

Jyri Mäkelä

Automaattisen lavausjärjestelmän värähtelymittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

19.5.2016

Tekijä(t) Otsikko	Jyri Mäkelä Automaattisen lavausjärjestelmän värähtelymittaukset
Sivumäärä Aika	52 sivua + 14 liitettä 19.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Yliopettaja Jyrki Kullaa APS & HBW Pääkäyttäjä Lasse Vaano
<p>Tässä insinöörityössä tehtiin värähtelytutkimus automaattisen keruujärjestelmän uudelleenlavausroboteille. Työ tilaajana oli Oy Sinebrychoff Ab. Tarkoituksena oli selvittää värähtelyn suuruus ja taajuus lavaajilla, ja selvittää mahdollisuuksia värähtelyn vaimentamiseen.</p> <p>Lavaajilla huomataan selkeää työskentelytason sekä lavausrobottien värähtelyä. Tämä värähtely aiheuttaa tasolla työskenteleville työntekijöille epämukavuuden tunnetta, ja saattaa ajoittain jopa häiritä robottien toimintaa. Kyseessä on aistein havaittavasti matalataajuinen värähtely, joka aiheutuu selvästi lavausrobottien liikkeistä johtuvista herätteistä.</p> <p>Työssä käydään läpi värähtelyn perusteita ja erialisia värähtelyn vaimennustekniikoita. Teoriaosuudessa pyritään pääasiassa perehtymään värähtelyn ominaisuuksiin, jotka ovat työn kannalta oleellisia. Värähtelymittaukset tehtiin pietsokiteisillä kiihtyvyysantureilla.</p> <p>Tulokseksi tässä työssä saatiin tietoa rakenteellisista värähtelyn ominaisuuksista. Mittaustulokset esitetään FFT:n avulla, käyttäen Hanning-ikkunointia.</p>	
Avainsanat	Värähtelymittaus, kiihtyvyysanturi, vaimennus, ominaistajuus

Author(s) Title	Jyri Mäkelä Vibration Measurements of an Automatic Packing System
Number of Pages Date	52 pages + 14 appendices May 19, 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructor(s)	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer APS & HBW System Specialist Lasse Vaano
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to carry out a vibration analysis for an automatic packing system, and more specifically for its re-palletizing robots. These vibration measurements were made with piezoelectric acceleration sensors and the main goal was to clarify the power of vibration in the re-palletizing end. The thesis was commissioned by Sinebrychhoff.</p> <p>There occurs clearly noticeable oscillation at working levels and with robots. This is not only uncomfortable for people who are working there but it also may disturb the operation of robots picking packages. This swinging or fluctuation at working levels is detectable by human senses so it is of low frequency, and caused by moving robots.</p> <p>In this thesis the basic theory of vibration was examined and furthermore, vibration measurements were made and analyzed. Finally, also the damping of vibration was unveiled as well. In the theory part of this thesis, the main objective was to analyze the different features and characteristic of vibration, which is also mainly focused on in the actual study.</p> <p>As a result, valuable data on the structural natural frequencies of vibration were discovered which was executed by doing measurements with acceleration sensors. The results are given by using the FFT algorithm and also using Hanning windowing.</p>	
Keywords	Vibration, accelerometer, damping, natural frequency

Sisällys

1	Johdanto	4
2	Sinebrychoff ja Carlsberg	5
3	Värähtelytekniikan perusteet	6
3.1	Mekaaniset värähtelyt	6
3.2	Harmoninen värähtely	7
3.3	Vaimeneva värähtely	8
3.4	Pakkovärähtely ja resonanssi	8
3.5	Mekaaniset aallot	10
4	Mittaus tekniikan perusteet	11
4.1	Mittauslaitteiden toiminta	11
4.2	Mittausjärjestelmän yleinen rakenne	13
4.2.1	Liitännän merkitys asennuksessa	14
4.2.2	Mahdollisia häiriötekijöitä asennuksessa	15
4.2.3	Värähtelyilmiöt ja AC-mittaukset	16
4.2.4	Mittausanturit	17
4.3	Signaalin käsittely	18
4.3.1	Käsittelyn tarkoitus	18
4.3.2	Zoom FFT	19
4.3.3	Vuoto	20
4.4	Signaalianalyysi	22
4.4.1	Analyysi taajuustasossa	22
4.4.2	Korrelaatioanalyysi	23
4.4.3	Spektrianalyysi	24
4.4.4	Siirtotie- ja kontribuutioanalyysi	24
4.4.5	Analyysin kulku	25
5	Värähtelyn hallinta	25
5.1	Värähtelynhallintamenetelmät	25
5.2	Passiivinen vaimennus	26
5.2.1	Dynaaminen massavaimennin	26

5.2.2	Impaktivaimennin	27
5.3	Aktiivinen vaimennus	27
5.3.1	Aktiivinen massavaimennin	28
5.3.2	Rakenteen sisäinen aktiivinen toimielin	28
5.4	Puoliaktiivinen vaimennus	28
5.5	Perusteluja	29
6	Mittaukset	29
6.1	Mittausvalmistelut	29
6.2	Mittausparametrien laskeminen	33
6.3	Mittalaitteet	34
7	Mittaustulokset	35
7.1	Yleinen analyysi	35
7.2	Tulosten tarkastelua	40
7.3	Yksittäisten lavaajien analysointi	42
7.3.1	PKS1	43
7.3.2	PKS2	43
7.3.3	PKS3	43
7.3.4	PKS4	43
7.3.5	PKS5	44
7.4	Alkuperäiset mittaustulokset visuaalisena	44
7.5	Ensimmäiset lisämittaukset	47
7.6	Viimeiset lisämittaukset ja lopulliset tulokset	49
8	Jatkokehitys	52
9	Yhteenveto	55
	Lähteet	56

Liitteet

Liite 1. Kuvat lavaajista

Liite 2. Mittaussuunnitelmat

Liite 3. Mittauspöytäkirjaesimerkki

Liite 4. Lavaaja 1:n kuvaajat, alkuperäiset

Liite 5. Lavaaja 2:n kuvaajat, alkuperäiset

Liite 6. Lavaaja 3:n kuvaajat, alkuperäiset

Liite 7. Lavaaja 4:n kuvaajat, alkuperäiset

Liite 8. Lavaaja 5:n kuvaajat, alkuperäiset

Liite 9. Pöytäkirja, lisämittaus

Liite 10. Viimeiset lisämittaukset, mittaussuunnitelma ja pöytäkirja

Liite 11. Lavaaja 1:n viimeiset mittaustulokset

Liite 12. Lavaaja 3:n viimeiset mittaustulokset

Liite 13. Lavaaja 4:n viimeiset mittaustulokset

Liite 14. Lavaaja 5:n viimeiset mittaustulokset

1 Johdanto

Tässä insinöörityössä tarkoituksena on automaattisen keruujärjestelmän lavaajien värähtelyn mittaus ja selvitys. Oy Sinebrychoff Ab:n varastolla olevan automaattisen keruujärjestelmän lavauspäässä on havaittavissa värähtelyä, joka häiritsee ainakin työntekijöitä ja osittain myös työntekoa. Tarkoituksena on tehdä mittaukset ja tulosten analysointi, sekä tehdä ehdotuksia värähtelyn hallinnasta. Värähtelystä on aikaisemmin teetetty mittaus työterveyslaitoksella, tämän mittauksen tuloksena värähtely ei aiheuta työntekijöille välitöntä vaaraa tai vaivoja.

Tässä työssä perehdytään aluksi hieman värähtelyn sekä mittaustekniikan perusteisiin. Työn varsinainen osuus on värähtelyn mittaukset, sekä tulosten analysointi. Lopussa otetaan hieman kantaa jatkotoimintaan ja esitetään parannusehdotuksia.

Automaattinen keruujärjestelmä sisältää väliaikaisen tuotelavojen varastoinnin, tuotelavojen purkamisen, yksittäispakettien uudelleen varastoinnin sekä yksittäisten tuotteiden uudelleen pinoamisen lavoille. Tällä järjestelmällä siis saadaan isoista, yhden tuotteen peruslavoista räätälöityä asiakkaille monia tuotteita sisältäviä tuotelavoja. Tässä työssä keskitytään uudelleenlavausrobottien aiheuttamaan värähtelyyn.

Aivan ensimmäisenä mietittiin mitä halutaan ja miksi, sillä on hyvä tietää mittausta suunniteltaessa mittauksen päämäärä. Alusta asti on ollut tarkoituksena selvittää voimakkaimpien värähtelyjen taajuus, jotta saadaan selville ne taajuudet, joita on syytä lähteä vaimentamaan. Näin pystytään vakauttamaan laitteistoa.

