



# Kunnossapitomittauksen kehittäminen

Laura Koskela

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2025

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Automaatiotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Automaatiotekniikka

KOSKELA, LAURA:  
Kunnossapitomittauksen kehittäminen

Opinnäytetyö 40 sivua, joista liitteitä 8 sivua  
Toukokuu 2025

---

Opinnäytetyössä kehitettiin kunnossapitomittausta. Mittauksia varten käytössä oli kunnossapitomittauslaite Valmet Maintenance Pad ja langattomat anturit. Opinnäytetyö toteutettiin Tampereen ammattikorkeakoulun automaatiolaboratorioon opiskelijakäyttöä varten. Työssä laadittiin uusi työohje laakerimittauksia varten ohjelmistopäivityksen tuomien muutosten vuoksi. Yhtenä keskeisimpänä uudistuksena oli uuden tasapainotustyökalun käyttöönotto.

Työohje laadittiin helposti seurattavaksi siten, että sen painopiste on mittaustulosten tulkinnessa. Ohjeen lisäksi selvitettiin langattomien antureiden käyttömahdollisuuksia automaatiolaboratorion olemassa olevien prosessien pohjalta. Soveltuvia mittauspisteitä löydettiin erityisesti Feston laitteistosta ja vesiprosessista.

Lopputuloksena on työohje, joka on mukautettavissa tulevaisuudessa muuttuviin tarpeisiin. Feston laitteiston ja vesiprosessin mittauspisteistä saatujen tulosten perusteella prosessien tilasta on kuitenkin vielä vaikea tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Langattomat anturit tarjoavat monipuolisia käyttömahdollisuuksia, mutta niiden hyödyntäminen edellyttää jatkoselvityksiä. Kokonaisuutena työ luo pohjan mittauskäytäntöjen kehittämiseksi ja langattomien antureiden laajemmalle hyödyntämiselle tulevaisuudessa.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering  
Automation Engineering

KOSKELA, LAURA:  
Maintenance Measurement Development

Bachelor's thesis 40 pages, appendices 8 pages  
May 2025

---

The purpose of this thesis was to develop maintenance measurement practices for educational use. The measurements were conducted using the Valmet Maintenance Pad and wireless vibration sensors. The thesis was commissioned by the automation laboratory of Tampere University of Applied Sciences aiming to create a new work instruction for bearing measurements due to the recent software updates. Among the most significant updates was the addition of a new balancing tool.

The work instruction was designed to be clear and easy to follow with a particular focus on the analysis of the measurement results. In addition to the instruction, the usability of the wireless sensors was explored more broadly through various laboratory processes. The suitable measurement points were identified in the Festo equipment and the water process.

The final outcome is a versatile instruction guide that can be easily adapted to future needs. However, based on the measurements from the Festo equipment and the water process, it is still challenging to draw reliable conclusions about the condition of the processes. Wireless sensors offer versatile application possibilities, but their full potential requires further investigation. Overall, this work provides a foundation for developing measurement practices and expanding the use of wireless sensors in the future.

---

Key words: valmet maintenance pad, balancing tool, bearing measurements

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	VÄRÄHTELY .....	7
2.1	Harmoninen värähtely .....	7
2.2	Vaimeneva värähtely.....	8
2.3	Pakkovärähtely.....	8
2.4	Ilmiöt mittauksien taustalla .....	9
2.4.1	Pietsosähköinen ilmiö.....	9
2.4.2	MEMS.....	11
2.5	Värähtelyn tarkastelu .....	12
2.6	Värähtelymittaukset standardeissa .....	13
2.6.1	Laakerit ja niiden vaikutus värähtelyyn .....	14
3	KUNNOSSAPITO JA KUNNONVALVONTA.....	16
3.1	Värähtelyvalvonta.....	17
3.2	Tasapainotus.....	18
3.2.1	Koemassa tasapainotuksessa .....	18
4	VALMET MAINTENANCE PAD .....	20
4.1	Langattomat anturit .....	21
5	TASAPAINOTUSTYÖKALUN KÄYTTÖÖNOTTO .....	23
5.1	Työohjeen päivittäminen ja kehittäminen .....	24
5.2	Mittauskokoontaminen laakerimittauksessa.....	25
5.3	Muut vaihtoehdot langattoman anturin käytölle .....	27
5.4	Mittauksen tekeminen käytännössä .....	30
6	TULOKSET .....	31
6.1	Laakerimittauksen työohje .....	31
6.2	Festo ja vesiprosessi.....	34
7	YHTEENVETO .....	37
	LÄHTEET.....	39
	LIITTEET .....	41
	Liite 1. Laakerimittaukset työohje.....	41

**ERITYISSANASTO**

PEH	pietsosähköiset energian kerääjät
IEPE	integroidulla elektroniikalla varustettu pietsosähköanturi
FET	kanavatransistori
MEMS	mikrosähkömekaaniset järjestelmät
peak to peak	huippuarvojen välinen ero
peak	huippuarvo
RMS	tehollisarvo
envelope	vaippakäyräanalyysi
amplitudi	signaalin maksimiarvo
sweep tool	pyyhkäisytyökalu
ProBalance	tasapainotustyökalu
Balancing tool	tasapainotustyökalu
fmax	spektrin maksimitaajuus

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää Tampereen ammattikorkeakoulun automaatiolaboratorion kunnossapitomittauksia, joita on suoritettu käyttämällä Valmet Maintenance Padia. Käytännössä Valmet Maintenance Pad on kannettava tabletti, jolla pystytään suorittamaan mittauksia suoraan halutussa työkohteessa.

Kunnossapitomittauksien ohjelmisto on päivitetty Tampereen ammattikorkeakoulun toimesta viime kevään jälkeen, jolloin vanhat ohjeet eivät ole enää päteviä. Työ pitääkin sisällään uuden tasapainotustyökalun Balancing Toolin käyttöönoton ja siten vanhan työohjeen päivittämistä. Vanha työohje on päivitetty opinnäytetyön tilaajan haluamaan muotoon.

Laboratoriotyössä on hyödynnetty uutta näkökulmaa kunnossapitomittauksien tekemisen helppoudesta. Langaton värähtelyanturi ja tabletti mahdollistavat mittauksien tekemisen missä tahansa. Ohjeistuksen ohella kartoitettiin langattomien antureiden soveltuvuutta automaatiolaboratorion olemassa oleviin prosesseihin. Parhaat mittauskohdeet löytyivät Feston laitteistosta ja vesiprosessista.

## 2 VÄRÄHTELY

Värähtely on keskeinen ilmiö fysiikassa. Värähdysliikkeellä tarkoitetaan liikettä, joka toistuu säännöllisin väliajoin ja palautuu aina tiettyyn tilaan jakson päättyessä. Värähdysliikettä on olemassa erilaisia, kuten harmonista, vaimenevaa ja pakotettua värähtelyä (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2018, 66-79.)

### 2.1 Harmoninen värähtely

Yleisesti värähtelyliikettä havainnollistetaan jousen avulla, jonka päässä jokin kappale värähtelee. Värähdysliikkeellä tarkoitetaan säännöllisesti toistuvaa liikettä, jossa kappale kulkee edestakaisin tasapainoasemansa kautta. Tasapaino-asema on piste, jossa värähtelevään kappaleeseen ei kohdistu minkäänlaisia voimia vaan kappale on siinä pisteessä levossa ilman ulkoisia häiriöitä. Amplitudilla tarkoitetaan suurinta etäisyyttä, jonka kappale saavuttaa tasapainoasemastaan värähdysliikkeen aikana. Se kuvaa liikkeen laajuutta ja kertoo, kuinka pitkälle kappale poikkeaa tasapainotilastaan. Tämän tyylisestä asetelmasta puhutaan termillä harmoninen värähtelijä (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2018, 66-67.)

Amplitudi käsitteen lisäksi värähdysliikkeen yhteydessä puhutaan jaksonajasta  $T$  ja taajuudesta  $f$ , joka lasketaan kaavalla 1 (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2018, 67)

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

Taajuuden yksiköksi saadaan kaavan 1 mukaisesti hertsi Hz.

## 2.2 Vaimeneva värähtely

Vaimenevasta värähtelystä puhutaan silloin, kun amplitudi pienenee asteittain ajan kuluessa. Vaimeneminen voi johtua värähtelijän rakenteessa esiintyvistä sisäisestä kitkasta tai ympäröivän väliaineen aiheuttamasta vastuksesta. Nämä tekijät hidastavat värähtelyä vähentämällä liike-energiaa joka kierroksella, mikä pienentää amplitudia asteittain. Lopulta liike hiipuu täysin ja värähtely pysähtyy kokonaan, kun energiaa ei enää riitä ylläpitämään liikettä (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2018, 75.)

Vaimeneva värähtely voi ilmetä eri tavoin sen mukaan, kuinka voimakas vaimennus on. Tässä yhteydessä puhutaan alivaimennetusta, kriittisestä ja ylivaimennetusta vaimennuksesta, jotka eroavat toisistaan värähtelyn käyttäytymisen perusteella (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2018, 76.)

Alivaimennetussa värähtelyssä liike on edelleen sinimuotoista, mutta amplitudi pienenee eksponentiaalisesti ajan myötä. Ylivaimennetussa värähtelyssä vaikuttava vaimennusvoima on niin suuri, että värähtelyä ei synny lainkaan. Sen sijaan kappale palaa hitaasti tasapainoasemaansa. Kriittinen vaimennus on tilanne, jossa värähtelijä palaa tasapainoonsa mahdollisimman nopeasti ilman heilahtelua. Vaimennus on juuri riittävä estämään värähtelyn jatkumisen, mutta liike ei hidastu tarpeettomasti (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2018, 66-76)

## 2.3 Pakkovärähtely

Värähtelyä, jonka energiaa ylläpidetään tai vahvistetaan jatkuvasti ulkoisen voiman avulla, kutsutaan pakkovärähtelyksi. Tällöin värähtely ei sammu itsestään, vaan ulkoinen voima syöttää energiaa liikkeen ylläpitämiseksi. Pakkovärähtelyssä värähtelyn amplitudi määräytyy järjestelmän ominaiskulmataajuuden, amplitudin ja pakkovoiman kulmataajuuden perusteella. Amplitudi saavuttaa huippuarvonsa tietyllä pakkovoiman kulmataajuudella, joka on hieman alhaisempi kuin värähtelyn ominaiskulmataajuus (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2018, 77-78.)

## 2.4 Ilmiöt mittauksien taustalla

Värähtelyanalyysi on yksi yleisimmistä ennakoivan kunnossapidon menetelmistä, sillä sen avulla viat voidaan havaita jo alkuvaiheessa. Tätä tekniikkaa hyödynnetään laajasti eri teollisuudenaloilla ja se on todettu tehokkaaksi niin pyöri-  
vien kuin kiinteidenkin laitteiden kanssa, jatkuvien tuotantoprosessien sekä rakennusrakenteiden seurannassa. Värähtely on voiman synnyttämää liikettä suhteessa tasapainoasemaan ja voi olla joko jaksottaista tai satunnaista. Koneiden normaalitoiminta aiheuttaa vaaratonta värähtelyä, jonka amplitudi vaihtelee laitteen rakenteen ja kuormitustason mukaan. (Chu ym., 2024.)

### 2.4.1 Pietsosähköinen ilmiö

Pietsosähköinen ilmiö tarkoittaa sitä, että tietyt kiteet ja keramiikkamateriaalit, kuten vaikka sinkkioksidi muuttuu sähköisesti varautuneeksi, kun sitä puristetaan tai venytetään tiettyyn suuntaan. Tämä jännitys aiheuttaa sähkömekaanisen vuorovaikutuksen eli tällöin mekaaninen voima muuttaa materiaalin sähköisiä ominaisuuksia ja synnyttää sähkövirran tai jännitteen materiaalin rakenteessa. (Li ym., 2014.)

Tarkemmin sanottuna pietsosähköisillä materiaaleilla onkin kiteinen rakenne, jossa negatiivisten ja positiivisten varauksien painopisteet ovat eri kohdissa. Tällä tavalla syntyy dipolimomenteja, jotka puolestaan synnyttävät sähkövarauksia silloin kun niitä sisältäviin aineisiin kohdistuu mekaanista rasitusta. Pietsosähköiset materiaalit jaetaan neljään ryhmään niiden rakenteellisten ominaisuuksien perusteella. Nämä ryhmät ovat komposiitit, keraamit, polymeerit ja yksikiteet. Kun ferromagneettiset materiaalit alittavat Curie-lämpötilan se saa aikaan luonnostaan syntyviä dipoleja, joka on merkki optimaalisista pietsosähköisistä ominaisuuksista. Ferrosähköisillä yksikiteillä, komposiiteilla ja keramiikoilla on paremmat pietsosähköiset ominaisuudet kuin polymeereilla. Polymeereilla on kuitenkin vahvuutena niille ominainen joustavuus, jonka avulla ne kestävät suurempaa rasitusta. (Li ym., 2014.)

