhokäyräanalyysi, vaihekulma-analyysi tai kepstrianalyysi. Tästä aiheesta on lisää kappaleessa 4.5 (Knowpap [Viitattu 21.10.2016].)

## 4.2 Mittalaitteiden asennustavat

Värähtelymittalaitteet voidaan jakaa kolmeen kategoriaan riippuen niiden asennustavasta:

- kiinteät automaattiset järjestelmät
- puolikiinteät järjestelmät
- kannettavat mittalaitteet. (Nohynek & Lumme 2004, 28-29.)

Kiinteät järjestelmät koostuvat yleensä koneeseen asennetuista antureista, anturikaapeleista ja mittausyksiköstä. Mittauksia tehdään tarpeen mukaan joko jatkuvasti sekunnin välein tai skannaten muutaman minuutin välein. Mittaustiedot siirtyvät mittausyksiköstä eteenpäin joko digitaalisena (spektri), analogisena (mA) tai hälytysviestinä (rele). (Nohynek & Lumme 2004, 28.)

Puolikiinteän ero kiinteään järjestelmään on kannettavan mittalaitteen käyttö. Kiinteästi asennettujen antureiden kaapelit on johdettu liitäntäyksikköön, johon kannettava mittalaite kytketään. Tällaista mittaustapaa käytetään, kun kohteeseen on vaikea tai mahdoton pääsy tai kohteen lähellä oleminen on suuri työturvallisuusriski. (Nohynek & Lumme 2004, 29.)

Kannettavilla mittalaitteilla kerätään mittaustulokset talteen kentältä, jonka jälkeen ne siirretään tietokoneelle analysoitavaksi. Tietokoneohjelmistolla pystytään tarkastelemaan tuloksia graafisesti sekä luomaan erilaisia hälytysraportteja. (Nohynek & Lumme 2004, 29.)

Oleellista on myös suorittaa seuranta saaduista tuloksista ja dokumentoida ne. Vertaamalla uusia mittauksia historiatietoon voidaan havainnoida vauriokehitystä ja sen perusteella luoda kunnossapitosuunnitelmia. Tämä pätee muihinkin mittausmenetelmiin kuin värinänmittaukseen. (Knowpap [Viitattu 21.10.2016].)

### 4.3 Anturit

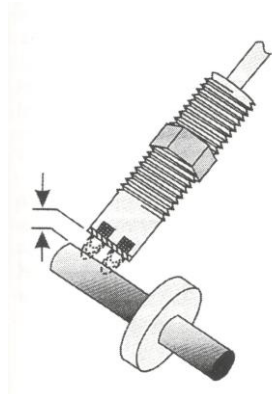
Seuraavassa osiossa käydään läpi erilaisia värinänmittaamiseen käytettäviä antureita.

#### 4.3.1 Siirtymäanturi

Siirtymäanturin toiminta perustuu magnetismiin. Anturin päässä oleva kela muodostaa magneettikentän, joka indusoi pyörrevirtoja ferromagneettiseen pintaan (kuva 8). Kun anturin ja pinnan välinen etäisyys kasvaa tai pienenee, pyörrevirtaus muuttuu ja siitä aiheutuu muutoksia kelan jännitteeseen. Anturin mittaussignaalin arvo saadaan yleensä ulos jännitteenä. (Nohynek & Lumme 2004, 49.)

Siirtymäanturilla mitataan yleensä n. 2 mm:n päästä mitattavasta kohteesta. Tyypillisesti sitä käytetään liukulaakeroitujen koneiden valvonnassa. Tällöin siirtymäanturi kiinnitetään laakerikuoreen ja se mittaa akselin värähtelyä. Lisäksi on mahdollista mitata esimerkiksi pinnanmuodon muutoksia, asemaa tai akselin ratakäyriä. (Nohynek & Lumme 2004, 49.)

Siirtymäanturin hyvinä puolina voidaan pitää sen pientä kokoa ja mahdollisuutta mitata staattista etäisyyttä. Vastaavasti huonoja puolia ovat magneettisen pinnan aiheuttamat vääristymät mittaustuloksissa, vaatimus vakaasta kiinnityksestä, kun mitataan suhteellista liikettä, sekä vaatimus ulkoisesta virtalähteestä. (Nohynek & Lumme 2004, 49.)



Kuva 8. Siirtymäanturi  
(Nohynek & Lumme 2004, 49).

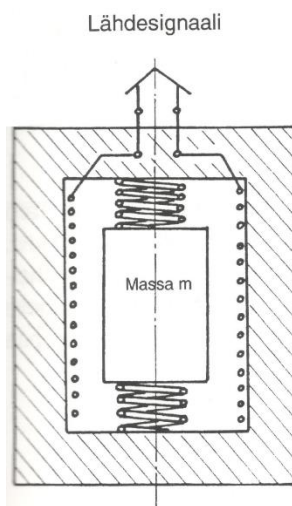


### 4.3.2 Nopeusanturi

Nopeusanturin sisällä on jousilla kiinnitetty magneettinen massa sekä käämi (kuva 9). Kun koneen rakenne värähtelee, magneettinen massa seuraa tätä värähtelyä ja aiheuttaa käämiin nopeuteen verrattavan jännitteen. Tätä jännitettä hyödyntäen saadaan anturista ulos mittaussignaali. Nopeuden mittayksikkönä käytetään mm/s. (Nohynek & Lumme 2004, 47.)

Nopeusanturin mittausalue on yleensä 5 Hz–2000 Hz. Hyviä puolia sille on herkkyys, hyvä signaali/häiriösuhde sekä toiminta ilman virtalähdettä. Nopeusanturin huonoja puolia on sen herkkyys erilaisille magneettisille häiriöille, rajoitettu käyttölämpötila, rajallinen mittaustarkkuus, herkkä rakenne ja kiinnitysasennon vaikutus mittaukseen. Kiihtyvyyssanturi onkin nykyisin pitkälti korvannut nopeusanturin. (Nohynek & Lumme 2004, 48.)

Uusinta teknologiaa edustaa laseria käyttävä nopeusmittaus. Tämä kosketukseton mittaustapa toimii hyvin laajalla taajuusalueella (0–20 kHz). Täysin ongelmaton sekään ei ole, koska säteen takaisinheijastuminen aiheuttaa toisinaan häiriöitä. (Nohynek & Lumme 2004, 48.)



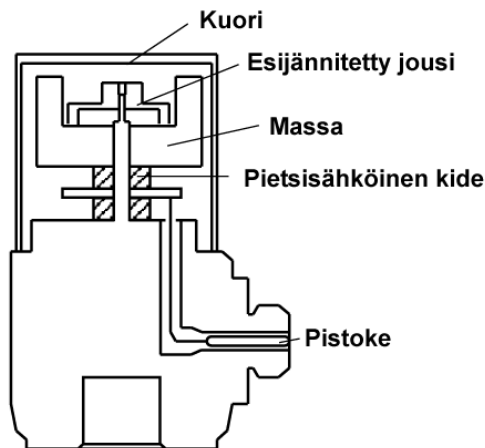
Kuva 9. Nopeusanturi  
(Nohynek & Lumme 2004, 47).

### 4.3.3 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturin rakenne on monimutkainen, mutta sen toimintaperiaate on yksinkertainen kuva 10. Anturin sisällä on pietsosähköinen kide, joka on kiinnitetty anturin kuoreen. Pietsoelementtiin on lisäksi kiinnitetty seisminen massa. Kun mittauskohde liikkuu, seisminen massa joko venyttää tai puristaa kidettä, jolloin syntyy kiihtyvyyteen verrattava jatkuvasti muuttuva plus- tai miinusmerkkinen varaus. Mittaussignaali saadaan anturin sisäisestä tai ulkoisesta varausvahvistimesta, joka muuntaa varauksen jatkuvasti muuttuvaksi jännitteeksi. Kiihtyvyyssanturin mittaustaajuus ulottuu 2 Hz:stä 14000 Hz:in, mutta tässä on hyvä huomata että anturin kiinnitystapa ja ominaisuudet vaikuttavat paljon ylä- ja alarajataajuuksiin. Yleisimpiä kiinnitystapoja ovat magneetti, ruuvi tai mehiläisvaha. Ruuvi kiinnityksellä pystytään mittaamaan suurimpia taajuuksia tiukan kiinnityksen ansiosta. Kiihtyvyyssanturi voi olla kooltaan pienempi kuin nuppineulan pää ja suurimmat aina nyrkin kokoisia. (Nohynek & Lumme 2004, 46.)