Lavausrobotit tekevät nopeita liikkeitä, aiheuttaen voimia niiden rakenteisiin ja edelleen aiheuttaen värähtelyä koko systeemissä. Ne ovat itsessään jo monimutkaisia ja raskaita laitteita, mutta kun systeemiin lisätään vielä iso määrä koko ajan vaihtelevaa tuotekoelmaa, on värähtelyiden laskeminen käytännössä paljon aikaa vievää ja vaikeaa. Laskeminen vaatisi tarkan mallinnuksen koko laitteistosta, joka on niin laaja kokonaisuus että konkreettinen mittausten tekeminen on yksinkertaisempaa. Näin ollen onkin tarkoituksena tehdä konkreettiset mittaukset ja selvittää suurimmat värähtelyjen voimat ja taajuudet.

Ongelmallisinta on kävelytason värähtely, joka vaikuttaa ihmisten työskentelyyn. Lisäksi tason värähtely aiheuttaa värähtelyä pöydälle, jolta robotit hakevat paketit. Tästä aiheutuu taas ongelmia, jos paketit eivät ole kourassa oikealla kohdallaan, ja saattavat aiheuttaa törmäyksiä, kun robotti on viemässä pakettia limittäin jonkin vinossa olevan paketin kanssa.

Liitteenä 1, on kuva kaikista lavaajista rivissä.

2 Sinebrychoff ja Carlsberg

Sinebrychoffin tuotanto- ja toimitusketjutoiminnot siirrettiin osittaisjakautumisella Sinebrychoff Supply Company Oy:lle 1.10.2014. Sinebrychoff toimii paikallisena kaupallisena yhtiönä, Oy Sinebrychoff Ab:nä, ja paikallisena toimitusketjuyhtiönä, Sinebrychoff Supply Company Oy:nä. [14.]

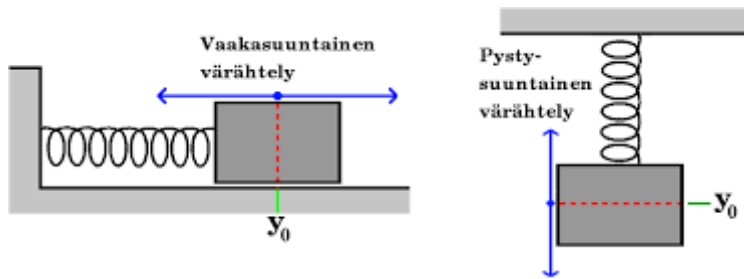
Pohjoismaiden vanhimpana panimona, ja Suomen vanhimpana elintarvikealan yrityksenä ja yhtenä Euroopan nykyaikaisimmista juoma-alan yrityksistä Sinebrychoff on aina ollut edelläkävijä. Yrityksellä on pitkä historia oluiden, siidereiden, lonkeroiden sekä virvoitus- ja energiajuomien valmistajana ja markkinoijana. [14.]

Vuonna 2000 Sinebrychoffista tuli osa suurempaa kokonaisuutta, Carlsberg-konsernia, joka toimii yli 150 markkina-alueella ja työllistää noin 40 000 henkilöä lähes sadassa panimossa. Yhtiön pääkonttori sijaitsee Kööpenhaminassa. Carlsberg on maailman 4. suurin panimo. [14.]

3 Värähtelytekniikan perusteet

3.1 Mekaaniset värähtelyt

Mekaaninen värähtely tarkoittaa jonkin kappaleen tai mekanismin liikettä, joka aiheutuu, kun se pakotetaan pois tasapainoasemastaan (kuva 1) [1].



Kuva 1. Mekaanisen värähtelijän peruseriaate, jolloin värähtelijä pyrkii aina palautumaan tasapainoasemaansa [7].

Tasapainoasemastaan poikkeutettu kappale pyrkii palautumaan alkuperäiseen asentoon, jolloin se lähtee kiihtyvällä liikkeellä kohti alkuperäistä asentoaan. Kun se pääsee tasapainoasemansa kohdalle, sillä on vauhtia joka vie sen ohi tasapainoasemastaan uudelleen. Tämän jälkeen kiihtyvyys vaihtaa suuntaa ja pyrkii pysäyttämään liikkeen, ja vaihtamaan liikkeen suunnan takaisin kohti tasapainoasemaa. Kappaleen nopeus on siis suurimmillaan aina, kun se ohittaa tasapainoasemansa, jolloin sen kiihtyvyys on nolla. Kiihtyvyys puolestaan on suurimmillaan, kun kappaleen nopeus vaihtaa suuntaa ja nopeus on nolla. [1.]

Värähtelyssä toistuvat aina samat vaiheet, kunnes värähtely vaimenee kokonaan, joten puhutaan jaksollisesta liikkeestä. Vaimennusta aiheuttavat joko ulkoiset vaimentimet tai yleisesti ainakin rakenteellinen vaimennus, jossa rakenne itsessään vastustaa värähtelyä ja pyrkii pysäyttämään liikkeen. Yleisesti värähtelyä pyritään ulkoisin vaimentimin hallitsemaan ja vaimentamaan kokonaan pois. [1.]

Värähtelyitä syntyy kun systeemi tai kappale saa ulkoisen herätteen. Heräte voi johtua esimerkiksi jaksollisesta häiriöstä, jota pidetään yllä ulkoisin voimin. Mekaaninen värähtely saattaa helposti edetä laajallekin alueelle kappaleessa, materiaalisissa tai systeemisissä. [1.]

Värähtelyistä aiheutuu rakenteissa rasituksia kohdissa, joissa staattinen kuorma ei sitä aiheuta. Dynaamisen lisäkertoimen käyttäminen staattisen kuorman kertomiseen ei aina riitä luotettavan tuloksen selvittämiseen. Staattiset korvauskuormat saadaan luotettavimmin määritettyä värähtelyn ominaismuotojen, massajakauman ja laskettujen kiihtyvyyksien avulla. [4.]

Esimerkiksi liikkuva lavausrobotti aiheuttaa sen rakenteisiin herätteen joka kerta, kun se liikahtaa. Värähtelevä lavaaja taas aiheuttaa herätteen kävelytasolle, joka on kiinteästi kiinni lavaajissa, ja näin sekin alkaa värähdellä aaltomaisesti.

Mekaaniset värähtelyt ovat usein haitallisia ja saattavat aiheuttaa rakenteisiin jännityksiä, jolloin erityisesti jäykät rakenteet saattavat vähitellen alkaa väsyä ja ruuvit löystyä. Työ- ja prosessikoneissa esiintyvät värähtelyt aiheuttavat tehohäviöitä, sekä kuluttavat osia. Lisäksi koneiden tärinä tuottaa melua, joka saattaa olla epämiellyttävää tai jopa suojaamattomalle kuulolle haitallista. Tärinällä saattaa olla muutenkin vaikutusta terveyteen, jos altistus on pitkäaikaista tai tarpeeksi voimakasta. [1.]

3.2 Harmoninen värähtely

Harmonisen vapaan värähtelyn taajuus on sama kuin systeemin ominaistajuus. Ominaisuus kertoo, kuinka kappale värähtelee ilman jatkuvaa ulkoista herätettä. Harmoninen värähtely toisin sanoen kuvaa kappaleen tai systeemin ominaisvärähtelyä, ja sitä kutsutaankin yleisesti ominaistajuudeksi. Harmonista pakkovärähtelyä esiintyy helposti kuitenkin missä tahansa systeemissä, kun siihen kohdistuvat voimat ovat riittävän tarkasti harmonisia. [1.]

Resonanssitarkasteluissa on tärkeää tuntea koko systeemin ominaistajuus. Se voidaan määrittää, kun tiedetään rakenteen massa ja jousivakio. Toisaalta monimutkaisissa rakenteissa laskeminen saattaa olla lähes mahdotonta, jolloin mittaaminen on järkevämpää. [1.]

Mekaaninen energia harmonisessa värähtelijässä sisältää kappaleen liike-energian, gravitaation potentiaalienergian sekä jousen potentiaalienergian [1].

3.3 Vaimeneva värähtely

Mekaanista energiaa pois värähtelijästä vie väliaineen vastus tai kitkavoima, muuttaen sitä lämmöksi. Yksikään värähtelevä mekanismi ei ole häviötön. Otetaan esimerkiksi hystereesi-ilmiö jousessa, jolloin jousen mekaanista energiaa muuttuu lämmöksi ja jousi lämpenee. [1.]