Erilaisissa sovelluksissa hyödynnetään pietsosähköisiä energian kerääjiä (Piezoelectric Energy Harvesters, PEH), jotka muuntavat värähtelyenergiaa sähköksi. Värähtelyenergian kerääjä toimii periaatteessa samalla tavoin kuin elektroninen virtalähde, joka saa elektronit kulkemaan sähköpiireissä. Näissä laitteissa mekaanisen energian muuntaminen sähköksi tapahtuu sähkömekaanisen vuorovaikutuksen avulla. Tähän on olemassa neljä pääasiallista menetelmää, joista yksi on pietsosähköinen muunnosmekanismi. (Liang ym., 2021)

Resonanssipohjaiset pietsosähköiset energian kerääjät tuottavat paljon energiaa, sillä resonanssi kasvattaa huomattavasti värähtelyjen laajuutta ja voimistaa pietsosähköisiin materiaaleihin kohdistuvaa rasitusta. Resonanssi vahvistaa siis värähtelyamplitudia, mikä lisää kiderakenteessa tapahtuvaa jännitystä ja venymää pietsosähköisen ilmiön aikana. Tällöin tuloksena on suuri energiantuotto. (Liang ym., 2021.)

Useimmissa pietsosähköisen energian kerääjien sovelluksissa energialähteet värähtelevät matalalla taajuudella tai niiden kiihtyvyys on vähäistä. Ohut ja tasainen rakenne parantaa pietsosähköelementin kykyä reagoida tukirakenteen liikkeisiin sekä vähentää laitteen kokoa ja painoa. (Li ym., 2014.) Kuitenkin käytännön sovelluksissa kerääjiltä odotetaan nykyään laajaa taajuuskaistaa. (Liang ym., 2021.)

Pietsosähköistä ilmiötä hyödynnetään myös IEPE-antureissa. IEPE terminä tulee englannin kielen sanoista Integrated electronics piezo electric. IEPE-antureihin on nimensä mukaisesti sisäänrakennettu esivahvistin, joka sijaitsee suoraan anturin rungossa. IEPE-anturin sisältämä kanavatransistorin (FET) hila on yhdistetty pietsosähköiseen kide-osaan. IEPE-anturin rakenne mahdollistaa, että se sietää mataliakin kohinasoja verrattuna MEMS-antureihin. (Griessmann ym., 2022.)

## 2.4.2 MEMS

Micro-electro-mechanical systems (MEMS) ovat järjestelmiä, joissa yhdistyvät mekaaniset ja elektroniset komponentit. Mekaaninen osa toimii liikkuvana elementtinä, kun taas elektroninen osa muuntaa mekaanisen liikkeen sähköiseksi signaaliksi. Yksinkertaistetusti MEMS-järjestelmä sisältää pienen mittakaavan rakenteita, toimilaitteita, elektroniikkaa ja antureita. (Hajare ym., 2022.)

MEMS-laitteiden toimintaperiaatteena on, että ulokepalkki on yhdistetty seismiseen massaan ja laitteen sisälle jääneet jäännöskaasut toimivat vaimennuselementtinä. Ulkoisen kiihtyvyyden vaikutuksesta massa siirtyy luonnollisesta asenostaan, ja tätä siirtymää mitataan analogisesti tai digitaalisesti. Yleensä mittaus perustuu kapasitanssin muutokseen kiinteiden ja seismisiin massoihin liitettyjen palkkien välillä. Lisäksi kiihtyvyydianturin akselien määrä eli onko kyseessä yksiakselinen vai moniakselinen malli määrittää sen kuinka kiihtyvyyden voimakkuus ja suunta havaitaan. (Binali ym., 2024.)

MEMS-antureiden vahvuutena on pieni koko, kevytrakenteisuus ja alhainen virrankulutus, jotka tekevät niistä suorituskykyisiä. Ne ovat tunnettuja myös luotettavuudestaan, kustannustehokkuudestaan sekä erinomaisesta iskujen ja värinän sietokyvystään. Niiden mikroskooppisen pienet rakenneosat mahdollistavat tehtäviä, joihin perinteiset anturit eivät pysty. MEMS-antureiden erot pietsosähköisiin malleihin ovat pienempi koko ja selvästi alhaisemmat kustannukset. Anturit on suunniteltu siten, että massan suureneminen vähentää ominaistaajuutta ja laajentaa massan liikealuetta. Yleisesti ottaen kiihtyvyydianturin kyky mitata suuria kiihtyvyyksiä heikentää sen herkkyyttä, lisäten kohinaa ja laajentaen kaistanleveyttä. Tarkkuuden kasvaessa taas herkkyyys paranee, kohina vähenee ja kaistanleveys supistuu. (Binali ym., 2024.)

MEMS-laitteiden monipuoliset tunnistusominaisuudet mahdollistavat laajan valikoiman sovelluksia, kuten paineen, kiihtyvyyden, lämpötilan ja kosteuden mittaamisen. Lisäksi ne pystyvät mittaamaan sähköisiä ja mekaanisia suureita hyödyntämällä kapasitiivisia MEMS-teknologioita. Nykyään uudet kiihtyvyydianturit hyödyntävät ahkerasti juurikin MEMS-teknologiaa ja yksi merkittävä tämän teknologian hyödyntäjiä on autoteollisuus. Autoteollisuuden lisäksi MEMS-ratkaisuja

käytetään erilaisissa sovelluksissa, jotka liittyvät muun muassa robotiikkaan, värähtelyseurantaan, lentokoneiden vakautukseen ja jopa biolääketieteeseen. (Binali ym., 2024.)

## 2.5 Värähtelyn tarkastelu

Värähtelysignaalien analysointiin on kehitetty useita menetelmiä, joista valitaan sopivin signaalin ominaisuuksien ja seurattavan kohteen perusteella. Tavoitteena on tuottaa tarkka ja informatiivinen värähtelyprofiili, jossa kohina on minimoitu. Värähtelyprofiilin muodostamiseen käytetään menetelminä, joita ovat muun muassa diskreetti Fourier-muunnos ja envelope analysis eli verhokäyräanalyysi. (Chu ym., 2024.)

Varsinkin verhokäyräanalyysillä pystytään tunnistamaan varhaisessa vaiheessa olevat viat. Verhokäyrävalvontaa voidaan myös käyttää analysointimenetelmänä kun on kyse hyvin korkeista taajuuksista eli yli 20 kHz. (PSK 5706, 2024, 65-67.)

Aikatasoinen profiili eli aaltomuoto esittää amplitudin ajan suhteen ja kuvaa värähtelysignaalin kokonaispoikkeamaa millä tahansa hetkellä, mutta yksittäisten värähtelylähteiden erottaminen voi olla vaikeaa. Taajuustasoinen profiili eli spektri näyttää amplitudin taajuuden funktiona ja muodostetaan muuntamalla aikatasoinen signaali Fast Fourier Transform -algoritmillä. Tämä prosessi hajottaa värähtelysignaalin erillisiksi taajuuspiikeiksi, joiden tunnistaminen on olennainen osa värähtelyanalyysiä. (Chu ym., 2024.)

Värähtelyprofiileja analysoidaan tutkimalla eri parametreja ja on olemassa kolme värähtelyominaisuutta, joita seurataan erityisesti. Nämä ovat amplitudi, taajuus ja vaihe. Taajuus ilmaisee, kuinka monta värähtelyjaksoa värähtelylähde tuottaa tietyssä ajassa kun taas vaihe kuvaa kahden samalla taajuudella tapahtuvan ilmiön välistä ajallista eroa. Värähtelyprofiileja tarkastellaan yhdessä eri näkökulmien avulla, jotka ovat vertailuanalyysi, trendiseuranta ja signature analysis. Trendiseuranta käsittää saman mittauksen historian vertailua nykytilanteeseen pitkältä ajalta. Vertailuanalyysissä verrataan vähintään kahden mittausdatan vertaamista toisiinsa. (Chu ym., 2024.)

Amplitudi on värähtelyn suurin poikkeama tasapainoasemasta, ja se kuvaa värähtelyn voimakkuutta. Se voidaan mitata nopeutena, siirtymänä tai kiihtyvyytenä. Siirtymä kuvaa, kuinka paljon kappale poikkeaa tasapainoasemastaan ja sitä käytetään erityisesti alle 10 Hz:n taajuuksilla, joissa liike on hidasta mutta laajaa. Siirtymää mitataan yleensä huipusta huippuun (peak to peak) tai huippuarvona (peak). Taajuuden kasvaessa keskeiseksi muuttuu nopeus, joka ilmaisee siirtymän muutoksen ajan suhteen. Tämä mittaussuhteiden menetelmä soveltuu parhaiten 10–1000 Hz:n alueelle, jossa värähtelyssä yhdistyvät sekä liike että voima. Nopeutta mitataan tehollisarvona (RMS) tai huippuarvona (peak). Vielä korkeammilla yli 1000 Hz:n taajuuksilla tarkastellaan kiihtyvyyttä, joka kertoo nopeuden muutosnopeuden ajan suhteen. Kiihtyvyyttäkin mitataan tehollisarvona ja huippuarvona. (Chu ym., 2024.)

Lisäksi standardissa PSK 5706 kerrotaan, että kiihtyvyyttä erityisesti suositellaan käytettäväksi mittaussuhteiden menetelmänä silloin kun ylärajataajuus on yli 1000 Hz ja matalilla taajuuksilla alle 10 Hz tärinää voidaan seurata siirtymänä.

Tärinän mittaamiseen voidaan käyttää joko yksikanavaista tai monikanavaista menetelmää, joista kumpikin soveltuu eri käyttötarkoituksiin. Yksikanavaisessa mittauksessa tärinätiedot tallennetaan peräkkäin, yksi kanava kerrallaan. Tämä edellyttää, että koneen värähtely ja dynamiikka pysyvät vakiona koko mittauksen ajan, mikä vaikeuttaa mittaussuhteiden keskinäisten vaikutusten ja toimintaympäristön muutosten havainnointia reaaliajassa. Monikanavainen mittaus ratkaisee tämän keräämällä dataa samanaikaisesti kaikista pisteistä, tarjoten tarkemman analyysin ja kokonaisvaltaisemman kuvan koneen värähtelykäyttäytymisestä. (Chu ym., 2024.)

## 2.6 Värähtelymittaukset standardeissa

Värähtelymittauksia varten on olemassa PSK-standardeja, jotka liittyvät erityisesti kunnonvalvonnan värähtelymittauksiin.

Sopivan anturityypin määrittelyssä on olennaista tarkastella koneen rakennetta, arvioida sen osien todennäköisiä vikoja ja tunnistaa niihin liittyvät värähtelytaajuuudet. Värähtelytaajuuden avulla tiedetään kuinka herkkä anturin täytyy olla,

jotta se soveltuu käytettäväksi suunniteltuun kohteeseen. Värähtelymittauksissa käytettäviä anturityyppejä ovat kiihtyvyy-, siirtymä- ja iskusysäysanturit. Hyvin tyypillisiä ovat kiihtyvyyksianturit, joiden valinnassa täytyy kiinnittää huomiota taa-juusalueeseen, amplitudialueeseen ja toimintaympäristöön. Toimintaympäristön suhteen on olennaista tietää tilaluokka, lämpötila, kosteus, likaisuus ja esiintyvä sähkömagneettisia häiriötekijöitä. Anturin valinnassa myös anturin sijoituspaikan ominaisuuksilla on merkitystä, jotka vaikuttavat millainen anturi fyysisiltä ominaisuuksiltaan kiinnityksineen soveltuu haluttuun mittauskohtaan. (PSK 5703, 2024, 27-28.)

Oikean mittauspisteen valinta on tärkeää värähtelymittauksen suorittamisen kannalta. Hyvän mittauspisteen valinnassa täytyy ottaa huomioon mittausanturin ja värähtelylähteen välinen etäisyys, joka on syytä olla pienin mahdollinen. Kun on kyse pyörivistä massoista, joissa värähtelyä havaitaan mittausrungossa täytyy mittauspisteeksi valita kohta laakerointikohdista. (PSK 5702, 2024, 23.)

Kannettavilla mittalaitteilla ja liikuteltavilla antureilla voidaan suorittaa kohteiden valvontaa, jotka ovat helposti saavutettavissa ja tällaisten kohteiden vikaantumisen etenee hitaasti verrattuna mittausvälin tiheyteen. Yleisesti ottaen mittausvälin määrityksessä on syytä huomioida kohteen kriittisyys, häiriöalttius, käytössä oleva valvontamenetelmä ja seurantahistoria. Uusissa kunnonvalvonta tapauksissa kannattaa valita aluksi melko tiheä mittausväli, koska on vaikea tietää millainen mittausväli uuteen kohteeseen olisi sopiva ja mittausväliä voi tarvittaessa harventaa. Tilanteissa, joissa seurannassa huomataan selkeää kehitystä tavanomaisesta tämän seurauksena täytyy lyhentää mittausväliä tai seurata muutosta jollakin toisellakin menetelmällä. (PSK 5705, 2024, 54-55.)