Huonoja puolia kiihtyvyyssanturille on sen rakenteen herkkyyys, elektrostaattisten häiriöiden vaikutus tuloksiin sekä asettumisaika. Kun anturi asetetaan mittauskohteeseen, siihen kohdistuva isku lamauttaa pietsosähköisen kiteen hetkellisesti. Toinen asettumisaikaa vaativa toimenpide on jännitteen kytkeminen anturiin. Tämän ajan kestoon vaikuttaa anturin rakenne ja mittauskohteen vaadittu alarajataajuus. Hyviä puolia kiihtyvyyssanturille ovat sen laaja taajuusalue ja edullisuus. Tämän vuoksi se onkin nykyään käytetyin värinänmittausanturi. Myös kiihtyvyyssanturia voidaan käyttää nopeusanturina sillä anturin sisältämä elektroniikka mahdollistaa kiihtyvyyden integroimisen nopeudeksi. (Nohynek & Lumme 2004, 46-47.)

## Kiihtyvyyssanturi



Kuva 10. Kiihtyvyyssanturin rakenne (Knowpap [Viitattu 21.10.2016]).

### 4.4 Muita mittaustapoja

Seuraavassa osiossa esitellään kunnonvalvonnassa käytettäviä mittauksia.

#### 4.4.1 Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittaukset ovat tehokas tapa valvoa mm. laakereiden kuntoa. Lämpötilaa voidaan mitata mittareilla, joiden anturi koskettaa konetta tai laakeria, infrapunamittauslaitteilla tai lämpökameroilla, jotka eivät tarvitse kosketusta lämpötilan mittaamiseen. Teknologian halventuessa lämpökameroista on tullut suosituin tapa mitata lämpötiloja ja tunnistaa vikojen varhaisia muotoja. Heikkoutena lämpökamerassa on sen mahdollinen lämpöheijastumista johtuvat häiriöt ja haasteellisuus emissiokertoimen asettamiseksi eri pinnoille. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

#### 4.4.2 Virta-analyysimittaukset

Sähkömoottoreiden vikojen havaitsemiseksi käytetään sähkövirta-analyysiä, jossa spektrianalyysiaattorilla mitataan yhdestä sähkömoottoriin tulevasta vaiheesta

virtaspektri. Tämä spektri paljastaa sekä sähköisiä että mekaanisia vikoja, kuten vaurioituneet roottorisauvat, rikkoontuneet oikosulkusauvat, korkeavastuksiset liitokset, murtuneet juotokset häkkikämeissä, roottorin käämitysongelmat, taipunut akseli tai dynaaminen ja staattinen epäkeskeisyys. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

#### **4.4.3 Kulumishiukkasanalyysit**

Kulumishiukkasia syntyy koneen osien toisiaan vasten liikkuvissa pinnoista. Hiukkasten koko on normaalissa kulumistilanteessa n. 10 µm, mutta voimakkaasti kuluneessa koneessa hiukkasten koko on kasvanut jopa 10- tai 100-kertaineksi. Kulumishiukkasanalyysissä seurataan hiukkasten määrää ja kokojakaumaa, jonka perusteella saadaan tulos koneen kunnosta. Analyysi tehdään yleensä erillisestä voiteluöljynäytteestä, mutta saatavilla on myös kiinteitä valvontajärjestelmiä. Lisäksi yksittäisiä hiukkasia tutkittaessa voidaan saada tietoa kulumismekanismeista, kuten hankautumisesta tai lastuamisesta. (Nohynek & Lumme 2004, 22-23.)

#### **4.4.4 Akustisen emission mittaukset**

Akustisella emissiolla voidaan havaita aineen rakenteen muutoksista muodostuvia aaltoliikkeitä. Tällä menetelmällä voidaan huomata esimerkiksi koneen käytönaikana tapahtuvia murtumia tai sopivalla voimalla koneen rakennetta erikseen rasiittaessa tapahtuvia murtumakohtia. Anturi on rakenteeltaan kiihtyvyyssanturin tapainen, mutta ilman lisämassaa kiteen päällä. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

#### **4.4.5 Hyötysuhdemittaukset**

Hyötysuhdemittauksella saadaan selville laitteen tai prosessin toimintakyky. Prosessin eri vaiheissa mitataan esimerkiksi virtausmääriä, lämpötiloja tai virtauksia. Näiden mittausten pohjalta lasketaan koneen todellinen hyötysuhde. Lopullinen toimintakyky saadaan selville vertaamalla näitä tuloksia laskennalliseen

hyötysuhteeseen. Hyviä esimerkkikohteita tästä ovat turbiinit ja niiden siipien kuluminen ja vaurioituminen tai turbiinin asennusviat. (Nohynek & Lumme 2004, 23.)

## **4.5 Tulosten analysointi**

Tulosten analysointi vaatii, että mittaustulokset ovat vertailukelvollisia keskenään eri mittauskerroilla (Nohynek & Lumme 2004, 80). Seuraavissa kappaleissa on kerrottu yleisimpiä tapoja mittaustulosten analysointiin.

### **4.5.1 Trendiseuranta**

Trendiseurannan mittaustapaa käytetään useimmiten rutiinimittauksissa. Se paljastaa esimerkiksi koneen epätasapaino-, asennus-, linjaus- ja resonanssiongelmat. Trendiseurannassa mitataan tavallisesti tehollis- tai huippuarvoa värinäkihtyvyydelle, nopeudelle tai siirtymälle ja verrataan mittaustuloksia edellisiin tuloksiin. Trendiseurannalla pystytään huomaamaan lähinnä suuret viat koneessa. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

Standardi PSK 5704 määrittelee hälytysrajat, joiden sisällä mittaustulosten tulisi pysyä mutta on hyvä huomata että koneiden värinätasot ovat yksilöllisiä. Tämän takia onkin parasta seurata myös muutoksen nopeutta. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

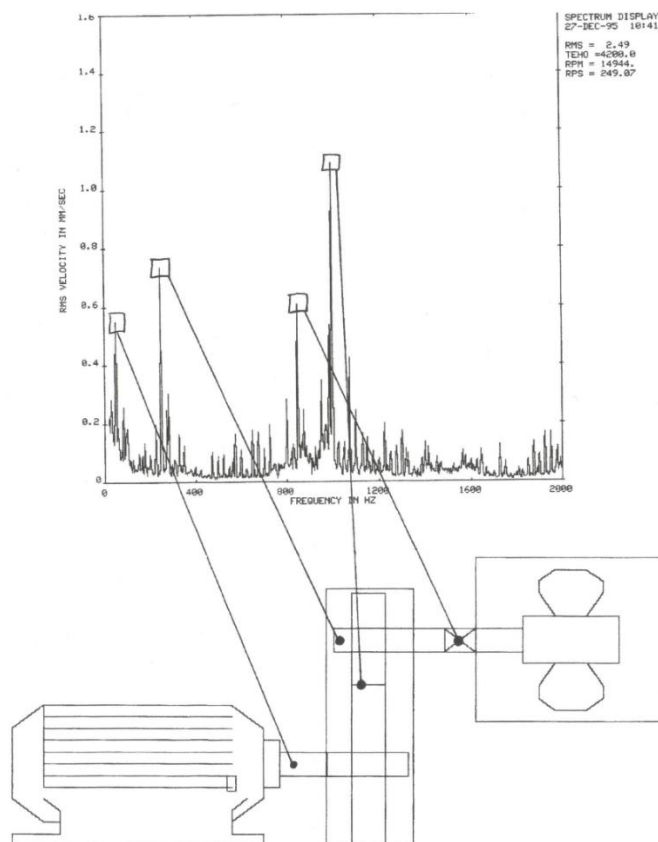
### **4.5.2 Spektrianalyysi**

Spektrianalyysi on nykyisin yleisin menetelmä vikojen analysoinnissa. Sen suurin etu on mahdollisuus erotella eri koneenosissa tapahtuvan värähtelyn eri taajuudet ja niitä vastaavat amplitudit. Tämä ei kuitenkaan onnistu, ellei ole tiedossa koneen akselien kierrosluvut sekä koneen rakenne, esimerkiksi hammaspyörän hampaiden lukumäärä, roottorin siipien lukumäärä tai vierintälaakereiden tyyppi ja valmistaja. Näiden tietojen pohjalta lasketaan koneelle erilaiset vikataajuudet. Lisäksi mittaushetkellä on tärkeää saada tietää koneen sen hetkisestä tilasta, esimerkiksi

kuormitustaso tai pyörimisnopeus, mikäli ne vaihtelevat. (Nohynek & Lumme 2004, 89.)