Jos kappale on riittävän jäykän väliaineen ympäröimänä, värähtelyjä ei välttämättä pääse edes syntymään. Esimerkiksi, kun öljyssä oleva löysä jousi ja siinä oleva paino poikkeutetaan tasapainoasemastaan, ei se ala värähdellä, vaan palaa hitaasti tasapainoasemaansa. [1.]

Värähtelyjen vaimenemista käytetään hyväksi, kun halutaan päästä eroon värähtelyistä. Esimerkiksi auton iskunvaimentimissa sekä vaakojen tai muiden mittareiden osoittimissa ei haluta esiintyvän värähtelyä. Yleisesti teknisissä sovelluksissa halutaan tietää värähtelyn ominaisuudet, kuinka nopeasti se vaimenee ja millä rakenteellisilla ratkaisuilla vaimenemiseen voidaan vaikuttaa. Jousivoima sekä väliaineen vastus yhdessä muodostavat vastuskertoimen, joka riippuu mm. hystereesi-ilmiön voimakkuudesta, väliaineen viskositeetista, sekä kappaleen muodosta ja massasta. [1.]

Värähtelijän liikkeen luonteeseen vaikuttaa ratkaisevasti, kuinka suuri vaimennuskerroin vaimentamattomalla värähtelijällä on ominaiskulmataajuuteen verrattuna. Värähtelyä ei esiinny, jos vaimennus on tarpeeksi voimakasta. [1.]

3.4 Pakkovärähtely ja resonanssi

Leikkikentällä riippukeinussa keinuvalle lapselle on silloin tällöin ”annettava vauhtia”, jotta liike ei ilmanvastuksen ja kitkan vuoksi lakkaisi. Lasta ja keinua tönäistään kevyesti jaksollisesti oikealla hetkellä. Tällaista värähtelijään kohdistuvaa ulkoista voimaa kutsutaan pakkovoimaksi. Lavaajarobotti aiheuttaa samalla tavalla pakkovoimia rakenteisiin,

liikuttellessaan paketteja. Jaksollisesti muuttuvan pakkovoiman perusmallissa ilmoitetaan sinimuotoisesti vaihteleva voima, josta nähdään pakkovoiman huippuarvo sekä kulmataajuus. Kulmataajuudesta nähdään voiman vaihtelun nopeus, joka ei kuitenkaan välttämättä ole sama kuin värähtelijän ominaiskulmataajuus. [1.]

Vaimennetussa värähtelijässä pakkovärähtelyjä aiheuttavia pakkovoimia ovat kappaleen jousivoima, väliaineen vastus ja ulkoiset pakkovoimat [1].

Yleisesti resonanssilla tarkoitetaan tilannetta, jolloin ulkoisen pakotteen taajuus on sama systeemin oman ominaistajuuden kanssa. Tällöin koko systeemissä värähtelyn amplitudi kasvaa suureksi. Usein resonanssi ilmenee vain tärinänä ja räminänä, mutta se voi saada rakenteissa aikaan myös todellista tuhoa. Esimerkkinä vaikkapa ensimmäinen Tacoma Narrowsin (kuva 2) silta, joka romahti vuonna 1940 vain neljä kuukautta avajaisen jälkeen, kun kova tuuli sai sillan huojumaan ja sortumaan. [1.]

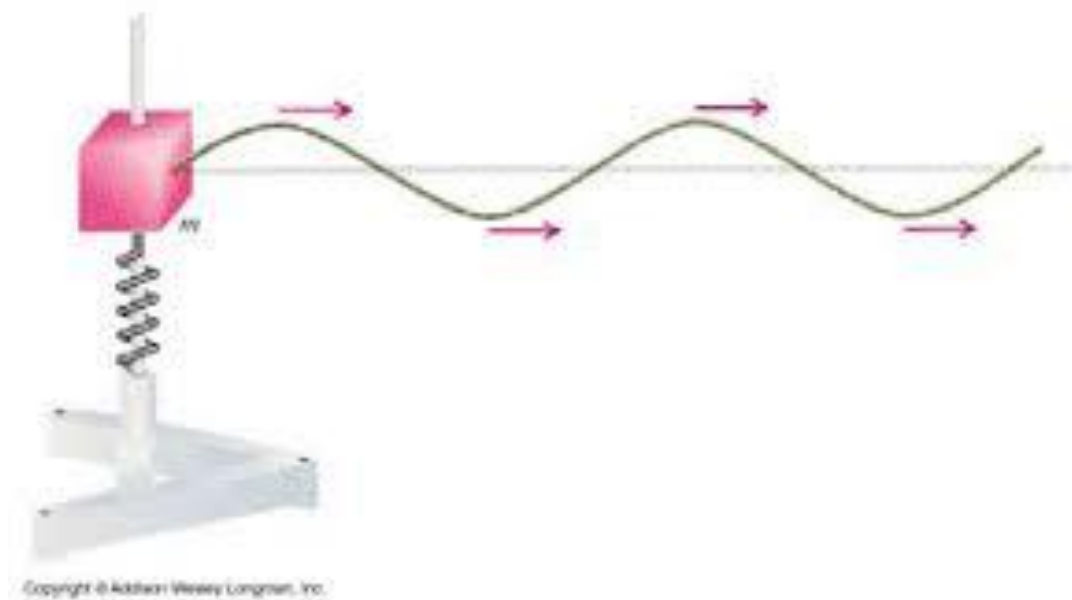


Kuva 2. Tacoma Narrowsin silta [8].

3.5 Mekaaniset aallot

Mekaaniset aallot ovat väliaineessa eteneviä poikkeamia, jolloin ainehiukkaset värähtelevät tasapainoasemiensa ympärillä. Mekaaniset aallot etenevät niin kiinteässä aineessa kuin nesteessä tai kaasussakin. Aallon etenemisnopeus riippuu mm. väliaineen ominaisuuksista. Aalto ei kuljeta ainetta, vaan se koostuu koko ajan eri ainehiukkasista. Aallonkin aikaansaamiseksi systeemiin täytyy tuoda energiaa. [1.]

Harmoninen aalto syntyy esim. toisesta päästä sidottuun köyteen, kun sitä liikautetaan kerran (kuva 3). Samoin kun jousen päätä, möntää tai levyä liikautettaessa kerran edestakaisin, syntyy pulssi. Näin muodostettu pulssi, eli paikallinen poikkeama tasapainotilasta, lähtee etenemään väliaineessa. Kun pulssi on mennyt ohi, palaa systeemi tasapainoasemaan. Värähtelijä aiheuttaa aaltoja jatkuvasti ollessaan toiminnassa, ja toimii näin jatkuvana aaltolähteenä. Tällöin systeemin kaikki osat värähtelevät harmonisesti samalla taajuudella ja samalla amplitudilla, vaikkakin värähtely on eri paikoissa eri vaiheessa. Harmonisen aallon perusyksikkö toistuu aallosta seuraavaan, eli sen pituus on aina yhtä suuri kuin matka kahden samassa vaiheessa olevan värähtelijän välillä. [1.]



Kuva 3. Harmoninen aalto köydessä, joka on sidottu toisesta päästä kiinni värähtelijään [10].

4 Mittaustekniikan perusteet

4.1 Mittauslaitteiden toiminta

Sensorit ovat laitteita, joilla fyysisiä ilmiöitä saadaan muunnettua elektronisiksi signaaleiksi. Näin ollen sensorit toimivat välikkappaleina fyysisen maailman ja elektronisten laitteiden, kuten tietokoneiden välillä. Toinen puoli tässä vuorovaikutuksessa ovat kaikki mahdolliset käyttölaitteet, joita ohjataan tietokoneilla, jolloin sähköisiä signaaleja muutetaan fyysiseksi työksi. [3.]

Kaikki mahdolliset mikroprosessorit tarvitsevat elektronista dataa, eli informaatiota, joka ohjeistaa niiden toimintaa. Elektroniikan yleistymisen myötä on myös kasvanut sensorien käyttö laajemmassa valikoimassa, jopa arkipäiväisissä laitteissa. Sensorit käyttäytyvät samalla tavalla, kuin yleisemmät elektroniset laitteet. Niiden toimintatarkoitus vain on päinvastainen, eli niillä kerätään tietoa fyysisistä tapahtumista sähköiseen muotoon. Näin mekaanisia tapahtumia pystytään analysoimaan koko ajan ja keräämään tietoa muutoksista ilman, että tarvitsee pysäyttää tai irrottaa mitään koneenosia. [3.]