### **2.6.1 Laakerit ja niiden vaikutus värähtelyyn**

Laakereita esiintyy yleisesti osana akselilinjaa. Laakereiden tarkoituksena on hallita akselin pyörivää liikettä ohjaten ja tukien. Laakereita on olemassa paljon erilaisia riippuen käyttökohteesta ja halutuista ominaisuuksista. Laakerit voidaan jakaa kahteen tyyppiin, jotka ovat vierintälaakerit ja liukulaakerit. Nämä päätyypit eroavat toisistaan rakenteensa ja toimintaperiaatteensa perusteella. Vierintälaa-

kereissa on vierintäelementtejä, kuten kuulia tai rullia, jotka liikkuvat sisä- ja ulkorenkkaan välissä. Liukulaakereissa taas ei ole vieriviä osia, vaan akseli liukuu suoraan laakeripintaa vasten. (Ansaharju 2009, 135.)

Pyörivät koneet ovat keskeisessä roolissa valmistusteollisuudessa ja laakerit vaikuttavat merkittävästi niiden suorituskykyyn. Laakereiden tehtävänä on vähentää liikkuvien osien välistä kitkaa, mikä parantaa koneen toimintaa ja kestävyyttä. Oikean laakerityypin valinta on tärkeää, sillä se vaikuttaa koneen luotettavuuteen ja toimintaan erityisesti värähtelyolosuhteissa. Lisäksi laakerien yhteensopivuus muiden osien, kuten akselin ja laakeripesän kanssa on olennainen tekijä koneen tehokkuuden kannalta. (Rudrapati ym., 2017.)

Varsinkin laakerivikoja tunnistettaessa voidaan käyttää analysointitapana envelopeingia. Tämän tekniikan avulla ylipäästösuodatin erottelee spektrin korkeataajuisemman osan, tuoden esiin huippuarvot, jotka saattaisivat muuten jäädä huomaamatta muun signaalin seasta. (Chu ym., 2024.)

### 3 KUNNOSSAPITO JA KUNNONVALVONTA

Teollisuuden kunnossapito takaa laitteiden ja prosessien luotettavan toiminnan vähentämällä tuotantokatkoksia ja ehkäisemällä vikatilanteita. Kunnossapito tärkeää erilaisten asioiden kannalta kuten turvallisuuden, ympäristön, tehokkuuden ja laadun. (Järviö & Lehtiö 2017, 17-18.)

Kunnossapito lajitellaan korjaavaan- ja ehkäisevään kunnossapitoon. Korjaava kunnossapito kattaa sekä välittömät että siirretyt huoltotoimenpiteet, jolloin siihen sisältyy ongelman tunnistaminen, syyn selvittäminen, vaurion paikantaminen, korjaustoimenpiteet sekä laitteen tai järjestelmän palauttaminen normaaliin toimintakuntoon. Ehkäisevä kunnossapito taas jaetaan jaksotettuun ja kuntoon perustuvaan kunnossapitoon. (Järviö & Lehtiö 2017, 46-51.)

Ehkäisevällä kunnossapidolla on suuri rooli kun puhutaan kunnossapidosta. Ehkäisevä kunnossapito sisältääkin tarkastustoimia, käyttöympäristön ylläpitoa, ennakoituja korjauksia sekä laitteiden päivityksiä ja parannuksia nykyaikaisemmiksi. Näiden toimien avulla mahdollinen vikaantumisen havaitaan ennen kuin siitä aiheutuu häiritsevää haittaa toiminnalle. Tällainen kunnossapito on yleensä suunnitelmallista toimintaa, jolloin pyritään hallittuun prosessiin ja lisäämään järjestelmän luotettavuutta. (Järviö & Lehtiö 2017, 50, 99-101.)

Kunnossapidon yhteydessä puhutaan kahdesta termistä vikaantumisesta ja viasta. Yleisesti sanottuna vika ajatellaan lopputilana, joka on seurausta vikaantumisesta. Vikaantuminen tarkoittaa tilannetta, jossa kohde ei pysty suorittamaan sen tehtävää niin kuin se normaalisti suorittaisi. Vikaantuminen käsitetään nopeasti etenevänä tilanteena. (Järviö & Lehtiö 2017, 71.)

Kunnossapito käsittää laajasti myös taloudellisen näkökulman. Kunnossapitoon voidaan sisällyttää välilliset ja välittömät kustannukset. Välillisiin kustannuksiin kuuluvat ylimitoitettut varastot, ennakoimattomat henkilöstömenot kuten ylityökustannukset sekä heikkolaatuiset tuotteet, jotka vaativat uudelleentyöstämistä. Välittömät kustannukset liittyvät työkustannuksiin, käytettyihin varaosiin, materiaaleihin ja työvoimakuluihin. (Järviö & Lehtiö 2017, 184.)

Ehkäisevään kunnossapitoon kuuluu keskeisesti kunnonvalvonta, jossa seurataan järjestelmän tai laitteen kuntoa jatkuvasti sen luotettavuuden ja toimintakyvyn varmistamiseksi. Kunnonvalvonnan avulla halutaan tunnistaa mahdolliset viat ennen kuin ne aiheuttavat laitteiden toimimattomuuden sillä tasolla mihin pyritään. Kunnonvalvontaa suoritetaan erilaisten mittalaitteiden lisäksi näönvaraisesti tarkastellen ja automaatiojärjestelmillä seuraten. Kunnonvalvontamenetelmiä on tarjolla valtavasti erilaisia, joista valita käyttötarkoitukseen sopiva. Voidaan mitata lämpöä, virtausta, painetta ja vaikkapa tärinää sekä monia muita ilmiöitä tarpeen mukaan. Yleisimpiin mittaushetkeisiin lukeutuvat pumput, venttiilit ja moottorit. (Heinonkoski 2013, 186-187.)

### **3.1 Värähtelyvalvonta**

Kunnonvalvonnan värähtelymittauksia suunniteltaessa on otettava huomioon monta asiaa. On tarkoituksenmukaista tiedostaa millainen kunnonvalvonnan tarve on juuri siinä ympäristössä mihin mittauksia suunnitellaan tehtäväksi. Kohteiden valintaa ohjaa tunnetusti erilaiset tekijät. Tekijöitä voidaan tarkastella eri näkökulmista, jotka ovat ympäristö, turvallisuus ja kustannustekijät liittyen kunnossapitoon ja tuotannon menetyksiin. Arvioitavaa on myös se millaisille laitteille värähtelyvalvontaa on mahdollista toteuttaa ja mitä laitteita on kriittistä valvoa säännöllisesti. Laitteille tehtävään mittaussuunnitelmaan kirjataan valvontajärjestelmät ja -menetelmät ja menetelmien raja-arvot, mittausvälit, mittauksien toteutus käytännössä ja dokumentointi. (PSK 5705, 2024, 50.)

Värähtelymittauksien toteuttamista mietittäessä on pohdittava kuinka laitteiden kuntoa pystytään arvioimaan värähtelymittauksilla. Tekninen toteutettavuus kattaa useita keskeisiä tekijöitä. Täytyy olla olemassa raja-arvoja ja muutoksia, jotka voivat viitata vikaantumiseen. Vian kehittymistä täytyy voida seurata ja ennakoida jollakin tavalla. Lisäksi tekninen toteutettavuuteen sisältyy myös kyky voida suorittaa mittauksia tiheämmin ennen kuin vika aiheuttaa vauriota. (PSK 5705, 2024, 50.)

## 3.2 Tasapainotus

Tasapainotuksen tavoitteena on laitteen värähtelyn pienentäminen. Yhden tason tasapainotus on toimintatapa, jossa jäykän roottorin painonjakaumaa säädetään yhdessä tasapainotustasossa siten, että jäljelle jäävien epätasapainojen kokonaisvaikutus pysyy määritellyissä rajoissa. Yhden tason tasapainotuksen lisäksi on käytössä menetelmä, jossa tasapainotus tehdään kahdessa tasossa. (PSK 5720, 2024, 2015-2016.)

Epätasapainon voi havaita muun muassa värähtelyn kasvamisesta, jolloin voidaan todeta värähtelyamplitudin suurenemisen olevan suoraan verrannollinen epätasapainon kasvuun kun kyse on pyörimisestä vakiopyörimisnopeudella. Varsinkin jos on epävarmaa onko kyseessä epätasapaino siihen tehokas ratkaisu on vaihe-eron seuranta. Vaihe-eromittauksessa tutkitaan pyörimistaajuudella kahden eri mittauspisteen värähtelyn vaihe-eroa. Tällöin kun vaaka- ja pystysuuntaisessa värähtelyssä havaitaan suunnilleen 90-asteen vaihe-ero tietystä laakerista katsottuna voidaan todeta, että syyllinen voi olla epätasapaino. Epätasapainon voi sekoittaa myös muihin vikoihin, joita voivat olla akselin taipuma, sähköiset ilmiöt ja linjausvirhe. (PSK 5720, 2024, 2015-2016.)

Tasapainotuksessa arvioidaan roottorin värähtelyamplitudi sen pyörimisnopeudella sekä vaihekulma akselilla olevan tunnisteen suhteen. Tasapainotukseen vaikuttavat yhtä lailla häiriötekijöitä, joita voivat olla kuorman, pyörimisnopeuden tai lämpötilan vaihtelut ja vaikkapa epävakaa amplitudi tai vaihekulma. Roottorin kuntoon liittyy myös riskejä, jotka ovat yksi häiriötekijä. (PSK 5720, 2024, 217.)

### 3.2.1 Koemassa tasapainotuksessa

Koemassaa hyödyntämällä voidaan selvittää, miten tunnettu massa vaikuttaa värähtelyyn. Tarkoitus tasapainotuksen tekemisellä koemassalla on saada selville millaisia muutoksia täytyy tehdä, että päästään eroon mahdollisesta epätasapainosta. Tunnetun koemassan avulla voidaan selvittää sekä korjausmassan oikea paikka että sen tarvittava suuruus. Koemassan painolla on merkitystä ja sopiva

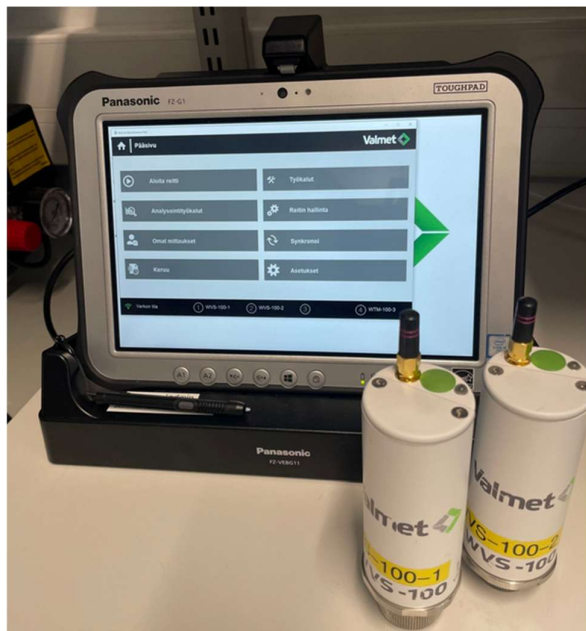
massa on silloin kun saadaan noin 20 prosentin muutos vaihekulmaan tai amplitudiin. Koemassan suuruus voidaan määrittää jo tunnetun tiedon perusteella kuten tasapainotusdokumenteilla. (PSK 5720, 2024.)

Yhden tason tasapainotuksen mittaus aloitetaan tekemällä alkutilannemittaus. Alkutilannemittauksen jälkeen lisätään koemassa, jonka paino tiedetään tarkasti. Molemmissa mittauksissa analysoidaan amplitudia ja vaihekulmaa. Tasapainotusohjelmistot osaavat laskea automaattisesti korjausmassan suuruuden tuloksien perusteella tai korjausmassa voidaan laskea vektorilaskennan avulla. (PSK 5720, 2024.)

#### 4 VALMET MAINTENANCE PAD

Valmet Maintenance Pad (kuva 1) on laite, jolla voidaan mitata ja analysoida värähtelyyn perustuvia mittauksia yhdessä langattomien antureiden kanssa. Laitteesta käytetään vaihtoehtoisesti nimitystä keruulaite, joka on kosketusnäyttöinen tablettitietokone. Laitteella mitattujen mittausten tulosten yhteyteen voidaan kirjata kommentteja ja liittää kuvia kunnonvalvonnan tueksi. Mittaustulokset tallennetaan tietovarastoihin, jolloin ne voidaan yhdistää kahdensuuntaisesti muiden käytössä olevien keruulaitteiden kanssa. Useiden keruulaitteiden synkronoinnin mahdollisuus mahdollistaa sujuvamman tulosten dokumentoinnin ja tarkastelun. Käyttöjärjestelmänä on Microsoft Windows.