Itse spektri (kuva 11) muodostetaan Fast Fourier Transform -laskennalla tai kapeakaistaisilla taajuussuotimilla. Fourier-sarjoilla pystytään osoittamaan matemaattisesti signaalin olevan sini- ja kosinimuotoisten harmonisten signaalien summa. Nykyisin pelkän Fourier-sarjan käyttö olisi liian hidasta, joten nykyään käytetään Fast Fourier Transform -algoritmia, jolla voidaan tehdä muunnos aikatasosta taajuustasoon hyvinkin nopeasti. (Nohynek & Lumme 2004, 68-69.)

Huonona puolena spektrianalysissä on tulosten oikean tulkinnan vaikeus, mikä vaatii enemmän kokemusta. Kaikki spektrissä näkyvät piikit eivät kuvaa ongelmaa, vaan ovat normaalia koneen käynnistä johtuvia taajuuksia. Nykyään on kuitenkin mahdollista käyttää kaista- tai spektrivalvontaa. Kaistavalvonnalla tarkoitetaan tietyille taajuuskaistoille asetettuja rajoja, joista saadaan hälytys, jos rajat ylittyvät. Spektrivalvonnassa pystytään luomaan spektrin ympärille raja, joka laukaisee hälytyksen taajuudesta riippumatta. (Nohynek & Lumme 2004, 89-90.)



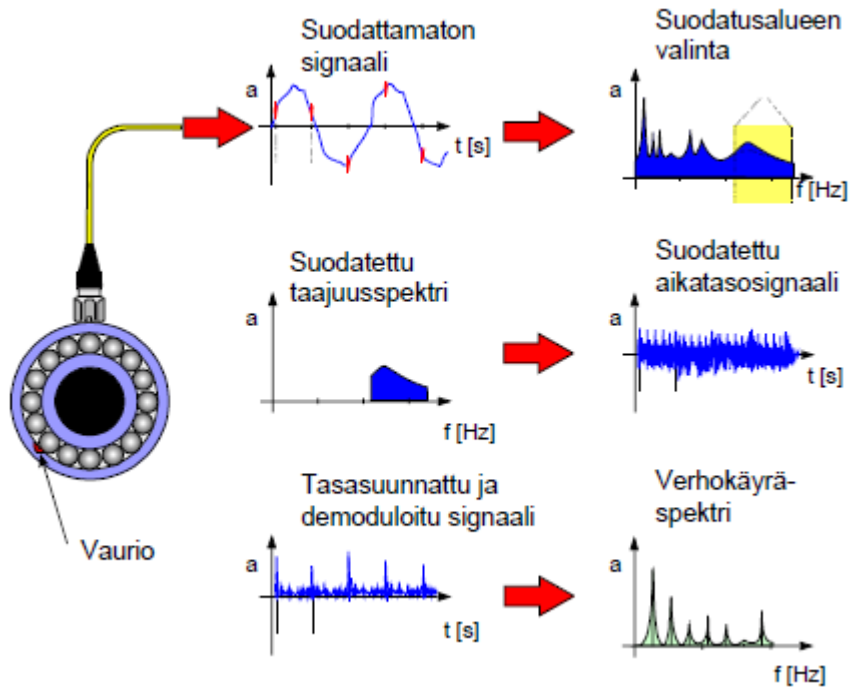
Kuva 11. Spektri ja koneesta tulevat eri vikataajuudet (Nohynek & Lumme 2004, 88).

Viimeiseksi on hyvä huomata, että koneelle suoritettun huollon tai korjauksen jälkeen, tulee koneelle tehdä uudet mittaukset, joiden arvoja käytetään päivitettyjen hälytysrajojen luonnissa (Nohynek & Lumme 2004, 91).

### 4.5.3 Verhokäyräanalyysi

Verhokäyräanalyysi perustuu amplitudimodulaatioon. Amplitudimodulaatiossa signaali summataan kanta-aaltoon. Myös vierintälaakereissa ja hammasvaihteissa syntyy samanlaisia amplitudimoduloituja signaaleja, jotka näkyvät jaksollisina suurtaajuuksisina häiriöinä. Etuna verhokäyräanalyysissä on kyky suodattaa signaalista pois esimerkiksi epätasapainosta tai huonosta linjauksesta johtuvat häiriöt ja näin havaita laakerivauriot jo riittävän aikaisessa vaiheessa. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.)

Kuvasta 12 nähdään verhokäyräanalyysin periaate. Kun laakeri pyörii, siitä välittyy vikoihin viittavia impulsseja anturiin. Signaalin suodatusalueen valinta tehdään asettamalla kaistanpäästösuodatin resonanssikohdan ympärille. Tämän jälkeen signaali tasasuunnataan ja demoduloidaan eli kanta-aalto erotetaan signaalista. Lopuksi tälle demoduloidulle signaalille tehdään FFT-analyysi, jolloin saadaan verhokäyräspektri. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000.) Tämä spektri paljastaa vikataajuuudet eli kuvassa 12 näkyvät piikit.