Mittausteknologiassa ei tänä päivänäkään ole käytössä mitään maailmanlaajuisia standardeja, joten yleisesti järjestelmissä on käytössä aina juuri siihen tarkoitukseen räätälöityjä ratkaisuja. Tämä voi olla harhaan johtavaa, mutta se ei johdu standardien yleistämisen vaikeudesta. Enemmän asiaan vaikuttaa se, että erilaiset anturit tuottavat kaikki erilasta dataa. [3.]

On tärkeää tietää, mitä ja millä on mittaamassa, jotta pystyy valitsemaan oikeat anturit ja luomaan oikeanlaisen ympäristön datan käsittelylle. Mittareiden valmistajien antamat etiketit mittareille ovat lähinnä markkinointia varten. Niissä korostetaan mittarin parasta ominaisuutta, ja joitain yksittäisiä mahdollisia käyttötarkoituksia, jättäen pois kaikki vaihtoehdot. Uusia mittausjärjestelmiä luotaessa, toimittajan kanssa käydään läpi järjestelmän vaatimukset ja sen mukaan lähdetään valitsemaan sopivimpia antureita. [3.]

Muuntofunktiot esittävät toiminnallisen yhteyden fyysisen sisääntulosignaalin ja sähköisen ulostulosignaalin välillä. Yleensä tämä yhteys esitetään graafisena käyränä, josta

käy ilmi signaalin vaihtelu. Tarpeeksi tarkan kuvaajan saamiseksi täytyy käyttää tarpeeksi tarkkoja antureita. Monesti kalliissa erikseen kalibroiduissa antureissa tämä käyrä toimii eräänlaisena sertifikaattina, sillä niissä ei esiinny heittoa. [3.]

Herkkyys mittaustuloksissa, fyysisen ja sähköisen signaalin välillä on määritelty spekseissä. Herkkyys kertoo yleisesti pienen virheen joka muodostuu aina, kun dataa kerätään uuteen muotoon. Näitä virheitä voidaan muokata ja häivyttää derivoimalla dataa, jolloin päästään mahdollisimman lähelle todellisuutta. [3.]

Mittarit tuottavat tietyn määrän dataa tietyllä aikajaksolla, mutta eivät koskaan täysin yhtäjaksoista dataa. Mekaaninen mitattava kohde kuitenkin tuottaa aina jatkuvaa tietoa, joten mittareilla kerätään tuloksia tarpeeksi suuri määrä, tarpeeksi pieneltä aikaväliltä. Näin saadaan aikaan tarvittava tarkkuus mittauksessa. Valmistaja ilmoittaa mittareidensa mittaustarkkuuden sillä perusteella, kuinka tiheään niillä saa kerättyä näitä datapisteitä. [3.]

Epätarkkuuden tarkkuus on yleisesti määritetty kertomaan suurimman odotettavan virheen todellisen tuloksen ja mitatun tuloksen välillä. Joskus tätä kuvataan suhteena, eli kuinka suuri osa täydestä skaalasta dataa saadaan kerättyä. Yleisemmin käytetään kuitenkin prosentuaalista merkintää. Vaikka nämä kaksi kertovat saman asian, ovat yleensä prosenttiosuudet selkeämpiä. Esimerkiksi voidaan ilmoittaa epätarkkuuden tarkkuudeksi 3 %. Sekin saattaa hämätä, sillä pienempi epätarkkuus tarkoittaa aina tarkempaa. [3.]

Joskus anturi ei palaa takaisin samaan arvoon, missä se on ollut aikaisemmin, vaikka todellisuudessa mitattava suure palautuu. Tämä johtuu siitä, että mittareilla on ns. kuolleita alueita. Kuolleessa alueessa mittari ei kerro uutta arvoa vaan palautuu edelliseen. Otetaan esimerkiksi vaikkapa auton lämpömittari, joka näyttää lämpötilan 1 °C tarkkuudella. Mittari saattaa näyttää vaikkapa 4 °C, vaikka todellisuudessa ulkona olisi 4,8 °C lämmintä. Tämä johtuu siitä, että mittari pystyy näyttämään lämpötilan vain yhden asteen tarkkuudella näyttäen aina lukeman, jonka se on viimeksi ylittänyt. Myös pyöristyksissä tapahtuu samaa virhettä. Samaisessa esimerkissä mittari vain näyttäisi tässä tapauksessa 5 °C, mutta virhettä siinä silti olisi. [3.]

Kaikki anturit tuottavat jonkin verran ulostulosignaaliin kohinaa, mikä tarkoittaa signaaliin muodostuvaa häiriötä. Tätä kohinaa kutsutaan usein valkoiseksi kohinaksi, "white noise". Tarkkakin anturi saattaa antaa epätarkkaa dataa, jos se tuottaa liikaa kohinaa. Kuitenkin

yleensä pyritään siihen, että saasteen aiheuttama epätarkkuus olisi pienempi kuin anturin mittausepätarkkuus. Lopullinen data kuitenkin sisältää kohinaa koko systeemin eniten kohinaa tuottavan komponentin mukaan. Näin ollen on turha valita anturia, joka tuottaa mahdollisimman vähän kohinaa, jos järjestelmässä on toinen komponentti, mikä tuottaa sitä enemmän. Toisaalta taas jos muu järjestelmä on tarkka ja kohinaton, kannattaa myös anturit valita niin, etteivät ne tuota turhaa kohinaa lopputulokseen. [3.]

Anturin resoluutio kertoo pienimmän havaittavissa olevan signaalin vaihtelun. Signaalin vaihtelut ovat hetkellisiä ilmiöitä, joten tietyllä aikavälillä voidaan luoda yhteys signaalin vaihtelulle ja pienimmälle signaalin amplitudille. Tämän takia resoluutiossa on otettava huomioon, että osa alkuperäisestä mittausdatasta jää pois resoluution ulkopuolelle. Yleisesti anturit ovat rajoitettuja tietyllä taajuusalueella, eli pystyvät mittaamaan vain tietyllä taajuusalueella, eli niillä on tietty resoluutio. [3.]

Kaikilla sensoreilla on rajallinen vasteaika, joka tarkoittaa sen reagointinopeutta fyysisiin muutoksiin. Lisäksi joillain sensoreilla on vastaavasti myös häiveaika, mikä tarkoittaa aikaa, joka menee signaalin sammumiseen aina askeleen jälkeen. Vasteaika ja häiveaika kertovat ylemmän ja alemman taajuusalueen rajat, kaistanleveys antureilla kertoo näiden kahden rajan välisen alueen suuruuden. [3.]

4.2 Mittausjärjestelmän yleinen rakenne

Antureilla tunnustellaan kohdetta ja muodostetaan sitten signaali, joka luetaan ja tulkitaan. Mittauksissa vaikuttavia tekijöitä on muitakin kuin vain mitattava kohdesuure. Signaalin siirto, tallennus, käsittely ja muut tehtävät toiminnot voivat vaihdella paljonkin järjestelmän tarkoituksesta riippuen. [2.]

Yleensä anturin signaali muunnetaan sähköiseksi signaaliksi, sillä sitä on helppo siirtää ja käsitellä. Esimerkiksi termoparianturit, joita käytetään lämpötilan mittaamiseen, antavat millivolttisen jännitteen. Platinavastusanturit, joilla myös mitataan lämpötilaa, antavat resistanssin, joka myös luetaan sähköisesti. Antureissa, joilla mitataan voimaa tai painetta, on yleensä venymäliuskaelementtejä, jotka myös antavat kohdesuureen resistanssin avulla. Mittaustiedot käsitellään yleensä tietokoneella, johon tiedot siirretään

A/D-muuntimen avulla. A/D-muunnin, eli analogia-digitaalimuunnin, muuntaa sähköisen jännitteen tietokoneella luettavaan muotoon. [2.]