(Valmet Oyj, Valmet Maintenance Pad käyttöohje, 2022.)



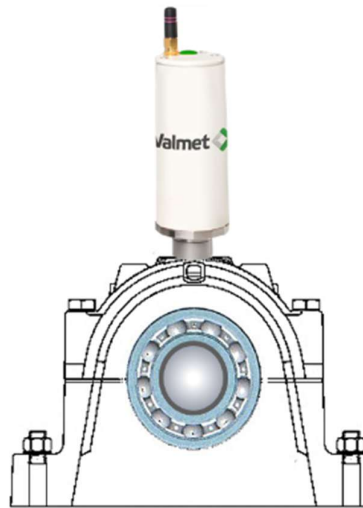
KUVA 1. Valmet Maintenance Pad ja WVS-100 anturit.

Tällä hetkellä markkinoilla olevan ohjelmiston toiminnallisuuksiin lukeutuvat yhden ja kahden tason tasapainotukset, ristikanavavaihemittaus, signaalin visualisointityökalu, pyyhkäisytyökalu (sweep tool) ja mittaustietojen automaattinen tallennus. Ohjelmistossa on itsessään analysointityökalu, mutta on olemassa toinenkin analysointikäyttöön käytettävä työkalu nimeltään Analysis Workbench.

## 4.1 Langattomat anturit

Mittauksia varten käytetään langattomia antureita, jotka ovat yhteydessä keruulaitteeseen WLAN hotspot- verkon avulla. Näitä langattomia antureita on kolmea erilaista, jotka ovat laukaisumoduuli nimeltään WTM-100, mittausmoduuli WMM-100 ja värähtelyanturi WVS-100. Langattomien antureiden avulla tietoa voidaan kerätä mittauskohteista asetettujen aikavälien mukaan. Anturi voi kerätä tietoa keruulaitetta varten yhteyden puutteesta huolimatta anturin ja keruulaitteen välillä. (Valmet Oyj, Valmet Maintenance Pad käyttöohje, 2022.)

WVS-100 anturissa on kaksi värähtelymittaukseen tarkoitettua komponenttia, jotka ovat MEMS- ja pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi. Pietsosähköinen on omiaan mittaamaan korkeita taajuuksia ja MEMS-anturi soveltuu käytettäväksi matalampien taajuuksien mittauksissa. Laakerimittauksessa anturille soveltuva mittauspaikka on esitetty kuviossa 1, jossa näkyy mittauksen kannalta tarkoituksenmukainen sijainti anturin asennukselle. (Valmet Oyj, Wireless Vibration Sensor, 2022.)



KUVIO 1. WVS-100 anturin paikka laakeriin nähden (Valmet Corporation).

Kuviosta 1 nähdään, että anturi voidaan sen alaosassa olevan sisäänrakennetun magneetin avulla kiinnittää suoraan laakerin yläpuolelle värähtelymittausta varten. Kuvan mukainen mittauspaikka edellyttää kuitenkin sen, että magneetti pystyy

tarttumaan materiaaliin tukevasti. Vaihtoehtoisesti anturin voi kiinnittää myös jollakin vastaavalla ja teknisesti hyväksyttävällä tavalla PSK-standardien mukaisesti, ottaen huomioon asennusympäristön vaatimukset ja käyttötarkoituksen.

IEPE-antureiden kanssa voidaan käyttää mittausyksikkönä WMM-100-anturia, joka soveltuu erityisesti teollisiin kunnonvalvontasovelluksiin ja monipuolisiin mitaustarpeisiin. WMM-100 lukee IEPE-antureiden tuottamaa värinädataa reaaliaikaisesti, ja muuntaa tämän datan analogisesta muodosta digitaaliseksi hyödyntäen sisäänrakennettua A/D-muunnosta. (Valmet Oyj, Wireless Measurement Module, 2022.)

Langatonta anturia nimeltään WTM-100 käytetään tahtipulssin mittausyksikkönä. Tahtipulssiantureina WTM-100 kanssa voidaan hyödyntää erilaisia magneettisia, optisia tai induktiivisia antureita. WTM-100 anturia käytetään yhdessä pulssianturin kanssa, joka liitetään kaapelilla anturiin. WTM-100 anturia käytetään muun muassa pyörimisnopeuden mittaamiseen. (Valmet Oyj, Wireless Trigger Module, 2022.)

## 5 TASAPAINOTUSTYÖKALUN KÄYTTÖÖNOTTO

Tampereen ammattikorkeakoulun automaatiolaboratoriossa päivitettiin Valmet Maintenance Pad ohjelmisto kevätlukukauden 2024 jälkeen. Valmet Maintenance Padia on käytetty opetustarkoituksiin laboratoriotyökurssilla, joka perustuu oppimiseen käytännön kautta.

Värähtelymittaustyö tuo laboratoriotyö valikoimaan monipuolisuutta, koska toisenlaista samantyylistä työtä ei tällä hetkellä ole, jossa hyödynnetään ja opetellaan käyttämään värähtelymittausantureita. Työn tarkoituksena on ollut tutustua kunnonvalvontamittauksiin, jollaisia voitaisiin tehdä oikeasti teollisuudessa. Värähtelymittausanturit ovat kätevä työkalu, joita on helppo käyttää ja työ on ollut hyvin toteuttavissa oppilaitosympäristössä.

Työn aiheena ollut akselin tasapainotus ja laakerivikojen tunnistaminen MPad-ohjelmalla. Yhden tason tasapainotus tapahtuu standardin PSK 5720 mukaisesti. Maintenance Padin käyttöä on harjoiteltu mittauslaitteiston kanssa, johon kuuluu taajuusmuuttaja, moottori, akselilinja. Akseliliinjan kuuluu säätölevyt, jotka sijaitsevat linjan molemmissa päissä sekä kaksi kiekkoa.

Ohjelmistomuutoksen seurauksena jotkin toiminnot muuttuivat oleellisesti ja käyttöön tuli myös uusia ominaisuuksia. Yhtenä oleellisena muutoksena akselintasapainotuksessa käytettävä tasapainotustyökalu vaihtoi muotoaan. Entinen tasapainotustyökalu ProBalance vaihtui työkaluun nimeltä Balancing tool.

Nämä kaksi tasapainotustyökalua poikkeavat toisistaan toiminnaltaan siinä määrin, että aiempaa osaamista ja käytännön kokemuksia ei voitu sellaisenaan hyödyntää uuden tasapainotustyön toteutuksessa. Eroavaisuudet työkalujen välillä edellyttivät, että lähestymistapaa oli mukautettava ja työn kulku suunniteltava uudelleen uuden työkalun ominaisuuksien mukaisesti. Tämä korosti tarvetta perehtyä tarkemmin uuden työkalun käyttöperiaatteisiin ennen varsinaisen mittaus- ja tasapainotustyön aloittamista.

## 5.1 Työohjeen päivittäminen ja kehittäminen

Automaatiolaboratorion työohjeeseen haluttiin selkeää muutosta edelliseen ohjeeseen verrattuna. Valmet Maintenance Pad pitää sisällään uusia erilaisia ominaisuuksia ja työtä haluttiin uudistaa monipuolisemmaksi. Tällöin koko laboratoriotyön kehittäminen lähti alkuun suunnittelulla.

Pääajatuksena oli alusta asti, että työ olisi eheä katsaus kunnonvalvontaan. Ei mitään liian vaikeaa, mutta kuitenkin tarpeeksi monipuolista. Työohjeen laadinnassa oli selvää, että siitä on tehtävä yksinkertainen ja helposti seurattava, vaikka kokonaisuus on laaja. Ajallisesti työstä mietittiin sellainen, jonka pystyy suorittamaan noin neljän tunnin aikana. Työohjeesta haluttiin aikarajankin takia sellainen, että työn eri vaiheet pystyy nopeasti suorittamaan ja itse tulosten analysoinnin voi tehdä myöhemmin raportin kirjoitusvaiheen yhteydessä.

Suunnittelun tarkoituksena oli selventää ajatuksia työn suhteen. Ensimmäisenä tarkastelussa oli se mikä pysyy samana verrattuna edelliseen toteutukseen. Samana pysyi mitattavana oleva mittausasetelma. Tähän jo ennestään käytetty mittausasetelman säilyttäminen oli luonnollinen valinta, koska se edustaa laakerimittausta, joka on yleinen kunnonvalvonnan kohde.

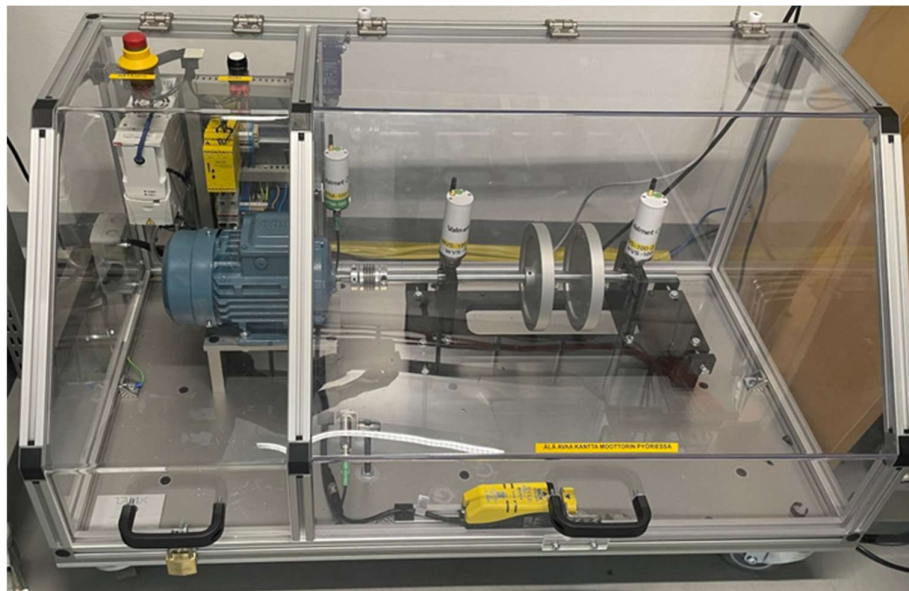
Laakerimittaus on helposti toteutettavissa ympäristössä, jossa käytettävä tila on rajallista eikä kovin isoille mittauslaitteistolle ole helposti löydettävissä paikkaa muiden laitteiden joukosta. Mittausasetelman ja -laitteiston kompaktisuus onkin tässä tapauksessa merkittävä etu. On myös järkevää hyödyntää jo sitä mitä on saatavilla varsinkin kun toista käyttötarkoitusta kyseiselle laitteistolle ei vielä ole.

Tarkasteltaessa mittausjärjestelyä turvallisuuden näkökulmasta voidaan todeta, että olosuhteet pysyivät vakaina myös tältä osin. Olemassa oleva mittausasetelma on arvioitu turvalliseksi, sillä siinä on huolellisesti huomioitu kaikki keskeiset turvallisuustoimenpiteet. Erityistä huomiota on kiinnitetty pyöriviin osiin liittyviin riskeihin. Näiden osien suojaus on toteutettu kattavasti siten, että niihin pääsy on estetty koteloinnilla sekä turvalukituksella. Koko laitteisto on koteloitu ulkopuolelta, mikä minimoi altistumisen liikkuville komponenteille.

Turvalukitusmekanismi estää kotelon oven avaamisen vahingossa tai vaarallisessa tilanteessa. Oven avaaminen edellyttää käyttäjältä tietoisia toimenpiteitä, sillä sitä ei voi avata suoraan. Ennen oven avaamista on painettava erillistä painiketta, joka sijaitsee kotelon päällä. Tämä varmistaa, että oven avaaminen tapahtuu hallitusti ja tarkoituksellisesti, mikä lisää käyttöturvallisuutta. Tämä estää huolimattoman käytön tai vahingossa tapahtuvan oven avauksen käynnissä olevan laitteen aikana.