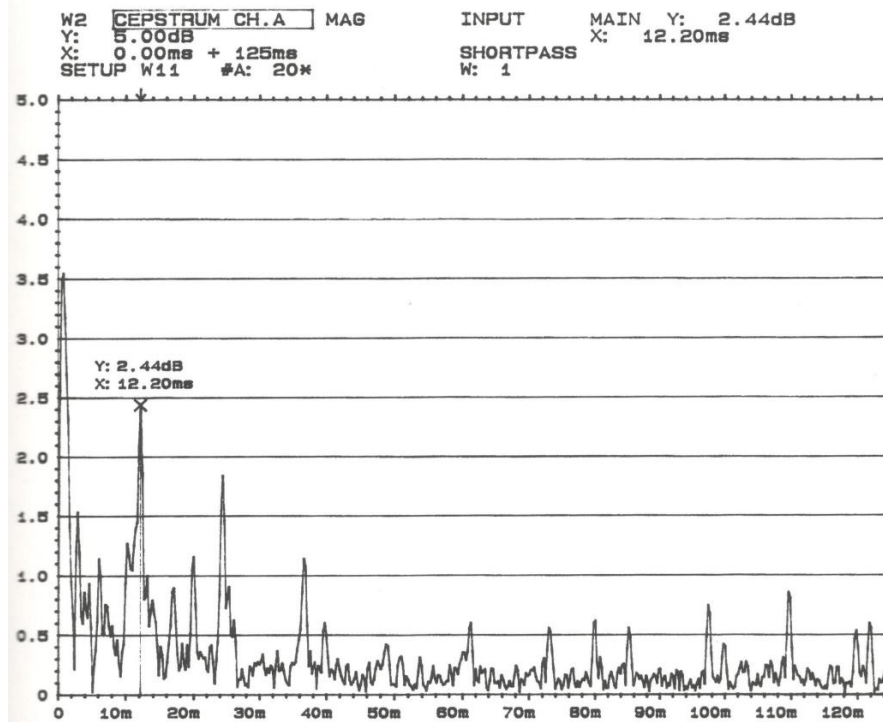
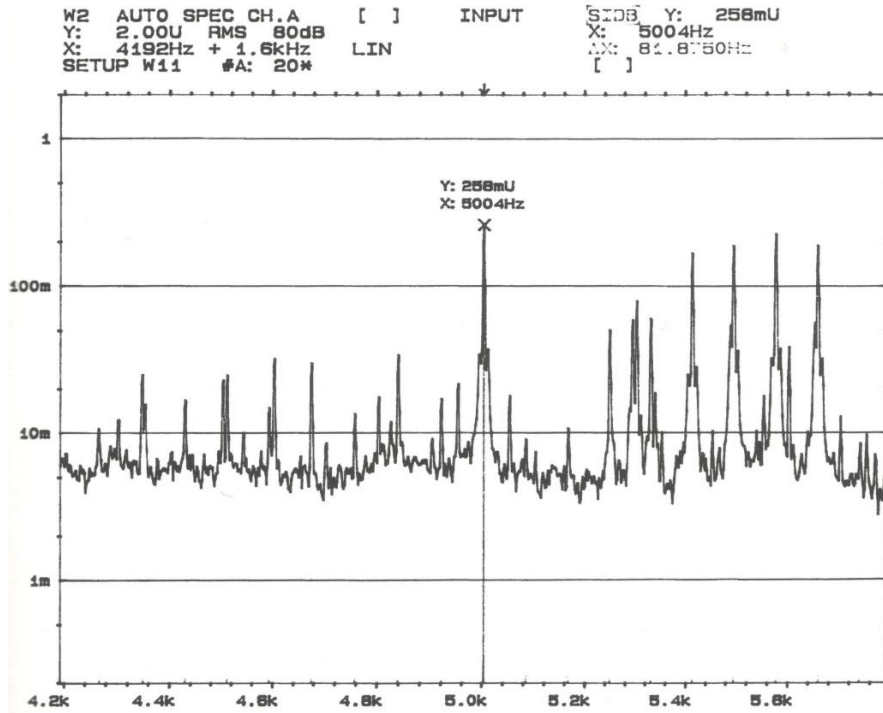


Kuva 12. Verhokäyräanalyysin periaate (ABB:n TTT-Käsikirja 2000).

#### 4.5.4 Kepstrianalyysi

Kepstri tarkoittaa logaritmisen tehospektrin Fourier-muunnoksen neliötä. Kepstri on siis logaritmisen spektrin spektri. Sillä pystytään havaitsemaan spektrin säännöllisyyksiä, lisäksi se tuo esille yhteen kuuluvat taajuudet yhtenä piikkinä, kuten kuvassa 13. Kepstrianalyysi on todettu hyvin hyödylliseksi hammaspyörien kulunvalvonnassa. (Nohynek & Lumme 2004, 76.)

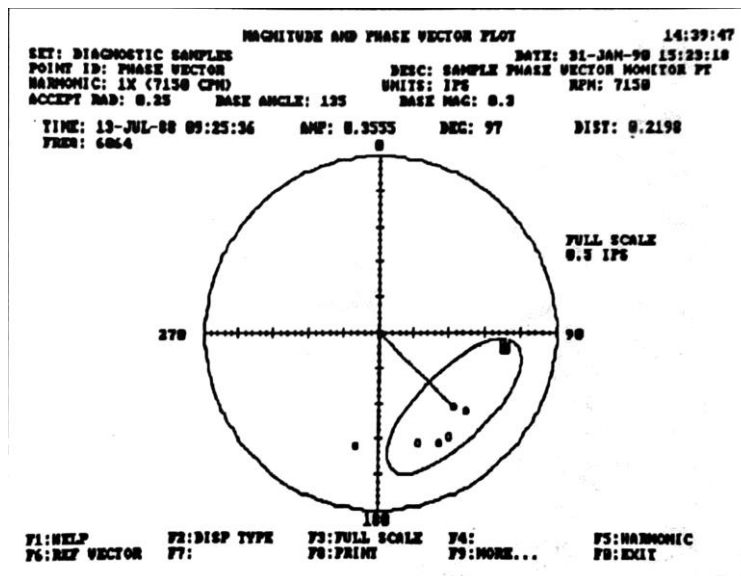




Kuva 13. Spektri (yllä) ja sitä vastaava kepstri (alla)  
 (Nohynek & Lumme 2004, 77).

#### 4.5.5 Vektorivalvonta

Kun halutaan valvoa koneen tasapainotilaa ja vikoja aiheuttavia muutoksia, kuten esimerkiksi poikittainen särö, käytetään vektorivalvontaa. Valvonta aloitetaan mittaamalla värähtelytaajuuden amplitudi ja vaihekulma. Vaihekulman mittaamisessa hyödynnetään akselin pyörimisliikkeestä saatavaa tahdistussignaalia. Kerätyistä mittausarvoista luodaan värähtelyvektori, jota voidaan tarkastella polaarikoordinaatistossa, kuten kuvassa 14. Värähtelyvektorin ympärille voidaan asettaa hälytysrajat, joiden ylittyessä saadaan hälytys. Vektorivalvonnalla on mahdollista saada hälytys tietyllä värähtelytaajuudella vaikka spektrissä tätä taajuutta vastaava amplitudi ei olisi muuttunutkaan. (Nohynek & Lumme 2004, 92-93.)



Kuva 14. Vektorivalvonta  
(Nohynek & Lumme 2004, 93).

#### 4.5.6 Aikatasovalvonta

Aikatasovalvontaa käytetään havainnoimaan iskumaisia ilmiöitä, joita spektrivalvonnalla ei pysty yhtä selvästi havaitsemaan. Valvonta perustuu näytteen muodon vertailuun. Aikatasovalvonnan onnistuminen vaatii, että mittauksissa käytetään oikeita mittaussuureita. Normaalisti, jos käytössä on kiihtyvyyssanturi, käytetään yksikkönä kiihtyvyyttä tai sen muita aikaderivaattoja. (Nohynek & Lumme 2004, 83.)

**Aikatason tunnusluvut.** Aikatasovalvonnan toteuttaminen on työlästä, koska aikatasojen vertailu täytyy tehdä silmämääräisesti. Analysoinnin nopeuttamiseksi voidaan laskea aikatason tunnuslukuja, esimerkiksi värähtelyn huippuarvo, huipusta huippuun -arvo, tehollisarvo tai huippukerroin. Tällöin tarkempi analyysi tehdään vain niille aikatasoille, joiden tunnusluvut ovat nousussa. (Nohynek & Lumme 2004, 83.)

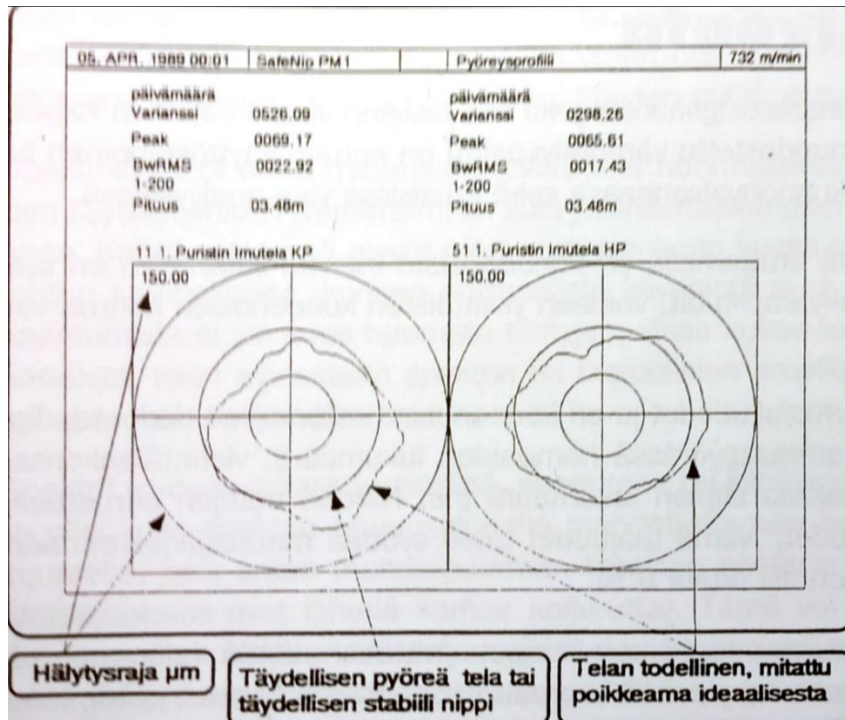
**Aikatason muoto.** Aikatasosignaali paljastaa usein muotonsa perusteella mahdolliset viat koneessa. Esimerkiksi huojunta voi liittyä moneen eri vikamahdollisuuteen, kuten sähköiseen vikaan sähkömoottorissa, nivelakselin linjauksesta tai toisesta koneesta rakenteita pitkin kantautuvasta tärinästä. Iskumuotoiset signaalit voivat paljastaa laakerivian, hammaspyörävian tai roottorin siiven osumisen pesään. (Nohynek & Lumme 2004, 84.)