4.2.1 Liitännän merkitys asennuksessa

Liitäntöjen ja kiihtyvyyssanturien vaihtoehtojen valinnassa on otettava huomioon liitännän vaikutus mittaustarkkuuteen, sillä liitäntä saattaa hävittää osan taajuuksista. Turvallinen tulos saadaan kiinnittämällä kiihtyvyyssanturi nastaliitännällä suoraan referenssikappaleeseen, ilman välillisiä liitäntäkappaleita. Suora liitos mitattavan kappaleen tasaisimpaan kohtaan tuottaa useimmiten korkeimman mittaustaajuuden, joten se myös tarkoittaa laajinta taajuusaluetta. Massan lisäys kiihtyvyyssanturiin, kuten liimattava istukka tai magneettinen alusta, saattavat vaikuttaa tunnistusjärjestelmän resonanssitaajuuteen sekä taajuusalueeseen ja näin ollen vaikuttaa mittaustulokseen. Myös mukautuvat materiaalit, kuten kumi, saattavat herkästi luoda mekaanisten taajuuden suodatuksen eristään tai vaimentaen korkeita taajuuksia. Anturien asennustekniikkaan siis kannattaa, ja pitää, kiinnittää huomiota. [3.]

Nasta- tai ruuviliitännät säilyttävät suurimman osan taajuuksista, joten tämä on turvallisin vaihtoehto kun vaaditaan suurta tarkkuutta. Ensiksi hiotaan tai koneistetaan mitattavaan kappaleeseen, vähintään anturin kannan kokoinen alue, valmistajan suositusten mukaan. Parhaimman lopputuloksen saamiseksi, erityisesti korkeilla taajuuksilla, mahdollisimman sileä kiinnityspinta on tärkeä. Nastakiinnityksessä on otettava huomioon valmistajan antamat tekniset tiedot reiälle sekä kierteelle. Vääränlaiset kierreet eivät mahdollisesti vaikuta vain mittaustulokseen, vaan saattaa myös vahingoittaa anturia. Valmistajan antamia momentteja tulisi myös aina noudattaa sekä mitata tarkkaan oikeaan momenttiin, käyttäen kalibroitua momenttiavainta. [3.]

Liimaliitäntä saattaa monesti olla hyvä vaihtoehto kun nasta tai ruuviliitäntä ei ole mahdollista tai on epäkäytännöllinen. Erillisen liimausalustan käyttö on suositeltavaa, jottei liima vahingoita anturin omaa kiinnityspintaa tai tukikierteitä. Yleisimmin liimaliitäntä tuottaa sähköeristyksen, joka poistaa mahdollista melun tai sähköä aiheuttamaa kohinaa. Suositeltu liimausvaihtoehto riippuu aina kyseessä olevasta sovelluksesta. Vaha tarjoaa

erittäin sopivan, helposti irrotettavan vaihtoehdon huoneen lämmössä toimimiseen. Kaksi-komponenttiliimat tarjoavat korkeaa jäykkyyttä ja pysyvää liitانتää, jolloin korkeat taajuudet säilyvät paremmin. [3.]

Magneettiliitانتä tarjoaa sopivan, väliaikaisen liitانتävaihtoehdon magneettisille pinnoille. Korkeaa vetovahvuutta tarjoavat magneetit tarjoavat myös parhaan korkeiden taajuuksien säilymisen. Kiilamagneetteja käytetään usein, kun asennus tapahtuu kaareville pinnoille, kuten moottoreissa, koteloissa ja putkissa. Kuitenkin kiilamagneetit yleensä saattavat alentaa merkittävästi mitattavaa taajuusaluetta. Parhaan lopputuloksen saamiseksi myös magneetti tulisi kiinnittää tasaiselle, sileälle pinnalle. [3.]

Anturinkärjet, sekä käsikahvat antureille ovat usein käytännöllisiä, kun muita vaihtoehtoja ei pystytä käyttämään. Ne ovat myös hyviä käyttää siinä vaiheessa, kun etsitään parasta mahdollista paikkaa kiinnittää antureita. Näitä vaihtoehtoja ei kuitenkaan voi suositella käytettäväksi yleisesti vaativissa mittauksissa, sillä niissä on paljon ristiriitaisuuksia mittaustulosten kannalta. Käsivoiman suunta ja suuruus jo luovat muuttujia, joita ei pystytä täysin määrittämään, aiheuttaen näin epäluotettavuutta lopputulokseen. Näitä vaihtoehtoja voidaan yleisesti käyttää mitattaessa vain taajuuksia, jotka ovat alle 1 000 Hz. [3.]

4.2.2 Mahdollisia häiriötekijöitä asennuksessa

Kiihtyvyyssantureita asennettaessa sähköä johtaville pinnoille, täytyy ottaa huomioon mahdolliset maavirran aiheuttamat saasteet. Saastetta aiheuttavat kaikki sähköiset laitteet, jotka on maadoitettu kyseiseen rakenteeseen, kuten moottorit, pumpput sekä generaattorit. Näissä tapauksissa maavirta saattaa kulkeutua anturin liitännän kautta mittaus-signaaliin. Kun anturit ovat maadoitettuna eri kohteeseen kuin signaalinmuokkauslaitteisto, saattaa tuloksissa esiintyä ylimääräisiä taajuuksia. Tällainen tapahtuma saattaa aiheuttaa tuloksissa käytössä olevan sähköverkon taajuuden näkymistä, eli näkyy virheellisenä datana tai poikkeamana signaalissa. Suomen sähköverkossa tämä näkyy ylimääräisenä 50 Hz:n taajuutena. Tällaisissa tapauksissa on suositeltavaa sähköeristää anturi mitattavasta kohteesta. Tämän voi tehdä muutamalla tavalla. Suuri osa kiihtyvyyssantureista on mahdollista saada valmiiksi eristetyllä kannalla. Osassa standardimal-

leista tämä ominaisuus on vakiona, mutta yleisesti sen saa vähintäänkin lisäominaisuutena. Eristeiden käyttö, kuten paperi magneetin ja liitäntäpinnan välillä, on tehokas tapa eristää sähkövirtaa kulkeutumasta signaaliin. Kuitenkin täytyy muistaa, että tällaiset pehmeät materiaalit saattavat alentaa mittarin taajuuden ylärajan havaitsemista. [3.]

Kaapelit tulisi turvallisesti kiinnittää rakenteeseen puristimella, teipillä tai muulla keinolla, kaapelin heilumisen ja venymisen estämiseksi. Kaapelin ”piiskautuminen” voi tuottaa kohinaa signaaliin, erityisesti korkean impedanssin signaalin kulkeutumiseen. Tätä ilmiötä kutsutaan triboelektroniseksi ilmiöksi. Myös kaapelin kiristyminen lähellä kumpaakaan laitetta, anturia tai signaalin vahvistinta, saattaa johtaa ajoittaiseen yhteyden pätkimiseen tai katkeamiseen kokonaan. Mahdolliseen kosteuden tai liian suojaamiseen kannattaa käyttää silikonista tai johdoille tarkoitettua kutisteletkua. Silikonista käytetään yleensä liitäntäkohdissa ja kutisteletkua muuten koko johdossa. [3.]

4.2.3 Värähtelyilmiöt ja AC-mittaukset

Värähtelyilmiöitä mitattaessa halutaan tietää jaksonpituuden yli laskettu keskiarvo, jolloin mittarin hitautta voidaan jopa hyödyntää. Mittarin hitaus itsessään jo aiheuttaa lyhyen mittausjakson keskiarvottomista. Sovelluksesta riippuen keskiarvo kuitenkin määritellään eri tavoin, joten mittareiden valinnassa pitää silti olla tarkkana. [2.]

Aritmeettinen keskiarvo, joka yleisesti käsitetään yksinkertaisesti vain keskiarvona, kertoo suureen tasakomponentin, tarkoittaen lukujen summaa jaettuna niiden lukumäärällä. Jaksollisista suureista yleensä on kuitenkin kiinnostuttu niiden tehollisarvosta tai tasasuunnatusta keskiarvosta. Tehollisarvo kuvaa esimerkiksi virran tai jännitteen siirtämää tehoa kuormitukseen. Tasasuunnatulla keskiarvolla kerrotaan vaihtojännitteen tasasuunnattu keskiarvo, sillä vaihtojännitteen keskiarvo on nolla. Loppujenlopuksi keskiarvon muodostamistapaan vaikuttavat käyttöön liittyvät tekijät, sekä mittarityypin käyttömahdollisuudet. [2.]

4.2.4 Mittausanturit

Teknillisissä mittauksissa tärkeimpiä kysymyksiä on löytää riittävän tarkka ja spesifinen anturi, tarkemmin vielä oikean tuntoelimen löytäminen. Tuntoelimen lisäksi anturi saattaa sisältää myös muita komponentteja sekä toimintoja. Yleensä näitä komponentteja ovat esimerkiksi suojakuoret sekä kompensointielimet. [2.]