## 5.2 Mittauskokoontalo laakerimittauksessa

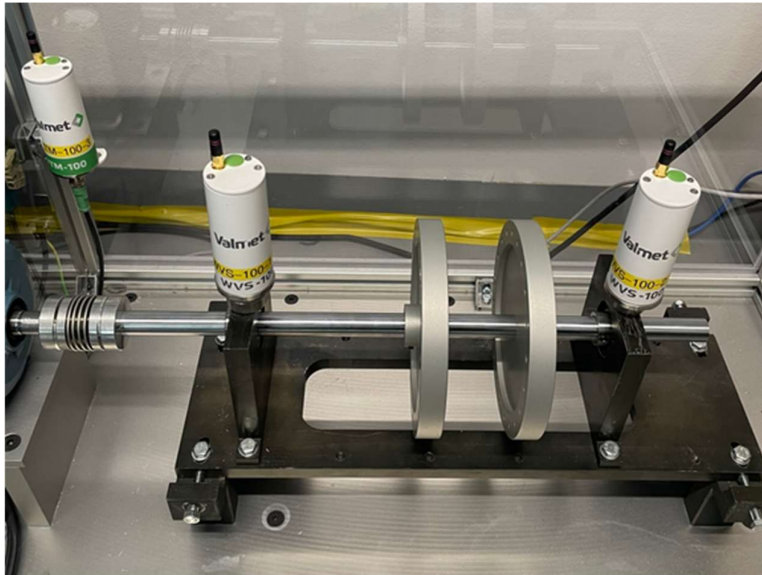
Laakerimittauksen mittausasetelma (kuva 2) koostuu kahdesta selkeästi erillisestä lohkoista, jotka on erotettu toisistaan läpinäkyvällä suojalevyllä. Tämä kirakas levy toimii sekä turvallisuuselementtinä että mahdollistaa näkymän lohkojen välillä mittauksen aikana. Ensimmäisessä lohkoissa sijaitsee ABB:n sähkömoottori, jota ohjataan taajuusmuuttajan avulla. Kyseinen lohko vastaa akseliliinjan pyörivän liikkeen tuottamisesta mittausta varten.



KUVA 2. Mittausasetelma.

Toisessa lohkoissa sijaitsee varsinainen mittauskohde, joka on akseliliinja ja siihen liittyvät komponentit (kuva 3). Akseliliinjaan sisältyy paljegytkin, kaksi laakeripukkia akselin molemmin puolin, säätölevy sekä kaksi tasapainokiekkoa. Nämä

osat muodostavat kokonaisuuden, jonka avulla voidaan tutkia laakereiden käyttäytymistä erilaisissa kuormitus- ja pyörimisolosuhteissa.



KUVA 3. Akselilinja.

Mittauspenkin turvallisuuteen on kiinnitetty erityistä huomiota. Ensimmäisen lohkon koteloinnin päältä löytyy sekä oven avaamiseen tarkoitettu nappi että selkeästi merkitty hätäpysäytyspainike. Nämä varmistavat, että mittaukset voidaan suorittaa turvallisesti myös mahdollisten poikkeustilanteiden sattuessa. Lohkot itsessään estävät sen jos jotakin sattuisi hajoamaan ja sinkoilemaan ympäriinsä niin käyttäjään ja moottoriin kohdistuva vaara on otettu huomioon ja pyritty minimoimaan tällä tavalla.

Langattomien antureiden sijainti näkyy kuvassa 4 tarkemmin, jolloin WVS-100 antureiden paikat sijaitsevat laakereiden yläpuolella ja WTM-100 anturi lohkon nurkassa. WTM-100 anturi toimii tahtipulssin mittausyksikkönä, jolloin anturin alhaalta lähtee kaapeli niin sanotulle triggeranturille, joka tässä tapauksessa on lfm toimittama OGP701 anturi. Triggeranturin tarkempi sijainti näkyy kuvassa 2, joka sijaitsee oven turvakytimen ja lohkojen väliseinän välillä. Tämä triggeranturi tunnistaa signaalin, joka syntyy aina, kun paljekyllin pyörähtää tietyn kohdan ohi. Signaalin perusteella WTM-100 anturi mittausmoduulina laskee pyörimisnopeuden, joka välittyy edelleen käyttäjille luettavassa muodossa.



KUVA 4. Antureiden WVS-100 ja WTM-100 paikat tarkemmin.

Kuvasta 4 on nähtävillä WVS-100 anturin mittauspaiikka, joka on laakerin yläpuolella kuvion 1 mukaisesti. Mittauksissa laakerina mittauspäin molemmissa päissä on käytössä SKF YAT 204, joka on urakuulalaakeri ja kuuluu vierintälakereihin.

### 5.3 Muut vaihtoehdot langattoman anturin käytölle

Ajatuksena oli, että Valmet Maintenance Pad voisi helppokäyttöisyytensä ja langattomien antureidensa ansiosta soveltua hyvin myös muuhun kuin perinteisiin laakerimittauksiin. Tämän mahdollisuuden selvittämiseksi kartoitettiin eri vaihtoehtoja käytännön kokeilujen kautta. Testaamalla laitetta toisenlaisissa kohteissa pyrittiin hahmottamaan, millaisia tuloksia ja havaintoja sen avulla voidaan saada laakerimittausten ulkopuolelta. Näin saatiin alustavaa käsitystä sen soveltuvuudesta laajemmin.

Käytännön kokeiluja toteutettiin automaatiolaboratoriossa kahden erilaisen prosessin parissa, jotka olivat Feston laitteisto (kuva 5) ja suuremman mittaluokan vesiprosessi (kuva 6). Kokeilujen lähtökohtana oli kartoittaa molemmista järjestelmistä sopivia mittauspisteitä, joita voitaisiin hyödyntää ja ymmärtää prosessien

toiminnan kannalta paremmin. Tämä mahdollisti erilaisten mittaustapojen ja langattomien antureiden käytännön soveltamisen sekä prosessien vertailun.



KUVA 5. Feston kokonaisuus.



KUVA 6. Vesiprosessi.

Feston valmistama prosessiautomaation laitteistokokonaisuus, joka koostuu neljästä toisiinsa liitetystä asemasta: suodatus-, sekoitus-, reaktori- ja pullotusasemasta. Näistä asemista koostuvan kokonaisuuden tarkoituksena on mallintaa

nesteenkäsittelyä teollisuudessa. Suodatusasema on suunniteltu erityisesti jäteveden käsittelyä varten, vaikka opetuskäytössä nesteenä toimii vesi. Prosessin alussa suodatusaseman on tarkoitus poistaa jätevedestä liukenemattomat epäpuhtaudet. Neste pumpataan säiliöstä suodattimelle, joka erottaa likapartikkelit. Suodatettu vesi ohjataan joko prosessikäyttöön tai takaisin vesisäiliöön. Suodatin puhdistetaan huuhteluprosessilla, jossa paineilma irrottaa epäpuhtaudet ja palauttaa ne vesisäiliöön.

Tämän jälkeen neste siirtyy sekoitusasemalle, jossa yhdistetään eri nesteitä. Asema koostuu kolmesta varastointisäiliöstä ja yhdestä sekoitussäiliöstä. Nestet johdetaan venttiilien ja pumpun kautta sekoitukseen, jossa virtausta valvotaan anturilla. Sekoitettu neste voidaan siirtää eteenpäin tai palauttaa varastointiin.

Reaktoriasemalla ohjataan tarkemmin prosessin vaiheita, kuten sekoitusta, kuumennusta ja jäähdytystä. Asema sisältää reaktorisäiliön, pumpun, lämpötila-anturin, jäähdyttimen ja sekoittajan. Reaktorissa neste käsitellään lopulliseen muotoonsa ennen pullotusta.

Viimeisenä asemana laitteistokokonaisuudessa on pullotusasema. Pullotusasemalla valmis neste siirretään mittaussäiliöön, jossa ultraäänianturi seuraa nestepintaa. Kun oikea määrä on saavutettu, solenoidiventtiili avautuu ja neste virtaa pulloon. Pullot liikkuvat kuljetushihnalla ja täyttö tapahtuu aikaohjatusti tarkkuuden takaamiseksi.

Toinen sovelluskohde oli vesiprosessi, joka on automaatiolaboratorion isoimpia prosesseja. Vesiprosessi pitää sisällään taajuusmuuttajan, ala-, keski- ja yläsäiliön, pumppuja ja venttiilejä. Vesiprosessilla voidaan havainnollistaa pinnankorkeuden säätöön liittyviä säätötekniikan periaatteita, kuten prosessiviiveitä, vasteaikoja sekä erilaisten ohjausmenetelmien vaikutuksia.

#### 5.4 Mittauksen tekeminen käytännössä

Valmet Maintenance Pad soveltuu helposti siirrettävyytensä takia monipuolisesti erilaisten kunnonvalvonnan mittauksien tekemiseen. Mittauksia varten voidaan luoda erilaisia mallipohjia, joiden avulla ei tarvitse jokaisella kerralla täyttää samoja tietoja samantyyppisiä mittauksia varten. Mittauksen kulkuun voidaan määritellä muitakin toimenpiteitä kuin värähtelymittauksia, kuten visuaalisia tarkastuksia.

Tiivistettynä värähtelymittausta tehtäessä mittauksen kulku määräytyy seuraavasti. Ensin luodaan kone, joka voidaan tehdä mallipohjan pohjalta tai luoda täysin uusi kone. Koneen luonnin jälkeen luodaan reitti koneelle. Itse mittaus tapahtuu aloittamalla reitti. Lopuksi mittauksien tuloksia voidaan tarkastella analyysityökaluja käyttämällä ja tuloksien tulkintaa voidaan helpottaa määrittelemällä etukäteen hälytysrajoja. Hälytysrajat voivat käsittää signaalin suurinta arvoa huippuarvoa tai muita määritettyjen mittauksien tuloksia kuten manuaalisesti tehtävän lämpötila mittauksien lukemia.

Koneen jokaiselle mittauspisteelle voidaan määrittää myös yksityiskohtaisemmat ominaisuudet. Mitattavan mittauspisteen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa monipuolisesti, jotka yksilöivät jokaisen mittauspisteen kuten voidaan antaa sen identifioiva nimi. Nimen lisäksi on muitakin vaihtoehtoja. Muokattavia ominaisuuksia on moninaisesti, joista suurin osa liittyy mittaustapahtumiin ja varsinaisiin tuloksiin eli tässä tapauksessa spektriin. Tällaisia tietoja ovat spektriviivojen lukumäärä, spektrin maksimitaajuus ( $f_{max}$ ) ja mittauksen pituus sekunteina. Mikäli on kyse laakerimittauksesta voidaan lisätä tarkemmin millainen laakeri on kyseessä.

## 6 TULOKSET

Tämän opinnäytetyön tuloksina voidaan pitää laakerimittauksen uutta työohjetta ja joitakin kokeellisia testauksia joiden pohjalta automaatiolaboratorion toimintaa voidaan kehittää jatkossakin. Kaiken tutkitun perusteella voidaan todeta, että varsinainen mittausprosessi toteutetaan vahvasti PSK-standardien mukaisesti ja niiden ohjeistusta noudattaen.

Koska tämän työn tarkoituksena on ensisijaisesti oppimisen tukeminen, ei ollut tarpeellista käyttää kahta tasapainotustyökalua samanaikaisesti vain varmistaakseen, että tulokset ovat täsmälleen oikeita. Lisäksi tässä tapauksessa ei olisi käytännössä ollut mahdollistakaan käyttää Balancing Tool ja ProBalancea yhtä aikaa. Tämän työn kannalta yksittäisten mittaustulosten tarkka sisältö ei ole ratkaisevassa asemassa, sillä ne voivat vaihdella eri käyttäjillä paljonkin. Sen sijaan merkityksellisempää on se, millaisia johtopäätöksiä ja havaintoja näistä tuloksista osataan tehdä.

### 6.1 Laakerimittauksen työohje

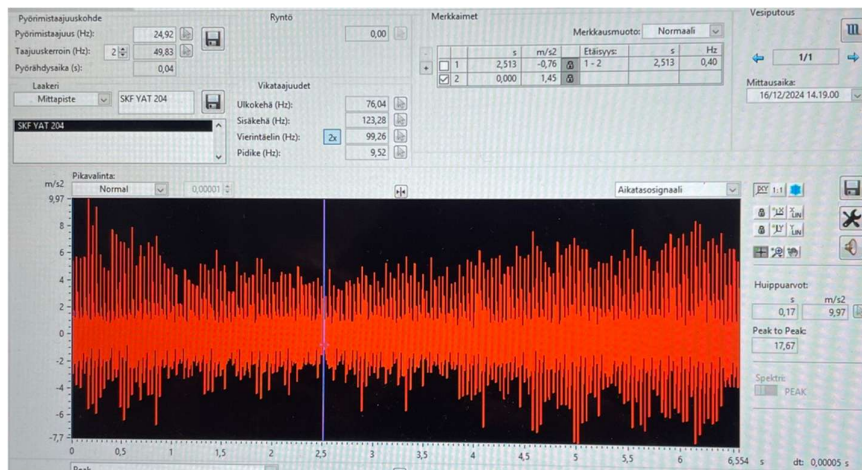
Laakerimittauksen työohje koki muutoksen ja mittauksen pohjalta syntyi uusi työohje (liite 1). Työohjeen rakenne on kokonaan uudistettu. Uutta ohjeessa on erityisesti tasapainotuksen toteuttaminen uudella menetelmällä sekä mittaustietojen keruu uuden keruutoiminnon avulla. Työohje on pyritty laatimaan mahdollisimman selkeäksi ja helposti noudatettavaksi, jolloin sen suorittaminen on tehtävä vaihe vaiheelta.