On myös mahdollista että signaalin muoto on toispuoleinen, jolloin kyse voi olla mahdollisesta linjausvirheestä, hankauksesta tai löysästä liitoksesta. (Nohynek & Lumme 2004, 84.)

#### 4.5.7 Profiilivalvonta

Profiilivalvonta on paperiteollisuudessa yleisesti käytetty menetelmä telojen pyöreiden sekä huovan pinnan kunnan tarkkailuun. Sitä voidaan käyttää myös hammaspyörän kunnonvalvontaan. Mittaus tehdään tiettyyn koneenosaan suorittamalla tahdistettu aikakeskiarvostus riittävän monella signaalinäytteellä. Näin saadaan aikasarja, jossa on pelkästään tutkittavasta koneenosasta olevaa mittausdataa. (Nohynek & Lumme 2004, 86.)

Signaalia sopivasti suodattamalla saadaan esille tietoa telojen muodosta, huovan pinnan kunnosta tai hammaspyörien hampaiden kunnosta (kuva 15). Käyttämällä hälytysrajoja profiilivalvonnassa voidaan huonokuntoiset koneenosat havaita helposti. (Nohynek & Lumme 2004, 86.)



Kuva 15. Profiilivalvonta  
(Nohynek & Lumme 2004, 87).

#### 4.5.8 Ratakäyrävalvonta

Ratakäyrävalvonnalla pystytään havaitsemaan mm. epätasapaino, linjausvirhe, roottorin hankaus tai öljykalvon pyörteily. Ratakäyrä voidaan mitata asentamalla liukulaakeriin kaksi akselivärähtelyanturia säteissuuntaan 90 asteen kulmaan. Näin saadaan selville roottorin liike laakeriin nähden. Tällekin valvontamenetelmälle voidaan asettaa hälytysrajat. (Nohynek & Lumme 2004, 87.)

## 5 VÄRÄHTELYMITTAUSHARJOITUKSEN VALMISTELU

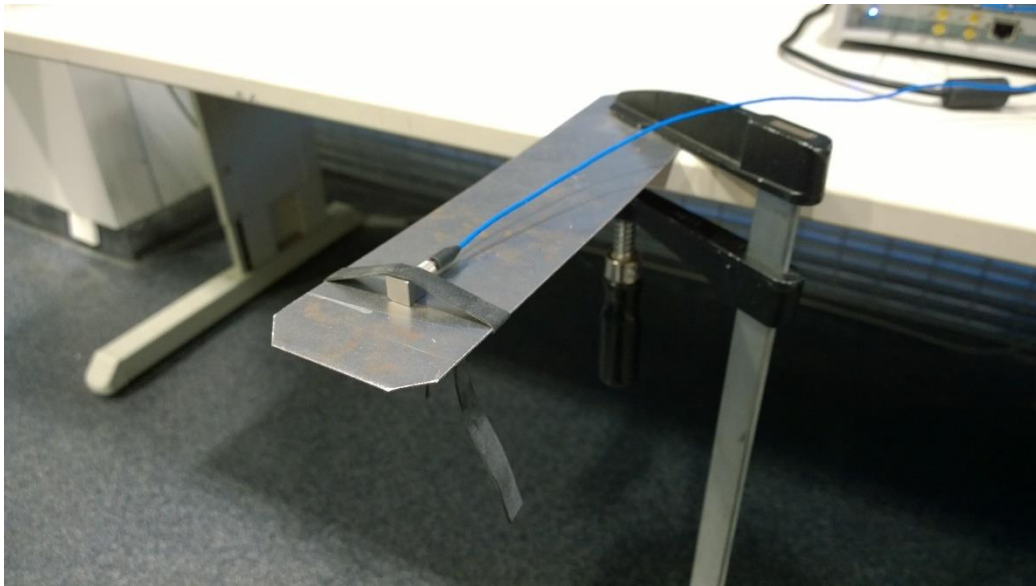
### 5.1 Värähtelymittauskohteiden valmistelu

Värähtelymittausharjoituksessa oli ajatuksena saada mallinnettua koneen laakerin värinää. Laakerin kuluminen vaatii paljon aikaa ja asioiden nopeuttamiseksi päätettiin käyttää harjoituksessa tietokoneen tuulettimia. Tässä ensimmäisessä harjoituksessa käytettiin kahta 12 voltin tuuletinta, joista toisen tuulettimen yksi lapa katkaistiin. Tämä aiheutti sopivan tasoista värinää. Näin voitiin vertailla ehjän ja vaurioituneen tuulettimen värinätaajuuksia. Tuulettimet asennettiin kiinni lautaan ja niihin juotettiin katkaisimet, että niitä voidaan käyttää vuorotellen. Kuvasta 16 näkyy toteutus valmiina.



Kuva 16. Tuulettimet asennettuna värinän mittaamiseksi

Toisena harjoituskohteena oli peltiliuska ja sen ominaisvärähtelytaajuuden mittaaminen. Peltiliuskan toinen pää kiinnitettiin pöydän reunaan. Sen vapaaseen päähän asennettiin kiihtyvyyssanturi ja levyn päätä painamalla saatiin levy värähtelemään (kuva 17).



Kuva 17. Peltiliuskan asennustapa.

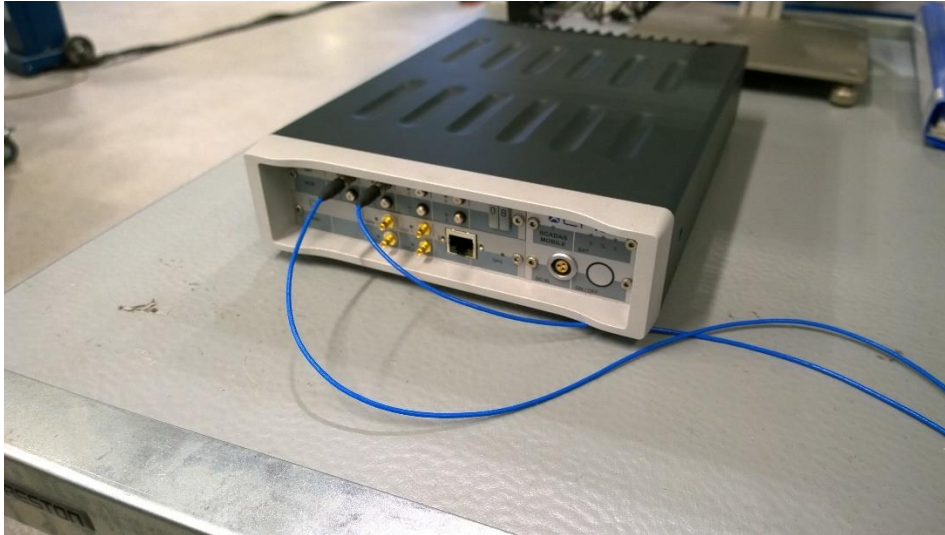
## 5.2 Mittalaitteiden esittely

Seuraavassa osiossa esitellään mittauksessa tarvittavia mittalaitteita ja ohjelmistoja.