Anturien signaalia joudutaan yleensä muuntamaan, jotta sitä voidaan siirtää. Erityisesti laajoissa järjestelmissä hyöty kasvaa, kun mittauslaitteista saadaan yhtenäinen standardisignaali. Tällaisista mittalaitteista käytetään nimitystä mittauslähetin. [2.]

Mittalaitteissa voi olla ilmaisain, se ei välttämättä ole varsinainen anturi. Ilmaisain voi kertoa jonkin mitattavan alueen ylittymisestä, mutta se ei varsinaisesti kerro tarkkaa suureen arvoa. [2.]

Signaalin soveltuvuus siirrettäväksi ja käsiteltäväksi on myös tärkeää. Kohdetta kuvaava tiedon hankinta on mittalaitteille ja mittausjärjestelmille niiden tärkein tehtävä. Tämä osuus onkin anturin tehtävä, ja antureista puhutaan joskus informaatiokoneina. [2.]

Anturin muodostettua signaalin, sen käsittelyllä ei voida varsinaisesti tuoda lisää hyödyllistä informaatiota. Signaalin käsittelyllä voidaan kuitenkin tiivistää tarpeellista informaatiota, sekä poistaa tarpeettomia tai haitallisia osia signaalista. Tuntoelimissä syntyy haitallista informaatiota, kun ne reagoivat johonkin muuhun kuin tarkoitettuun kohdesuureeseen. Näitä ei tarkoituksellisia mittaussuureita kutsutaan vaikutussuureiksi, muita tarkoituksettomia häiriösuureita syntyy ympäristön aiheuttamana laitteistoon ja siirtoteihin. Tällaisia vaikutussuureita voidaan ehkäistä mm. oikeilla asennustavoilla ja huolellisella mittaussuunnittelulla. [2.]

Informaatiota ei pystytä siirtämään ilman energian siirtämistä samalla. Informaation siirtämiseen sopivia signaalimuotoja ovat esimerkiksi seuraavat:

- sähköjännitteen amplitudi
- sähkövirran amplitudi
- sähkövirran taajuus
- optinen pulssijono
- sähköinen pulssijono.

Anturitkin tarvitsevat energiaa muodostaakseen informaatiota, joten mittauksissa sovelletaan monia energiamuotoja. Käsittelytavan mukaan anturit jaetaan kolmeen pääluokkaan:

- generaattorityyppiset anturit
- muokkaintyyppiset anturit
- modulaattorityyppiset anturit.

Generaattorityyppinen anturi hyödyntää kohteen energiaa ja muokkaa signaalin käsiteltävään energiamuotoon. Muokkaintyyppinen anturi toimii samalla periaatteella ottaen energiansa kohteestaan, mutta ei muokkaa saamaansa energian tyyppiä, vaan sen signaalin energia on samanmuotoista kun sen mittauskohteessakin. Modulaattorityyppinen elin rakentaa kohdesuureesta signaalin, jonka energia tulee erillisestä lähteestä. [2.]

4.3 Signaalin käsittely

4.3.1 Käsittelyn tarkoitus

Päätarkoituksena mittauksissa on tiedon hankkiminen kokeellisesti. Yleisesti mittalaitteet on suunniteltu niin, että riittää kertaalleen mittaaminen. Ainakin silloin, kun mittaustilanteessa ei esiinny poikkeamia tai häiriöitä. [2.]

Mittaamalla saatuja tietoja kuitenkin yleensä halutaan analysoida, jolloin pyritään löytämään poikkeamat tai häiriöt. Analysointia voidaan tehdä esimerkiksi tilastomatematisilla menetelmillä, jolloin selvitetään esimerkiksi arvojoukon jakautumaa. Jos tilastolliset ominaisuudet pysyvät mittausarvoa määritettäessä samana, voidaan mittausarvoja ottaa monia ja käsitellä niitä sitten jollain työkalulla. [2.]

Mittaussignaalin analysointi on tarpeellista mitattaessa kohdetta, joka on muutostilassa. Anturit tuottavat tietoa mittauskohteistaan jatkuvasti, mutta haluttu tieto saadaan vain tutkimalla yhtäaikaisten signaalien välisiä riippuvuuksia ryhmänä. Informaatio saattaa löytyä suoraan signaalien spektreistä, tai voidaan joutua tutkimaan aikatazon tunnusfunktioita, eli korrelaatiofunktioita. Kunnonvalvonnassa seurataan myös säröytymistä, eli seurataan vikaantumisen kehittymistä. Häiriöanalyysissä tutkitaan eri mittapisteiden välisiä vuorovaikutuksia ja etsitään prosessin tai koneiston häiriökohtaa. [2.]

Mittaussignaalin käsittelyllä on joskus myös toisenlainen tarkoitus. Etsityn tiedon kannalta alkuperäinen signaali sisältää myös informaatiota, jota joudutaan pitämään häiriönä. Signaalin käsittelyllä pyritäänkin muokkaamaan signaalia niin, että siitä poistetaan ylimääräiset häiriökomponentit. Näin saadaan signaalista esiin pelkistetty ja selvä informaatio siitä, mitä halutaan löytää. [2.]

Tietokoneet ovat tulleet suureksi avuksi mittaussignaalien analysoinnissa, sillä niillä pystytään keräämään suuria määriä signaaliarvoja nopeasti ja tarkasti. Lisäksi ei tarvita monia koneita, sillä samoilla tietokoneilla voidaan käyttää myös ohjelmia, jotka tarjoavat hyvän käyttöliittymän mittalaitteiden käyttämiseen. Lisäksi vielä samoilla tietokoneilla voidaan käyttää analyysiohjelmia, joten mittauksen analysointi ja signaalin käsittely onnistuvat helposti jo mittauspaikalla. Tietenkin informaation siirtäminen myöhempää analysointia varten tai tehokkaammille koneille onnistuu myös helposti. [2.]

4.3.2 Zoom FFT

Joissain tapauksissa halutaan saada huomattavasti tarkempi resoluutio tuloksiin, jollain tietyllä kapeammalla taajuusalueella. Tällöin voidaan käyttää Zoom FFT:tä, tarkentamaan tätä aluetta. Zoom FFT:llä tarkoitetaan rajatulle taajuusalueelle kohdennettua fast fourierin muunnosta. Tällä tavalla voidaan käyttää samaa mittausaiheyttä pienemmälle

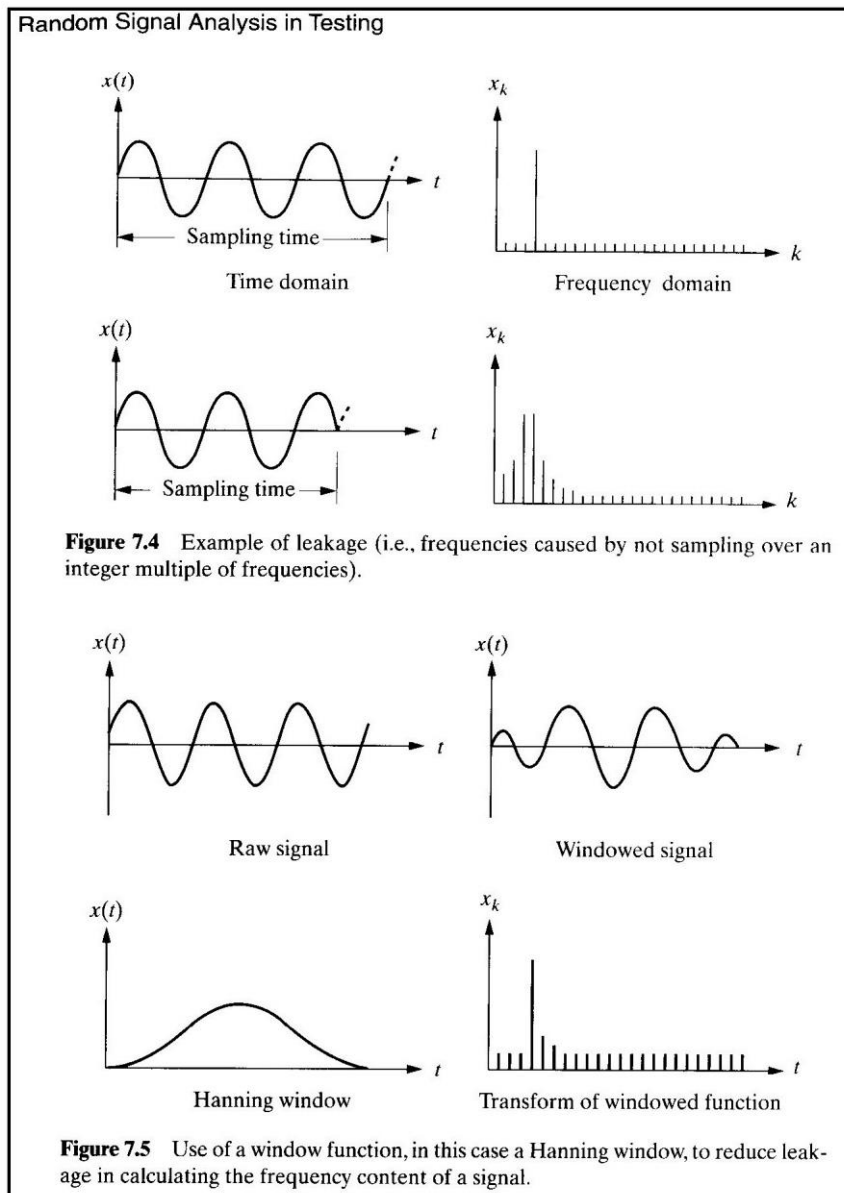
alueelle kuin alkuperäisessä tilanteessa koko taajuusalueelle. Zoom FFT:tä voidaan siis hyödyntää, kun käytössä ei ole analogista alipäästösuodinta. Muutenkin mittausjärjestelmän vaatimukset pysyvät samana, käytettäessä Zoom FFT:tä, kuin mitattaessa koko taajuusaluetta. Toisin sanoen mittausjärjestelmän kapasiteetti voidaan hyödyntää tarkennetulle taajuusalueelle. [9.]