Pääpaino onkin mittauksien perusteella saatujen tuloksien analysoinnilla. Tällöin on ollut täysin tietoinen valinta, että juuri tähän työohjeeseen ei sisälly kauheasti soveltamista ja avoimia kysymyksiä. Tärkeintä on keritä suorittamaan mittaukset niin, että niiden tuloksien perusteella pystytään tekemään johtopäätöksiä. Lähtökohtana ohjeen laadinnassa on ollut se, että käyttäjä kohtaa sekä laitteiston että mittaustavan ensimmäistä kertaa, minkä vuoksi ohje etenee loogisesti ja tukee oppimista kun uutta asiaa tulee paljon.

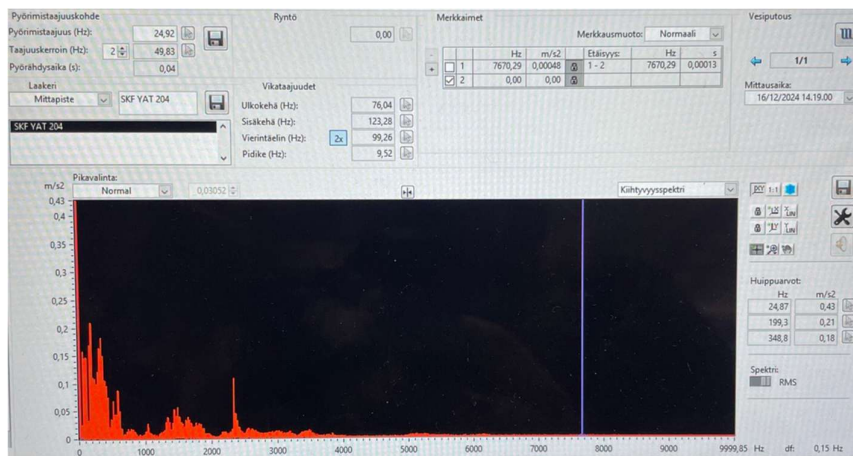
Analysoitavana on laakerin mittaus, jossa käytetään kahta laakeria sijoitettuna mittauspenkin molempiin päihin. Lisäksi keruutoiminnolla tehtävissä mittauksissa suoritetaan kolme mittausta saman keruun aikana, mikä mahdollistaa tulosten vertaamisen keskenään ja lisää analyysin luotettavuutta kun mukana on rinnakkaisia tuloksia. Kyseessä on siis yksi anturi, joka mittaa keruun aikana kolme kertaa. Erilaisten kokeilujen perusteella kerääjän käyttämisessä järkevintä oli laittaa mittausten lukumääräksi kolme, tiedonkeruun mittausväliksi 15 sekuntia ja anturin hereilläoloajaksi kuusi sekuntia. Näillä tiedoilla ja pyörimisnopeudella 800 rpm laitteisto kestää pidempi aikaisen kuormituksen hyvin ja kokonaisuudessaan mittaus ei kestä liian kauaa.

Työohjeessa on otettu huomioon laitteiston kestävyys, jolloin erityisesti keruutoiminto mittauksissa pyörimisnopeuden suuruuteen on kiinnitetty huomiota. Pyörimisnopeus 800 rpm on valittu kokeilujen pohjalta. Laitteisto ei ole kestävyydeltään sellainen, että se kestäisi pitkän rasituksen korkealla pyörimisnopeudella tai että sitä kannattaisi kuormittaa liikaa. Työohjeessa kuitenkin käytetään korkeampaa pyörimisnopeutta 1500 rpm laakerin kunnan tutkimisen mittauksissa, mutta kyseenomaisessa mittauksessa sen kesto on todella lyhyt. Pyörimisnopeuden taantumisesta mittauksen suorittamiseen kuluu vain joitakin kymmeniä sekunteja.

Analysis Workbench analysointityökalussa voidaan tulkita mittauksista saatuja tuloksia. Tuloksien pohjalta on nähtävillä esimerkiksi mittauksen aikatasosignaali (kuva 7) ja kiihtyvyyssignaali (kuva 8). Kuvissa on siis yhdestä laakerimittauksesta esimerkkisignaalit. Analysointi-ikkunassa on nähtävillä vikataajuudet, joka sisältää vierintäelimen, pidikkeen, ulko- ja sisäkehän vikataajuudet hertsinä. Nämä vikataajuudet ohjelma osaa laskea mittauksen perusteella.



KUVA 7. Aikatasosignaali.



KUVA 8. Kiihtyvyyssignaali.

Kuvien 7 ja 8 signaaleista voidaankin nähdä, että vikataajuudet ovat ulkokehällä 76 Hz ja sisäkehällä 123 Hz. Voidaankin todeta, että arvoina ne ovat melko korkealla ja laakeri ei ole uudenveroisessa kunnossa vaan jo aikaa nähnyt. Laakerin heikentynyt kunto antoi itsestään viitteitä jo mittauksen aikana kuuluvina ääminä, joista herää epäily laakerin kuntoon liittyen. Ääni oli epätasainen verrattuna ehjän laakerin normaalikäyntiin. Tämä havainto sai aikaan epäilyn vauriosta jo ennen varsinaisia mittaustuloksia, jotka myöhemmin vahvistivat äänihavainnon oikeaksi.

Työohjeen ennakkotehtävissä on muutama kysymys, joista yksi liittyy siihen mistä tunnistaa laakerivian. Poikkeava ääni voi olla varoitusmerkkinä laakerivian. Kunnan arviointiin järkevä keino on seuranta, jolloin nähdään miten laakerivika kehittyy kun arvot nousevat pikkuhiljaa.

## 6.2 Festo ja vesiprosessi

Molemmista prosesseista löydettiin potentiaalisia mittauspisteitä ja niiden kautta saatiin kerättyä myös jonkin verran alustavaa mittausdataa. Tulokset näistä mittaustuksista antavat enemmänkin suuntaa siitä, että jonkinlaista tärinää on havaittavissa näissä prosesseissa ja sitä pystytään mittaamaan langattoman WVS-100 anturin avulla. Kuitenkaan tämänhetkisten tulosten pohjalta ei voida tehdä selkeitä ja luotettavia johtopäätöksiä prosessien tilaan liittyen.

Taulukkoon 1 on kerätty mittaustuloksia mittauspisteestä (MP1), joka sijaitsee Feston suodatusaseman levyliustiventtiilin päällä (kuva 9). Mittauspisteeksi paikka valikoitui WVS-100 anturin helposti kiinnitettävyyden vuoksi, jolloin anturi pysyi hyvin paikoillaan magneetin avulla.



KUVA 9. Mittauspiste 1 Feston suodatusasema

Muitakin mittauskohteita oli mukana, mutta tulosten tulkintaan valikoituivat lopulta nämä kaksi, jotka soveltuivat tarkasteluun parhaiten selkeytensä ja informatiivisuutensa ansiosta. Tuloksia tarkastellaan tässä tapauksessa kiihtyvyyden huipparvon avulla eli suurimpana hetkellisenä kiihtyvyytenä, jonka anturi on rekisteröinyt mittausjakson aikana.

TAULUKKO 1. Mittauspiste 1 Feston suodatusaseman levyluistiventtiili

Mittauspiste	Peak (m/s <sup>2</sup> )
MP1	0,175
MP1	0,652
MP1	0,525
MP1	0,695
MP1	90,09
MP1	0,665

Taulukosta 1 nähdään, että Pääosin mittaustulokset ovat jääneet alle arvon 1 m/s<sup>2</sup>, mikä viittaa siihen, ettei venttiilissä tapahtunut aktiivista liikettä mittaushetkellä. Mittausdatasta on havaittavissa kuitenkin yksi poikkeava tulos. Tämä poikkeava arvo on 90 m/s<sup>2</sup>, joka ei ole linjassa muiden tulosten kanssa tässä samassa mittaussarjassa ja on huomattavan korkea tulos.

Kyseisen venttiilin mittaus on tehty siten, että yritetty saada taltioitua hetki jolloin venttiili liikkuu. Venttiilin liike itsessään on niin voimakas ja äkillinen, että sen huomaa helposti ilman mittausvälineitäkin. Mittausta tehdessä juuri tämän venttiilin nopean liikkumisen taltioiminen oli erityisen haastavaa, vaikka juuri sitä hetkeä haluttiin mitata. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että mittaussarjan yksi mitaus on onnistunut tallentamaan tämän halutun hetken. Toistettavaa tulosta tästä tilanteesta ei kuitenkaan onnistuttu saamaan sen vaikeasti mittavuuden takia.

Vesiprosessin mittauspisteeksi (MP2) valikoitui prosessin rungosta kohta (kuva 10), johon anturin pystyi niin ikään kiinnittämään helposti ilman ylimääräisiä telineitä. Vesiprosessin mittauspisteen tuloksia taulukossa 2.



KUVA 10. Mittauspiste 2 vesiprosessin rungosta.

TAULUKKO 2. Mittauspiste 2 vesiprosessi

Mittauspiste	Peak (m/s <sup>2</sup> )
MP2	1,54
MP2	0,54
MP2	0,25
MP2	0,72
MP2	1,67
MP2	3,00
MP2	2,66
MP2	0,19
MP2	6,78

Mittaustulokset ovat todella hajanaisia, kuten taulukosta 2 käy ilmi. Tulosten suuri hajonta vaikeuttaa selkeiden ja luotettavien johtopäätösten tekemistä prosessin tilasta tai sen mahdollisista muutoksista. Siitä huolimatta mittausdatan perusteella voidaan tehdä joitakin alustavia tulkintoja.

Tietyissä kohdissa havaittu värinäarvojen nousu viittaa prosessin siirtymiseen aktiivisempaan tilaan, jossa on todennäköisesti käynnissä jokin toiminnallinen tapahtuma, kuten venttiilin avautuminen tai pumpun liike. Vastaavasti toistuvan matalat mittausarvot viittaavat siihen, että prosessi on lepotilassa tai tilassa jossa tulos on melko vakaata. Tällöin ei tapahdu merkittävää toimintaa eikä synny havaittavaa värinää.

## 7 YHTEENVETO

Laakerimittauksen työohje koki muodonmuutoksen varsinkin uuden tasapainoit-  
tus työkalun käyttöönoton myötä. Työkalu toi mukanaan muutoksia mittausta-  
paan ja vaikutti suoraan ohjeen sisältöön. Lisäksi ohjeeseen lisättiin täysin uu-  
tena osiona Kerääjä-toiminnon hyödyntäminen, jonka avulla dataa voidaan ke-  
rätä automaattisesti ilman käyttäjän jatkuvaa valvontaa.

Uudistettu ohje on helposti muokattavissa jatkossa, ja siihen voidaan lisätä uusia  
toimintoja tarpeen mukaan. Yksi mahdollinen kehitysidea olisi ottaa käyttöön use-  
ampia erilaisia laakereita mukaan mittauksiin. Tämä mahdollistaisi eriasteisesti  
kuluneiden laakereiden vertailun, jolloin opiskelijat voisivat havainnoida, miten  
kuluminen vaikuttaa mittaustuloksiin.

Toinen kehityskohde liittyy mittaustulosten pitkäaikaiseen seurantaan. Kuten teo-  
riaosuudessa on mainittu, laajempien mittaustrendien seuraaminen voi olla ope-  
tuksen kannalta hyödyllistä. Laakerin kuntoa arvioidaan usein vertaamalla nykyi-  
siä tuloksia aiempiin ja juuri tämän kaltaiset vertailut auttavat tekemään päätelmiä  
kulumisen etenemisestä ja prosessin tilasta ajan kuluessa.

Mitä tulee Feston ja vesiprosessiin niin siihen on hyvä todeta, että mittausten  
tekeminen yksin oli käytännössä melko haastavaa, etenkin silloin kun tavoitteena  
oli saada tallennettua jokin tarkka hetki, kuten esimerkiksi venttiilin liike. Tällaiset  
tilanteet vaativat nopeaa reagoitua ja oikean hetken ennakoitua, mikä ei ollut  
kovan helppoa.

Jatkokehitystä ajatellen tähän ongelmaan voisi kokeilla Kerääjä-toiminnon hyö-  
dyntämistä. Sen avulla datan kerääminen voisi tapahtua automaattisesti, ilman  
että käyttäjän tarvitsee olla jatkuvasti valmiina tallentamaan oikeaa hetkeä. Tämä  
helpottaisi työskentelyä ja voisi parantaa mittausten luotettavuutta.