### 5.2.1 LMS Scadas Mobile SCM01 -tiedonkeruulaite

Värähtelymittauksessa käytettiin Seinäjoen Ammattikorkeakoulun omassa käytössä olevaa LMS Engineeringin toimittamaa kannettavaa Scadas Mobile SCM01 -tiedonkeruulaitteistoa yhdistettynä PCB Piezotronicsin toimittamiin kiihtyvyyssantureihin.

LMS Scadas Mobile SMC01 -laitteistoon pystyy liittämään 8 kanavaa ja se tukee maksimissaan 204,8 kHz näytteenottotaajuutta 24-bitin resoluutiolla. Sen dynaaminen alue on 150 dB, ja laite sisältää myös sisäisen funktiogeneraattorin. (Siemens 2016.)



Kuva 18. LMS SCADAS Mobile SCM01

### 5.2.2 Kiihtyvyyssanturi PCB Piezotronics 333B32

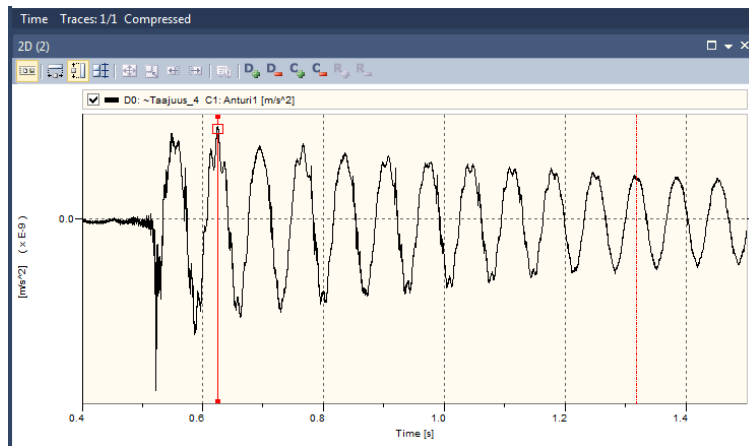
Värinän mittaamiseksi tuulettimien kylkeen sekä peltiliuskan päähän liitettiin kiihtyvyyssanturit, joiden valmistaja oli PCB Piezotronics. 333B32-mallin taajuusalue ulottuu välille 0,5 Hz–3000 Hz ja herkkyys on ( $\pm 10\%$ ) 100 mV/g (PCB [Viitattu 1.11.2016]). Muitakin antureita olisi ollut mahdollista käyttää mutta tämän anturin taajuusalue sopi parhaiten tähän mittaukseen ja niitä oli helposti saatavilla. Anturin kyljessä näkyvä nuoli oli tärkeää laittaa samansuuntaisesti värinän suhteen.

### 5.2.3 LMS Test.Xpress -ohjelmisto

LMS Test.Xpress -ohjelmisto kerää mittaustiedot Scadas Mobile SCM01 -laitteesta. Ohjelmistolla pystytään analysoimaan monipuolisesti ääntä, värähtelyä ja kestävyyttä. Se sisältää mm. reaaliaikaisen Fast Fourier Transform -analysointin, moodianalysointin iskuvasaratestausta varten, oktaavianalysointin sekä monia muita ääneen liittyviä analysointiohjelmia. Ohjelmisto tukee jopa satojen kanavien käyttöä, mutta tässä harjoituksessa käytettiin vain kahta kanavaa. (LMS Test.Xpress 2016).

### 5.3 Harjoituksen eteneminen

Harjoitus aloitettiin kytkemällä kiihtyvyyssanturi ensin kiinni peltiliuskan päähän ja käynnistämällä Scadas Mobile SCM01 -laite sekä LMS Test.Xpress -ohjelmisto. Ohjelmasta valittiin Teknologiademot-projekti, joka sisälsi valmiit asetukset. Peltiliuskaa painamalla saatiin värähtelysignaali esille Traces 1/1 Compressed -näkyymään (kuva 19).



Kuva 19. Peltiliuskan värähtelysignaali

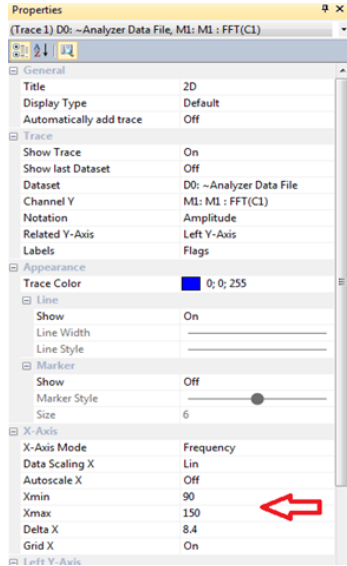
Tämän ikkunan x-akselin minimi- ja maksimiarvoja muuttamalla saatiin värähtelyä hahmotettua paremmin. X-akselin aikakoodia hyödyntämällä pystyttiin laskemaan ominaisvärähtelytaajuus. Harjoitus jatkui vielä peltiliuskan siirrolla lähemmäs pöytää ja tekemällä mittaukset uudelleen. Värähtelyn tehollisarvo voitaisiin laskea kaavalla 11 tarvittaessa. Mittauksien perusteella huomattiin, että mitä lähemmäksi pöytää peltiliuskaa siirrettiin, sitä suuremmaksi ominaisvärähtelytaajuus muuttui.

Tuulettimien värinän mittausta varten molemmat kiihtyvyyssanturit liitettiin tuulettimien kylkeen. Tätä mittausta varten projektiksi vaihdettiin Analyzer Sample LMS Test.Xpress -ohjelmasta. Seuraavaksi tuulettimet kytkettiin päälle. Oletuksena Frequency Traces 2/2 Compressed -näkyymä näyttää taajuudet laajalta alalta, joten asetuksista muutettiin X-akselin Xmin- ja Xmax-asetusta pienemmäksi, koska tuulettimien värähtely tapahtuu melko pienillä taajuuksilla (kuva 20).

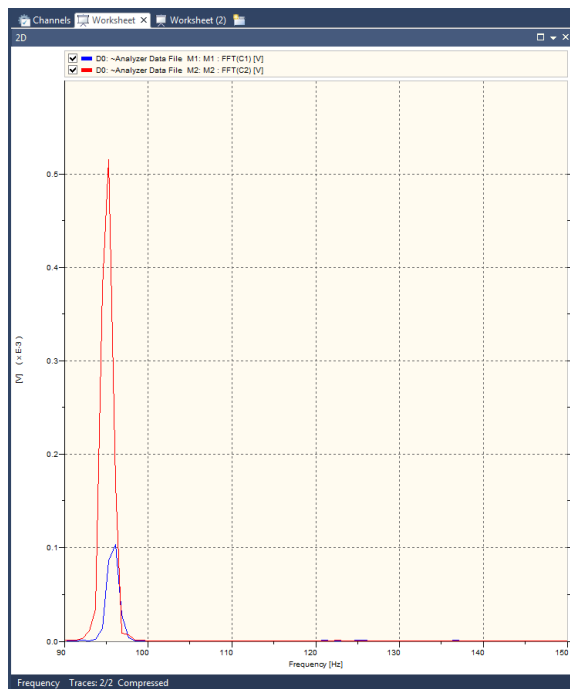
Kun tuulettimet pyörivät, voitiin värähtelysignaaleista nähdä erilaiset piikit värähtelytaajuuksissa. Tämä ero johtui toisen tuulettimen yhden lavan poistamisesta, kuten oli tarkoituskin (kuva 21).



Tämän lopputyön pohjalta luotiin laboratoriotyöohje mittaustekniikan kurssille (Liite 1), jota voidaan hyödyntää tulevien kurssien aikana.