4.3.3 Vuoto

Digitaalisen analysoinnin mahdollistamiseksi täytyy jaksollinen signaali jakaa äärelliseen ajanjaksoon. Tästä aiheutuu kuitenkin uusi ongelma, jota kutsutaan vuodoksi, "leakage". Jotta signaalista saadaan äärellinen, täytyy se katkaista jostain kohtaa. Olisi helppoa, jos leikkaus onnistuisi aina samassa vaiheessa signaalia, jolloin signaali jatkuisi tismalleen samassa vaiheessa kuin se loppuu. Tämä on kuitenkin käytännössä mahdotonta, kun analysoidaan signaalia, joka sisältää monia eri taajuuksia. Kuvassa 4 näemme, miten aikatasossa katkaistu signaali käyttäytyy taajuustasossa. Kun signaali katkaistaan sattumanvaraisesti vain jostakin kohtaa, ei FFT ymmärrä sitä ja taajuudet vuotavat vierisille spektreille. [12.]

Vuotoa voidaan korjata ikkunoinnilla. Ikkunafunktiolla signaalia muokataan sellaiseksi, että saadaan hyppäys viimeisestä signaalin vaiheesta ensimmäiseen mahdollisimman pieneksi. Näin saadaan taajuuden vuotoa vähennettyä ja tulokset pysyvät realistisempina. [12.]

Tässä työssä käytetään Hanning-ikkunointifunktiota (ks. kuva 4).



Kuva 4. Kuva signaalin vuodosta ja ikkunointifunktion vaikutuksesta [12].

4.4 Signaalianalyysi

Signaalianalyysille on monia eri tarkoituksia, sen avulla voidaan esimerkiksi:

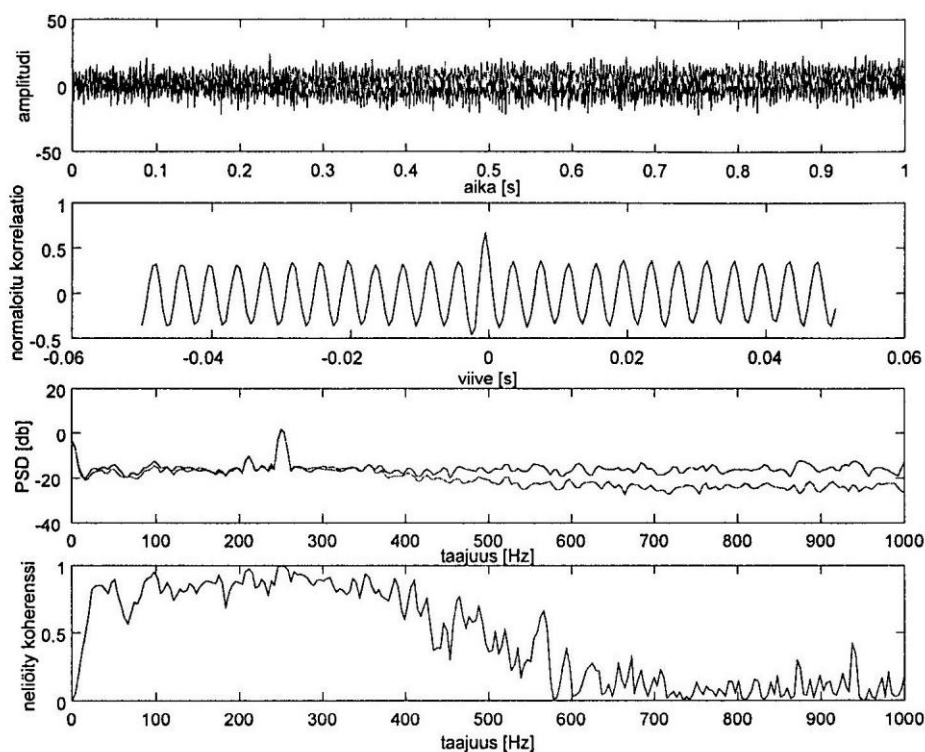
- löytää kehittyvä vika kohteissa, ennen varsinaisen vahingon tapahtumista (teknillinen diagnostiikka)
- tutkia ilmiöitä, sekä niiden vuorovaikutuksia ja etenemistä
- etsiä keinoja erottaa häiriöt hyötysignaalista (optimisuoatus)
- tunnistaa matemaattinen malli fysikaaliselle prosessille
- seurata järjestelmän toimintaa ja tilaa (kunnonvalvonta). [2.]

4.4.1 Analyysi taajuustasossa

Signaalianalyysit tehdään yleensä amplitudi-, aika- ja taajuustasossa (ks. kuva 5). Joskus on riittävää kun käsitellään näistä vain yksi (yleensä se on amplituditaso, tässä työssä käytetään taajuustason analyysiä). [2.]

Amplituditason analyysissä tuotetaan tietoa tarkasteltavan suureen jakautumasta. Keskiarvo ja varianssi ovat tärkeimpiä tunnussuureita. Nämä usein lasketaan suoraan yhdestä aikamuotoisesta signaalista. Tällaisella menettelyllä yleensä tosin signaalille syntyy erityisvaatimuksia, jotka täytyy ottaa huomioon jo mittausvaiheessa tai sitä ennen. [2.]

Taajuustasossa signaalitehon jakautumista kuvataan signaalin tehospektrillä. Tämä voidaan määrittää yleensä Fourierin muunnoksella signaalin autokorrelaatiofunktioista. Tehospektri voidaan kuitenkin määrittää myös suoraan signaalista, tarvitsematta välittää korrelaatiofunktioista. [2.]



Kuva 5. Signaalianalyysin tulosteita. Ylimmässä kuvassa on analyysin kohteena oleva signaalipari. Toisessa kuvassa on alempaa signaalia vastaava korrelaatiofunktio normeerattuna välille 0...1. Tästä kuvasta nähdään korrelaatiofunktioon "jäävä" värähtely, joka indikoi vastaavalla taajuudella olevaa vaimenematonta värähtelyä. Kolmannessa kuvassa, jonka mukaan tässä työssä taajuudet käsitellään, ovat molempien signaalien tehospektrit; ordinaatta-akselilla on desibeliasteikko, jolloin voidaan tarkastella laajaakin dynamiikkaa. Tässä kuvassa näkyvät selvästi molempien signaalien spektriipiikit, jotka vastaavat korrelaatiofunktion värähtelyä. Alin kuva esittää signaalien välisen koherenssifunktion; yli 600 Hz:n taajuuksilla signaalien välisistä vuorovaikutuksista ei voida tehdä päätelmiä. [2.]

Usein on kiinnostuttu myös jakauman muodosta. Yleisimmin kyseessä on normaalijakauma, oletetuista arvoista poikkeavia jakaumia testataan jakautumistestillä. [2.]