Toisaalta koulutustilanteessa haasteeksi voi muodostua se, miten eri tehtävät ja  
opiskelijaryhmät saadaan aikataulutettua ja sovitettua yhteen. Laboratoriopäivinä  
on usein useita prosesseja käynnissä samanaikaisesti eri ryhmien käytössä,

mikä vaatii tarkkaa suunnittelua ja joustavuutta, jotta kaikilla olisi mahdollisuus toteuttaa omat mittauksensa sujuvasti. Tällöin on vaikea sanoa kuinka realistista on, että langattomia antureita pystyttäisiin hyödyntämään sujuvasti myös muihin prosesseihin niin, että ei aiheutuisi turhaa sekasortoa. Tämä havainto koskee lähinnä koulutuskäyttöä, jossa työskentely- ja mittausolosuhteet poikkeavat usein varsinaisista tuotantoympäristöistä.

Voi kuitenkin todeta, että mittapisteiden todellisen hyödyllisyyden ja merkityksen arviointi prosessin seurannan kannalta edellyttää selvästi laajempaa kokeellista lähestymistapaa. Tarvitaan lisää jatkokeiteita, pitkäkestoisempaa ja kattavampaa mittausdataa, jotta mittaustulosten tulkinta olisi luotettavampaa ja prosessin käyttäytymisestä saataisiin muodostettua kokonaisvaltaisempi kuva.

## LÄHTEET

Ansaharju, T. 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. WSOY Oppimateriaalit Oy.

Binali, R. & Demirpolat, H. & Kuntoğlu, M. & Makhesana, M. & Yaghoubi, S. & Kul, B. S. 2024. A Comprehensive Review on Low-Cost MEMS Accelerometers for Vibration Measurement: Types, Novel Designs, Performance Evaluation, and Applications. Journal of Molecular and Engineering Materials 12(6). [https://www.researchgate.net/publication/379396611\\_A\\_comprehensive\\_review\\_on\\_low-cost\\_MEMS\\_accelerometers\\_for\\_vibration\\_measurement\\_types\\_novel\\_designs\\_performance\\_evaluation\\_and\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/379396611_A_comprehensive_review_on_low-cost_MEMS_accelerometers_for_vibration_measurement_types_novel_designs_performance_evaluation_and_applications)

Chu, T. & Nguyen, T. & Yoo, H. & Wang, J. (15.3.2024). A review of vibration analysis and its applications. Heliyon 10(5). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024023132>

Griessmann, T. & Hofmeister, B. & Jonscher, C. & Rolfes, R. 2022. Very low frequency IEPE accelerometer calibration and application to a wind energy structure. Wind Energy Science. [https://www.researchgate.net/publication/360826015\\_Very\\_low\\_frequency\\_IEPE\\_accelerometer\\_calibration\\_and\\_application\\_to\\_a\\_wind\\_energy\\_structure](https://www.researchgate.net/publication/360826015_Very_low_frequency_IEPE_accelerometer_calibration_and_application_to_a_wind_energy_structure)

Hajare, R. & Reddy, V. & Srikanth, R. 2022. MEMS based sensors – A comprehensive review of commonly used fabrication techniques. Materials Today Proceedings 49(3). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321037998>

Heinonkoski, R. 2013. Kone- ja prosessiautomaation kunnossapito. Opetushallitus.

Järviö, J. & Lehtiö, T. 2017. Kunnossapito. Kunnossapitoyhdistys. Savion kirjapaino Oy. Kerava.

Li, H. & Tian, C. & Deng Z. D. (6.11.2014). Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. Applied Physics Reviews 1(4). AIP Publishing. <https://pubs.aip.org/aip/apr/article/1/4/041301/123585/Energy-harvesting-from-low-frequency-applications>

Liang, H. & Hao, G. & Olszewski, O. Z. 2021. A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms. Sensors and Actuators A: Physical. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424721002065>

Peltonen, H. & Perkkiö, J. & Vierinen, K. 2018. Insinöörin (AMK) fysiikka osa II. Porvoo: Bookwell Oy.

PSK standardisointiyhdistys ry. 2024. Kunnanvalvonnan värähtelymittaus. 21. painos.

Rudrapati, V. D., Savale, A. S., Savale, B. G., Philip, S. V., & Paul, P. S. 2017. Effect of Bearings on Vibration in Rotating Machinery. IOP Science. [https://www.researchgate.net/publication/319494949\\_Effect\\_of\\_Bearings\\_on\\_Vibration\\_in\\_Rotating\\_Machinery](https://www.researchgate.net/publication/319494949_Effect_of_Bearings_on_Vibration_in_Rotating_Machinery)

Valmet Oyj. 2022. Valmet Maintenance Pad käyttöohje. Revisio 7. Viitattu 10.2.2025. Sisäinen dokumentti.

Valmet Oyj. 2025. Valmet Maintenance Pad. Portable data collector and analyzer. Pdf-tiedosto. Viitattu 24.3.2025. <https://www.valmet.com/globalassets/automation/asset-performance-management/condition-monitoring/valmet-maintenance-pad-datasheet.pdf>

Valmet Oyj. 2022. Wireless Measurement Module. Viitattu 10.2.2025. Pdf-tiedosto. <https://www.valmet.com/globalassets/automation/asset-performance-management/condition-monitoring/wmm-100-wireless-vibration-measurement-module.pdf>

Valmet Oyj. 2022. Wireless Trigger Module. Viitattu 10.2.2025. Pdf-tiedosto. <https://www.valmet.com/globalassets/automation/asset-performance-management/condition-monitoring/wtm-100-wireless-trigger-module.pdf>

Valmet Oyj. 2022. Wireless Vibration Sensor. Viitattu 10.2.2025. Pdf-tiedosto. <https://www.valmet.com/globalassets/automation/asset-performance-management/condition-monitoring/wvs-100-wireless-piezoelectric-vibration-sensor-datasheet.pdf>

## LIITTEET

### Liite 1. Laakerimittaukset työohje

1(8)

TAMK  
Automaatiotekniikan laboratorio  
Laura Koskela

Työohje 2025

#### Laakerimittaukset

##### Välineet:

Mittauslaitteistona Valmet MPad, DriveWindow Light, anturit WVS-100, WTM-100 ja triggeranturina OGP701

##### Tavoitteet:

Työn tavoitteena on tutustua teollisuudessa yleisesti esiintyvään kunnossapitomittaukseen, joka liittyy laakerivikojen tunnistamiseen. Työssä tutustutaan akselin tasapainotukseen ja säätövirheen löytämiseen.

##### Ennakkotehtävät:

- ❖ Kerro lyhyesti antureiden ominaisuuksista (WVS-100, WTM-100, OGP701)
- ❖ Mitkä ovat yleisimmät merkit laakeriviasta?
- ❖ Etsi olennaiset tiedot laakerista SKF YAT 204

##### Laboratoriotehtävät:

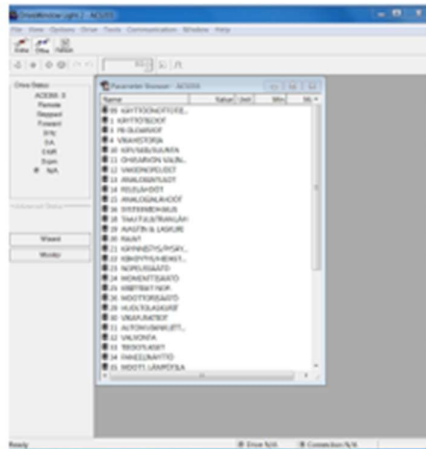
###### 1 Prosessiin tutustuminen

Tutustu prosessiin. Mistä löydät virtakytkimen, taajuusmuuttajan ja anturit? Paikanna itse akselilinjasta laakereiden, säätölevyjen ja tasapainotuskiekkojen sijainnit.

- Piirrä järjestelmästä periaatekaavio. Selvennä kaaviossa keskeiset komponentit ja niiden riippuvuus toisistaan. Miten turvallisuus on otettu huomioon järjestelmän sähköpiirissä?

Avaa koneelta Valmet MPad ja taajuusmuuttajan ohjaamiseen käytettävä DriveWindow Light. Kytke virtakatkaisijasta virrat laitteistoon päälle. DriveWindow Light (kuva 1) saa jäädä taustalle mittauksia varten, mutta vielä tässä vaiheessa ei tarvitse tehdä muuta kuin avata ohjelma, jotta se kerkeää yhdistyä laitteiston kanssa. Jos ohjelmaa avatessa näyttöön ei ilmesty heti Parameter Browser - ACS355 koita käynnistää ohjelma uudestaan. Anturit voi laittaa päälle juuri ennen mittauksia.

Seuraa työohjetta ja vastaa siinä esitettyihin kysymyksiin. Kuvat, joita työohjeessa esitetään ovat esimerkkikuvia, eivätkä täten jokaiselta kohdalta vastaa teidän mittaustanne suoraan. Työohjeen tekstistä selviää tarvittavat parametrit.



KUVA 1. DriveWindow Light avautuva näkymä taajuusmuuttajan ohjaamiseen.

## 2 Yhden tason tasapainotus

Tarkoituksena on tehdä akselille yhden tason tasapainotus, jolloin käytössä on yksi värähtelyanturi ja tahtipulssianturi. Tasapainotus tehdään Valmet MPadista löytyvän tasapainotustyökalun Balancing toolin avulla. Mittauslaitteiston (MPad) käytöstä on olemassa hyvä valmistajan käyttöohje, jota kannattaa käyttää tämän työohjeen kanssa jos ilmenee vikatilanteita. Aloitetaan uuden tasapainotustyön tekeminen (käyttöohjeesta s. 100-).

### Uuden tasapainotustyön aloittaminen (Käyttöohje s. 100 -)

1. Valitse Pääsivulta Työkalut ja Balancing Tool
2. Aloitetaan **Uusi** työ
3. Laskentametodi: Valitse "Suorita tasapainotus mittaamalla" ja Seuraava
4. Mittausasetukset: Ei muutoksia.
5. Konetiedot:
  - Lisää työlle nimi. Jos työtä ei nimetä se ei myöskään tallennu, joten siihen ei voi palata myöhemmin. Laita työn nimi ylös.
  - Varmista, että roottorin tiedoissa tyyppinä on 1-tason tasapainotus
  - Roottorin massa: 15 kg (moottorin massa)
  - Tasapainotusnopeudeksi 1500 RPM. Tasapainotustyökalu osaa itse laskea suositellun tasapainotusnopeuden, jos lisää tiedon roottorin massasta ja nimellispyörimisnopeuden.

TAMK  
Automaatiotekniikan laboratorio  
Laura Koskela

Työohje 2025

#### 6. Anturiasetukset:


Määritä tahtipulssianturille (T) sopiva kulma. Huomioi trigger-anturin asento! Tämän jälkeen pystyt lisäämään listaan värähtelyanturin (WVS-100). ID voi olla sama kuin oletuksena annettu. Selitteeksi anturin nimi, ja asennuskulmaksi 90 astetta. Seuraava.



#### 7. Korjaustason määrittäminen:

- Tasapainotuksen säde 160 mm
- Alasvetovalikossa on kaksi vaihtoehtoa: "Jatkuva asennuskehä" ja "Määritetyt paikat". Valitse "Määritetyt paikat".
- Korjausmassojen lukumääräksi 20, joka tarkoittaa kiekossa olevien paikkojen määrää. Seuraava.
- Lopuksi tulee vahvistusviesti, jossa kysytään jatketaanko eteenpäin. Asetuksia ei voi tämän jälkeen enää käydä muuttamassa. Valitse "Kyllä", jotta pääset mittauksiin.

### Alkutilannemittaus

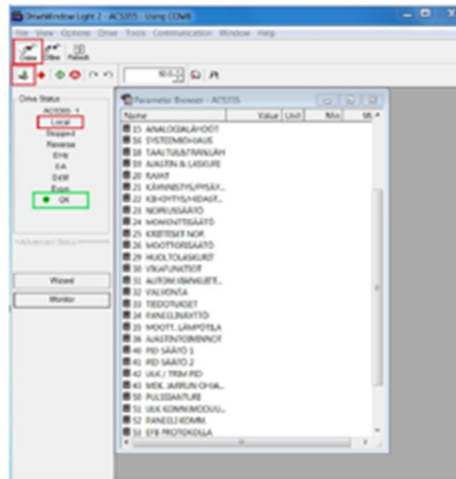
Alkutilannemittauksessa toiseen kiekoihin laitetaan ryhmän valitsema paino (4-17g), jolloin kiekkoon ei vielä tässä vaiheessa aseteta koemassaa. Käynnistä anturit WVS-100 ja WTM-100 virtanapista. Avaa koneelta taajuusmuuttajan ohjaukseen käytettävä DriveWindow (käytä näppäimistöä Alt + tab, jotta saat ikkunan näkyviin).