Kuva 20. Asetusten muutos tuulettimia mitatessa



Kuva 21. Tuulettimien värähtelysignaalit

## 6 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tutustua värinän aiheuttamiin ongelmiin teollisuudessa, värähtelyn syntyyn ja sen suureisiin sekä tekniikkaan ja antureihin, joilla värinää mitataan. Työ oli mielenkiintoinen vaikka kaikki värinänmittaukseen liittyvä oli tekijälle uutta. Pelkästään teollisuuden kunnossapidosta olisi voinut kirjoittaa oppinäytetyön, aihe oli todella laaja.

Työn aikana huomasi, kuinka teollisuudessa tarvitaan nykyään paljon erilaisia antureita koneiden ennakoivassa kunnossapidossa ja kunnonvalvonnassa. Antureiden oikea valinta ei onnistu ilman ammattitaitoa, ja antureista saatava mittausdata vaatii paljon analysointikokemusta, jotta sitä pystytään hyödyntämään oikein. Automaation lisääntyessä värinänmittausta tullaan käyttämään entistä enemmän koneiden käyttöasteen kasvattamiseksi. Yksi tällainen esimerkki on IEPE-standardia tukeva Beckhoffin EL-3632-tiedonkeruukortti (kuva 22), jonka voisi liittää helposti nykyisiin logiikkaohjauksiin. Vaikka tämä helpottaa käyttöönottoa, tulosten analysointi vaatii edelleen ammattitaitoa.



Kuva 22. Beckhoff EL3632 -tiedonkeruukortti antureineen (Beckhoff Infosys [Viitattu 21.10.2016]).

Tutkimuksen harjoitusmittaukset vastasivat teollisuuden yleisiä värähtelyongelmia. Laakerin värähtelyä pystyttiin mallintamaan modifioidulla tuulettimella ja koneiden ominaisvärähtelyä mallinnettiin peltiliuskalla. Työohjetta luodessa huomasi kuinka vaikea värähtelymittauksien tuloksia oli tulkita ilman kokemusta, teollisuudessa tarvitaan historiatietoa kyseisestä komponentista tai koneesta, jotta oikean

analyysin teko onnistuu. Kaiken kaikkiaan aiheena tämä värähtelymittaus oli tosi mielenkiintoinen.

## LÄHTEET

- ABB:n TTT-käsikirja. 2000. Luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. [www-dokumentti]. ABB Oy, 2000. [Viitattu 21.10.2016]. 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)
- Beckhoff Infosys. Ei päiväystä. Beckhoff EL3632 Technical Data. [www-dokumentti]. Beckhoff Automation GmbH. [Viitattu 21.10.2016]. Saatavissa: <http://infosys.beckhoff.com/content/1033/el3632/2360114699.html?id=30952202011492023170>
- LMS Test.Xpress. 2016. LMS Test.Xpress: Siemens PLM Software. [www-dokumentti]. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. [Viitattu 1.11.2016]. Saatavissa: [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/lms/testing/test-xpress/index.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/testing/test-xpress/index.shtml)
- KnowPap. Ei päiväystä. KnowPap. [www-dokumentti]. AEL and Prowledge Oy. [Viitattu 21.10.2016]. Saatavissa: [http://tekniikka.seamk.fi/automaatio/ssivut/Pap/knowpap\\_FI.htm](http://tekniikka.seamk.fi/automaatio/ssivut/Pap/knowpap_FI.htm)
- Nohynek, P. & Lumme, V. E. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Rajamäki: KP-Media Oy.
- Opetushallitus. Ei päiväystä. Kunnossapito perusteet. [www-dokumentti]. Opetushallitus. [Viitattu 21.10.2016]. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet\\_1-1\\_mita\\_on\\_kunnossapito.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_1-1_mita_on_kunnossapito.html)
- PCB. Ei päiväystä. PCB Model 333B32. [www-dokumentti]. PCB Group Inc. [Viitattu 1.11.2016]. Saatavissa: <http://www.pcb.com/Products.aspx?m=333B32>
- SeAMK. Ei päiväystä. SeAMK Tekniikka. [www-dokumentti]. Seinäjoen Ammattikorkeakoulu oy. [Viitattu 21.10.2016]. Saatavissa: <http://www.seamk.fi/fi/SeAMK-Info/SeAMK-toimii/Yksikot/SeAMK-Tekniikka>
- SFS-EN 13306. 2010. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia 2. painos. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys ry.
- Siemens. 2016. LMS SCADAS Mobile: Siemens PLM Software. [www-dokumentti]. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. [Viitattu 21.10.2016]. Saatavissa: [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/lms/testing/scadas/mobile.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/testing/scadas/mobile.shtml)

## LIITTEET

Liite 1. Mittaustekniikan laboriotyöt: Väriänmittaus

LIITE1

Matias Kallio

## **Mittaustekniikan laboriotyöt: Väri­än­mit­taus**

Laboriotyöohje

Sy­k­sy 2016

SeAMK Tekniikka

Automaatiotekniikan Tutkinto-ohjelma

**SeAMK** 

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## SISÄLTÖ

SISÄLTÖ .....	1
1 Yleistä laboriotyöstä .....	2
1.1 Valmistautuminen.....	2
1.2 Ennakkovalmistelut .....	2
1.3 Tustustuminen aiheeseen .....	2
2 Ominaisvärähtely laboriotyö .....	4
2.1 Peltiliuskan ominaisvärähtelytaajuus.....	4
2.2 Työn eteneminen .....	4
3 Väri­nän mittaus laboriotyö.....	7
3.1 Tuulettimen väri­nän voimakkuus.....	7
3.2 Työn eteneminen .....	7

# 1 Yleistä laboriotyöstä

## 1.1 Valmistautuminen

Laboriotyön suorittamiseen on varattu aikaa 4 tuntia. Nämä neljä tuntia on varattu itse laboriotyöhön ja raporttiin tulevien tietojen kirjaamiseen. Valmistautumisvaiheessa tehdään myös mahdolliset esitehtävät

## 1.2 Ennakkovalmistelut

1. Ryhmä tutustuu tähän laboriotyöohjeeseen sekä mahdollisesti laboriolaitteistoon.
2. Tutustutaan netistä löytyvään asiaa koskevaan materiaaliin ja vastataan tässä työssä oleviin esitehtäviin.

## 1.3 Tutustuminen aiheeseen

Työn tavoite:

- Työssä tutustutaan värinän mittaamiseen, erilaisiin värähtelytaajuuksiin ja esineiden ominaisvärähtelyihin.

Mittauslaitteisto:

- LMS Scadas mobile SCM01 -mittauslaite ja PCB Piezotronics 333B32 - kiihtyvyyssanturi





#### Esitehtäviä:

- Tutustu tiedonkeruulaitteistoon ja kiihtyvyyssanturiin etukäteen
  1. Montako kanavaa LMS Scadas mobile SCM01 -laitteessa on?
  2. Mikä on SCM01:n maksimi näytteenottotaajuus?
  3. Mikä on kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate?
  4. Mikä on on PCB Piezotronics 333B32 -anturin mittausalue?