DriveWindow käyttö: Varmista, että mittauksen suorittaessa on tilana local päällä (local/remote painikkeesta ). Todennäköisesti ennen ajamista on päällä jokin vikatilat kuten "Paneelivika" tai "Hätä-seis". Kuittaa vikatilat pois käyttämällä

Reset faulted drive (). Jos vikailmoitukset eivät lähde paina ensin Stop Drive () ja sitten paina Reset faulted drive uudestaan. Drive statukseen pitäisi ilmestyä OK kun ohjelma on käyttövalmis (kuva 7).

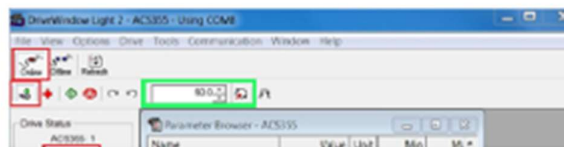
TAMK  
Automaatiotekniikan laboratorio  
Laura Koskela

Työohje 2025




KUVA 7. DriveWindow Light käyttövalmiina.


Ennen mittauksen aloittamista tarkista, että pyörimisnopeus on asetettu oikein. Pyörimisnopeutta voidaan muokata DriveWindow Light ohjelmistosta yläpalkin tuntumassa sijaitsevasta pyörimisnopeuden monitorointi työkalusta (kuva 8). Luku 50 vastaa n. 1500 RPM. Luku muokatessa muista painaa vieressä olevaa vahvistus-ikonia, jolloin pyörimisnopeuden muutos rekisteröityy.



KUVA 8. Pyörimisnopeuden muokkaus laatikoitu vihreällä.

Käynnistä taajuusmuuttaja päälle Start drive -painikkeesta (  ).

Vaihda takaisin MPad sovellukseen, jossa paina listalta lisätty anturi ja paina listan oikealta puolelta käynnistyspainiketta mittauksen käynnistämiseksi. Odota hetki, että pyörimisnopeus on ehtinyt nousta ja tasaantua 1500 RPM tuntumaan ennen mittauksen käynnistämistä. Mittaus pysäytetään kun laite antaa stabiilin tuloksen, jolloin kaikki arvot ovat saaneet vihreän taustaväriin. Pysäytä taajuusmuuttaja mittauksen loputtua.

Alkutilannemittauksen tuloksia voidaan tarkastella spektrinä kun listasta valitsee rivin, jolloin rivi muuttuu siniseksi ja valitse oikealta spektri-ikoni .

TAMK  
Automaatiotekniikan laboratorio  
Laura Koskela

Työohje 2025

### **Mittaus koemassalla**

Alkutilannemittauksen jälkeen on koemassamittauksen aika. Ohjelma ehdottaa itse sopivaa koemassaa. Punnitse koemassa vaa`alla ja kirjaa ylös koemassan tarkka paino ja sijainti. Tee koeajomittaus samalla tavalla kuin alkutilannemittauksessa. Kun olet tyytyväinen tulokseen poista massat kiekosta.

**Huom!** Koemassan mittauksen jälkeen näiden massojen asennusta ja tarkkuustasapainotusmittauksia voidaan suorittaa lähes loputtomasti kunnes saavutetaan haluttu lopputulos. Kun olet tyytyväinen ja haluat lopettaa siirry yhteenvetoon.

### **Mittaus korjausmassalla (vapaaehtoinen)**

Koemassa mittauksen jälkeen ohjelmaa ehdottaa kiekkoon asetettavia korjausmassoja painoltaan ja asennuspaikat. Aseta korjausmassat puntarin kautta kiekkoon mikäli ehdotetut massat ovat sellaisia mitkä on helppo toteuttaa. Koemassan voi ottaa pois tai jättää kiekkoon mittauksen ajaksi. Muista vahvistaa valinta ohjelmassa. Suorita tarkkuusmittaus.

### **Mittaus trimmimassalla (vapaaehtoinen)**

Lisää ehdotetut massat ja suorita tarkkuustasapainomittaus.

### **Yhteenveto**

Tarkastele tuloksia ja ota tulokset talteen raporttia varten. Mitä huomioita löytyy?

## **3 Laakerin kunnan tutkiminen**

Seuraavana tehtävänä on toteuttaa mittaus laitteistolla ja analysoida laakerin kuntoa. Työssä mitataan kahden laakerin kuntoa. Ota käyttöön myös toinen WVS-anturi, jolloin molemmilla laakereilla on oma anturinsa. Mittaus suoritetaan ilman kiekossa olevia massoja.

### **Mallin luominen (Käyttöohje s. 20-)**

Luo ensin mallipohja eli malli, joka toimii pohjana kun luodaan koneita.

1. Pääsivulta Reitit hallinta ja Mallit
2. Lisää laitemalli, nimeä sopivasti (ota nimi muistiin!)
3. Valitse toimenpide: Luo uusi
4. Mittauspisteet: Lukumääräksi 2, joka kuvaa WVS-antureiden lukumäärää. Nimeä mittauspisteet (Laakeri 1 ja Laakeri 2).
5. Sovellukset: Valitse basicAnalysis ja envelopeAnalysis ja Talleta

TAMK  
Automaatiotekniikan laboratorio  
Laura Koskela

Työohje 2025

#### **Koneen luominen (Käyttöohje s. 25-)**

1. Pääsivulta Reitin hallinta ja Koneet
2. Lisää kone ja anna nimi (ota nimi ylös!)
3. Valitse toimenpide: Kopioi malli
4. Valitse laitemalli: Valitse aikaisemmin luotu Malli listasta ja Talleta

Kun Kone on luotu täytyy vielä muokata sen sisältämiä ominaisuuksia. Valitse vasemmalta valikosta oikea kone ja klikkaa auki toinen mittauspisteistä (Laakeri 1 tai Laakeri 2) niin pääset muokkaamaan tietoja tarkemmin. Kun olet muuttanut seuraavat tiedot niin toista sama myös toiselle laakerille.

1. Viivamäärä: 65536 (spektrin viivamäärä)
2. Mittaustaajuus (fmax): 10 000
3. Oletuspyörimistaajuus (Hz): 25 Hz
4. Laakerit: Laakerityypiksi B1 ja Muokkaa. Valitse listasta laakeriksi SKF YAT 204 ja Talleta.
5. Verhokäyrä kaistanpäästö: 1500-5000
6. Verhokäyrä alipäästö: 1000

#### **Reitin luominen (Käyttöohje s. 31-)**

Reitti sisältää listan koneita, jotka tässä tapauksessa ovat mitattavat laakerit.

1. Pääsivulta Reitin hallinta ja Reitit
2. Lisää reitti ja anna nimi (ota nimi ylös!)
3. Reitin keruuväli: 1 minuutti
4. Lisää reitille juuri tehty kone ja talleta

#### **Laakerimittauksen suorittaminen**

Pääsivulta valitaan **Aloita reitti**. Muista ilman mittausta tarkistaa, että anturit ovat päällä ja ettei kiekossa ole massoja. Valitse vasemmalta listasta juuri luotu reitti ja aloita mittaus. Mittaus suoritetaan kuten alkutilannemittauksessakin. Käynnistä taajuusmuuntaja ja odota, että pyörimisnopeus on n. 1500 rpm, jonka jälkeen paina mittaussivulta oikeasta yläreunasta käynnistuspainiketta. Odota, että laite suorittaa mittauksen ja kun mittaus on valmis paina oikeasta alareunasta Talleta-painiketta. Toista mittaus myös toiselle laakerille. Kun mittaus on valmis valitse avautuvasta valikosta "Tallenna ja lopeta reitti".

TAMK  
Automaatiotekniikan laboratorio  
Laura Koskela

Työohje 2025

#### **Tulosten tarkastelu**

Tuloksia voi tarkastella Pääsivulta Analysointityökalut (käyttöohje s. 64-) ja Analysoi. Etsi listalta käytetyn koneen tai reitin nimellä oikea mittaus ja paina pientä plussaa, jolloin avautuu esiin mittauspisteet (Laakeri 1 ja Laakeri 2). Valitse mittauspiste ja aikatazon kuvaajan vierestä suurennuslasia, jolloin avautuu tarkempi analysointityökalu.

Tulosten analysointiin voi käyttää myös tietokoneelta löytyvää Analysis Workbench-sovellusta (käyttöohje s. 126-), jota on ehkä helpompi käyttää kuin Maintenance Padin omaa analysointityökalua.

#### **4 Mittaukset keruutoiminnolla (Käyttöohje s. 57-)**

Mittauksia voidaan tehdä myös keruutoimintoa käyttämällä. Toiminnon avulla voidaan jättää anturi kohteeseen paikoilleen keräämään dataa tietyin määritellyin aikavälien mukaisesti tai vastaavasti mittaus aktivoituu silloin jos ilmenee normaalista poikkeavaa värähtelytasoa.

Tehtävässä on tarkoituksena käyttää keruutoimintoa ja kerätä dataa yhdellä moottorilla lähempänä sijaitsevalla WVS-100-1 anturilla (kanava 1) samasta kohdasta kun edeltävissä mittauksissa. Mittauksessa pyörimisnopeus asetetaan noin 800 RPM.

#### **Kerääjän luominen**

Ennen kerääjän luomista täytyy luoda uusi kone

##### **Luo kone (ilman mallipohjaa)**

1. Luo kone: Pääsivu – Koneet – Lisää kone – Anna nimi (ota nimi ylös!)
2. Valitse toimenpide: Kopioi valittu ja Talleta
3. Muokkaa koneen ominaisuuksia. Poista toinen mittauspiste klikkaamalla mittauspiste rivi ja muokkaa-painike. Lisäksi muokkaa laakerin ominaisuudet.

##### **Luo kerääjä**

4. Koneen luomisen jälkeen Pääsivulta Keruu
5. Lisää kerääjä
6. Valitse metodi uuden loggerin luonnille: Käytä olemassa olevaa mittapistettä
7. Valitse avautuvasta listasta juuri tehty kone ja Talleta

8(8)

TAMK  
Automaatiotekniikan laboratorio  
Laura Koskela

Työohje 2025

Kun Kerääjä on luotu täytyy vielä muokata sen sisältämiä ominaisuuksia. Valitse vasemmalta valikosta oikea kerääjä ja klikkaa auki mittauspiste niin pääset muokkaamaan tietoja tarkemmin.

1. Tiedonkeruun mittaustyyppi: timed
2. Mittausten lukumäärä/Lohkoja tiedonkeruussa: 3
3. Mittausintervalli (s)/ tiedonkeruun mittaussväli: 15
4. Anturin hereilläoloaika (s): 6

#### Keruumittauksen vaiheet

Mittaus suoritetaan kuten aikaisemminkin. Ainut muutos koskee pyörimisnopeuden muutosta, jota voidaan muokata kuvan 8 mukaisesta paikasta. Ota talteen tarkka pyörimisnopeuden lukema joka on n. +/- 800 RPM. Lukua muokatessa muista painaa vieressä olevaa vahvistus-ikonia, jolloin pyörimisnopeuden muutos rekisteröityy.

Alussa huolehdi, että taajuusmuuttaja **ei ole** päällä! Mittauksen vaiheet tulee suorittaa alla olevan listan mukaisesti.

1. Mene kerääjän ominaisuudet-välilehdelle, sieltä pääset toteuttamaan mittauksen
2. **Sammuta** anturi jos ei ole jo sammutettuna
3. Käynnistä keruu Käynnistä-painikkeella
4. Aseta anturi mittauspaikalle jos ei ole jo ja käynnistä anturi
5. Käynnistä taajuusmuuttaja ja pyörimisnopeudeksi n. 800 RPM
6. Odota kunnes anturi on suorittanut mittaukset (3/3 mittaukset), kestää noin 2 minuuttia
7. Sammuta taajuusmuuttaja

Ota talteen tulokset ja vertaa mittauksia raportissa. Tuloksien analysoimiseen kannattaa käyttää työpöydältä löytyvää Analysis Workbench-sovellusta. Kun mittauksien lukumäärä on 3 kannattaa tutustua myös vesiputoustyökalun käyttöön mikäli aikaa riittää (käyttöohje s. 141). Vesiputoustyökalun löytää analysointityökalun mittaus-ikkunan ihan oikeasta yläreunasta vesiputous-ikoni (käyttöohje s. 134), josta pystyy myös sinisillä nuolinäppäimillä selata mittauksia. Huom! Sovelluksen avautuessa tämä osuus saattaa olla piilossa ja ikkunaa täytyy liikuttaa!

Selvitä raporttiin millaisissa sovelluksissa värähtelymittausta voidaan hyödyntää teollisuuden kunnossapidossa. Mitä muita kunnossapidon analyysin tapoja löydät?