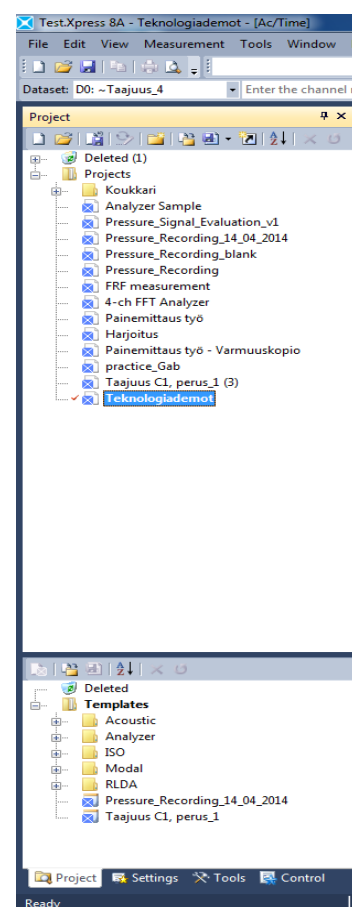
## 2 Ominaisvärähtely laboratoriotyö

### 2.1 Peltiliuskan ominaisvärähtelytaajuus

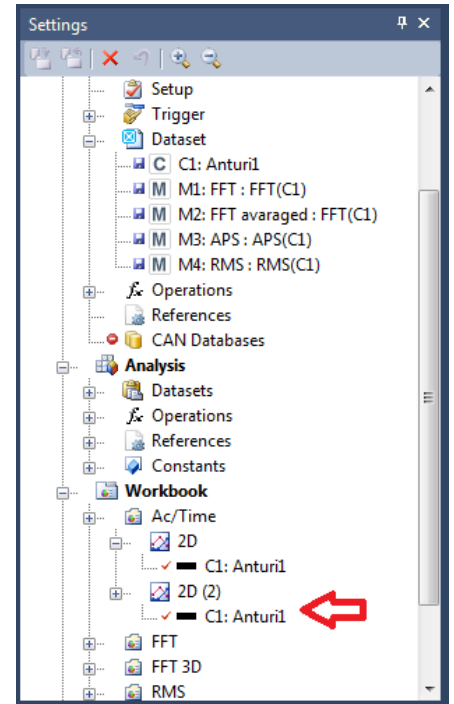
Työn tarkoituksena on mitata peltiliuskan ominaisvärähtelytaajuus kiihtyvyyssanturilla.

### 2.2 Työn eteneminen

- 1) Kiihtyvyyssanturi kiinnitetään peltiliuskan päähän kumilenkillä niin että kiihtyvyyssanturin nuoli on pystysuunnassa. Pellin toinen pää kiinnitetään liimapuristimella pöytään niin että anturin etäisyys pöydän reunasta on n. 20cm.
- 2) Kannettavaan tietokone kytketään koulun verkkoon ja kirjaudutaan sisään omilla tunnuksilla. Vaihda SCM01-laitteen verkkokaapeli tilalle ja odota hetki. Käynnistä Test.Xpress-ohjelma.
- 3) Jos yhteys ei onnistunut, sulje Test.Xpress-ohjelma ja odota muutama minuutti että verkkoyhteys muodostuu kannettavan ja SCM01:n välille. Käynnistä Test.Xpress-ohjelma uudelleen.
- 4) Kun yhteys on muodostunut, valitse Project-näkymä alareunasta ja avaa Teknologiademot-projekti.

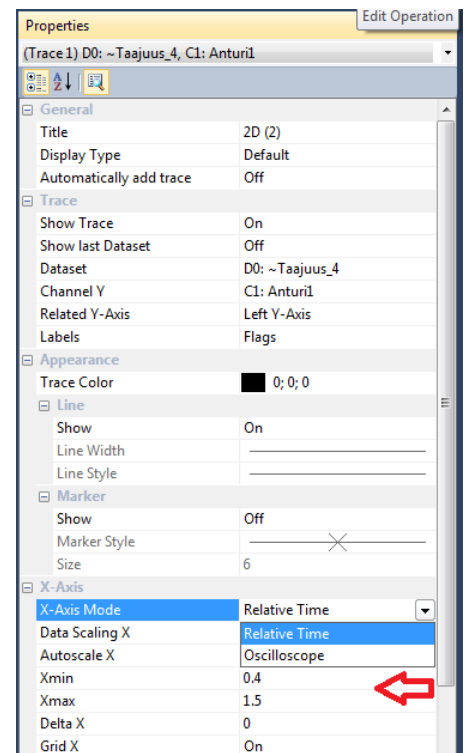


- 5) Mittaus aloitetaan painamalla Scope-näppäintä, värähtelyt näkyvät Test.Xpress-ohjelman Traces 1/1 Compressed -ikkunassa.
- 6) Jos ikkunassa ei tapahdu mitään, klikkaa hiiren oikeaa näppäintä Anturi1:n kohdalla ja valitse New Trace, ks. kuva.



- 7) Paina peltiliuskaa niin että se alkaa värähtelemään.

- 8) Muuta Xmin- ja Xmax-arvoja jotta näet värähtelyn tarkemmin, ks. kuva.



- 9) Laske ominaisvärähtelytaajuus Traces 1/1 Compressed -ikkunasta ja ilmoita tulos.
- 10) Tee samat mittaukset uudelleen niin että kiihtyvyyssanturi on 15cm ja 10cm päässä pöydän reunasta.

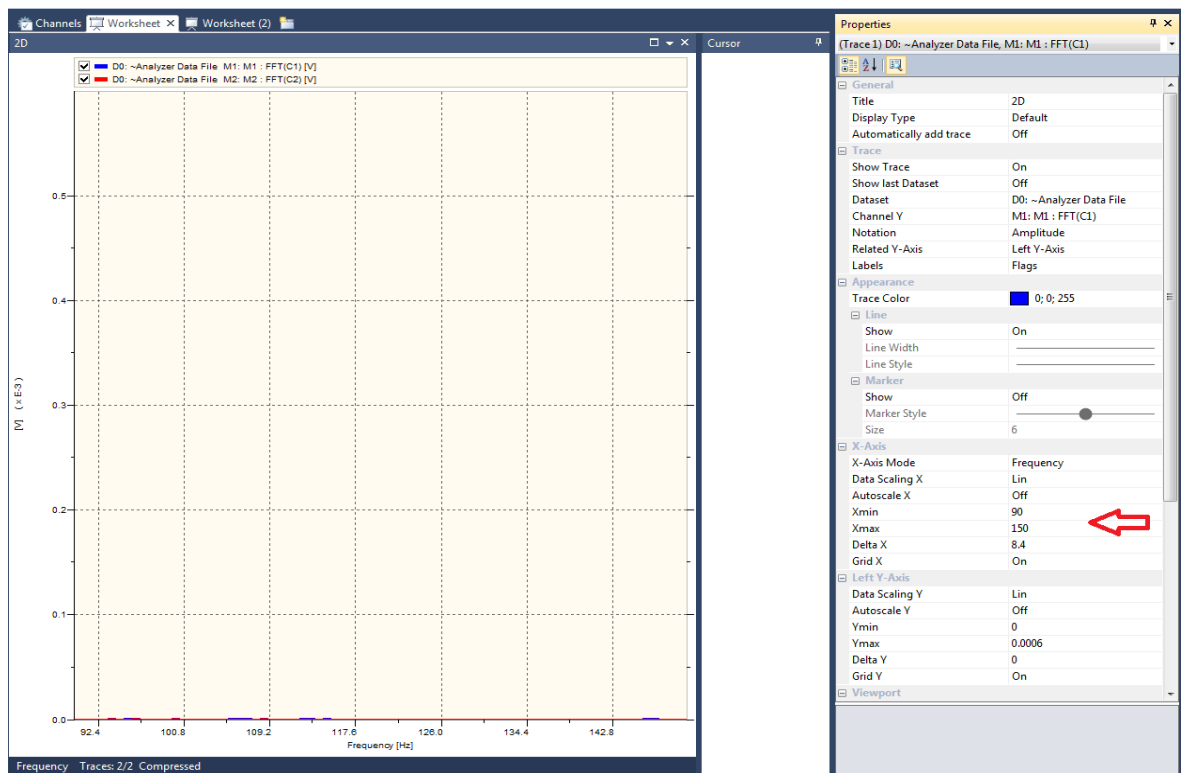
### 3 Värinänmittaus laboratoriotyö

#### 3.1 Tuulettimen värinän voimakkuus

Työn tarkoituksena on mitata tuulettimen värähtelyvoimakkuutta kiihtyvyyssanturilla.

#### 3.2 Työn eteneminen

- 1) Kiinnitä molemmat kiihtyvyyssanturit tuulettimien kylkeen kumilenkillä.
- 2) Vaihda Test.Xpress-ohjelman projektiksi "Analyzer Sample" Project-näkymästä.
- 3) Käynnistä molemmat tuulettimet.
- 4) Muuta X-axis -asetuksia pienemmiksi jotta voit havainnoida pieniä taajuuksia paremmin, ks. kuva.



- 5) Tee havainnot tuulettimien taajuudesta ja värähtelyn voimakkuudesta ja ilmoita tulokset.