4.4.2 Korrelaatioanalyysi

Tehtäessä analysointia aikatasolla tarkastellaan signaalin lineaarista suureiden riippuvuutta. Tämä voidaan tehdä saman tai eri signaalin aikaisemmista tai myöhemmistä arvoista. Analyysiä tehtäessä määritetään korrelaatiofunktio, missä muuttujina ovat suunnat ja aika. Funktiota kutsutaan autokorrelaatiofunktioksi, jos muuttujat pysyvät samoina. Jos ne eivät pysy, kutsutaan funktiota ristikorrelaatiofunktioksi. Jos keskiarvot poistetaan

ja muodostetaan funktiot, niitä kutsutaan autokovarianssifunktioiksi ja ristikovarianssifunktioiksi. [2.]

Korrelaatioanalyysin korrelaatiokerroin skaalattuna muuttujien hajonnalla vastaa kovarianssifunktiota. Täydellinen korrelaatio antaa skaalattua arvoa vastaavan luvun +1 (tai -1). Lisäksi muuttujien aikakäyttäytyminen sisältyy kovarianssifunktioihin. Autokovarianssifunktion avulla voidaankin tutkia mm. signaalin ominainen kulkuaika pisteiden x ja y välillä. Funktion maksimi sijaitsee tämän aika-arvon kohdalla. [2.]

4.4.3 Spektrianalyysi

Signaalin tehospektrillä kuvataan signaalitehon jakautumista taajuustasossa, se saadaan laskemalla Fourierin muunnos signaalin autokorrelaatiosta. Samalla tavalla lähdettäessä kahden eri signaalin ristikorrelaatiofunktiosta, saadaan taajuustasossa vuorovaikutusta kuvaava ristitehospektri. Fourierin muunnoksen avulla voidaan määrittää tehospektrit myös suoraan signaaleista, jolloin ei tarvitse määrittää korrelaatiofunktiota. Tehospektristä voidaan laskea myös neliöllinen koherenssifunktio. Sillä voidaan ilmaista eri signaalien spektrien keskinäinen vaikutus kussakin kohdassa. Koherenssifunktion arvo eri taajuuksilla voi olla erisuuruinen, kuitenkin aina välillä $0 \dots 1$. [2.]

4.4.4 Siirtotie- ja kontribuutioanalyysi

Monimuuttuja-analyysissä yleensä kiinnostutaan mittauskohteiden välisestä vuorovaikutuksesta. Tällaista analyysiä tehdessä käytetään paljon niin sanottuja parametrisia, eli jakautuvia, signaalianalyysimenetelmiä. Signaalijoukosta määritetään parametrit, jotka kuvaavat koko joukkoa ja joiden avulla voidaan määrittää useampia järjestelmää kuvaavia ominaisuuksia. [2.]

4.4.5 Analyysin kulku

Kuten mittauksissa yleensäkin, signaalin analysointiin liittyy monesti sama ongelma, eli kohdetta ei tunneta riittävästi entuudestaan. Tämän vuoksi on tärkeää, että tehdään huolelliset tarkistukset ennen varsinaista analyysin suorittamista. Analyysin valmistelun ja tarkistusten merkitys näkyy selvästi lopputuloksessa, vaikkakaan kaikki tehtävät eivät vaadi kaikkia työvaiheita. [2.]

Analyysissä täytyy ottaa huomioon monia asioita, tärkeimpiä näistä on signaalin laskostuminen. Signaalin laskostumisella tarkoitetaan sitä, että liian suurta taajuutta mitataan liian pienellä näytteenottotaajuudella, jolloin signaali vääristyy ja korkeat taajuudet tulkitaan virheellisesti matalina taajuuksina. Tätä voidaan ehkäistä Nyqvistin teorian mukaan niin, että mitataan vähintään kaksinkertaisella taajuudella suurimpaan esiintyvään taajuuteen nähden. Laskostumista ei voida nähdä tai poistaa millään laskukaavalla tms. enää mittauksen jälkeen. Käytännössä mittausjärjestelmässä on analoginen alipäästösuodin, jolla suodatetaan pois korkeat taajuudet. Näin läpi pääsee vain matalat taajuudet.

5 Värähtelyn hallinta

5.1 Värähtelynhallintamenetelmät

Rakenteen vaimennus on tärkeimpiä tekijöitä mekaanisen värähtelyn hallinnassa. Se on yksi rakenteen vasteen ja siihen kohdistuvien dynaamisten voimien määrittävistä tekijöistä. Sitä voidaan hyödyntää myös värähtelynhallinnan laajuuden ja laadun mittarina. Vaimennuksella viitataan rakenteen itsensä vaimennuskykyyn vaikuttaa sen värähtelyihin. Tähän vaimennuskykyyn pyritään vaikuttamaan rakenteellisella suunnittelulla, materiaalien ominaisuuksilla sekä lisäosilla tai lisämateriaaleilla. [6.]

Suuria vaimennuksia tavoitellessa, vaativissa tapauksissa ei rakenteellinen suunnittelu yksin riitä. Tällöin on välttämätöntä huomioida vaimentavien materiaalien käyttö rakenteiden suunnittelussa ja tarkastelussa. Tämä osuus värähtelynhallinnasta on nykyään suhteellisen voimakkaasti kehittyvä ala. [6.]

Mekaanista värähtelyä voidaan hallita eri keinoin, joita ovat passiivinen, aktiivinen sekä puoliaktiivinen vaimennus [5].

5.2 Passiivinen vaimennus

Passiivisessa vaimennuksessa pyritään poistamaan värähtelevästä systeemistä energiaa ja muuttamaan sitä toiseen muotoon, esim. lämmöksi. Passiivinen vaimennus on helppo toteuttaa missä tahansa kohtaa rakenteissa, lisäksi se on yleensä aina stabiili. Käytännössä passiivista vaimennusta on mahdotonta saada kuitenkaan täysin optimaaliseksi. Passiivinen vaimennus voidaan toteuttaa materiaalivalinnoilla, liitoksilla, ympäröivällä väliaineella tai ulkoisella erillisellä vaimentimella. [5.]

5.2.1 Dynaaminen massavaimennin

Dynaamisen massavaimentimen, josta käytetään myös nimitystä viritetty massavaimennin, toimintaperiaate on resonanssissa värähtelevä apusysteemi. Tämän apusysteemin tarkoitus on kumota tai vaimentaa alkuperäisen systeemin värähtelyn aiheuttamia voimia. Tällainen vaimennin voidaan virittää vaimentamaan vakiotaajuista värähtelyä, mutta vaihtelevalla taajuudella sitä ei pystytä käyttämään. Lisäämällä vaimentimen apumassaa ja muuttamalla vaimennuksen jäykkyyttä, voidaan kyllä suurentaa vaimennuksen kais-tanleveyyttä. Tällä periaatteella ei kuitenkaan pystytä vaimentamaan värähtelyn ”alkupiikkiä”, eli vaikka herätteen jälkeinen värähtely voidaan teoriassa vaimentaa, niin heräte kulkee kuitenkin rakenteen läpi. Toisin sanoen tällaisella vaimennuksella tapahtuu ainakin yksi värähdys joka tapauksessa. [5.]

Suurissa rakenteissa tällainen massavaimennin ei yleensä toimi kovinkaan hyvin, vaikka se olisi kuinka optimaalisesti toteutettu. Tämä sen vuoksi, että vaimennusteho riippuu pelkästään vaimentimen ja vaimennettavan rakenteen massasuhteesta. Yleensä tämä suhde on pieni, kun kyseessä on suuria rakenteita. Massasuhteen ja vaimennuksen ollessa pieniä, kasvavat apumassan vasteet suuriksi. Tällöin apumassa jatkaa värähtelyä

vielä alkuperäisen kuormituksen jälkeen. Samoin apumassan vakiotilan saavuttaminen vie aikaa ja on siis tehotonta. [5.]

5.2.2 Impaktivaimennin

Impaktivaimentimen toimintaperiaate perustuu suljetussa tilassa vapaasti törmäilevään massaan, idea on siis hieman sama kuin dynaamisessa vaimentimessa, jolloin törmäilevä massa aiheuttaa iskeytyessään värähtelyä kumoavan vastavoiman. Näitä kahta tekniikkaa voidaankin yhdistää, eli lisätä normaaliin dynaamiseen massavaimentimeen tällainen iskuvaimennin. Tällöin saadaan myös pienemmällä massalla aikaan suurempi kaistanleveys vaimentimessa. [5.]

Kokonaan irtonainen massa ei aina toimi kunnolla, sillä painovoiman takia vaimentimen asennolla on suuri merkitys. Siksi monissa sovelluksissa tällaisessa vaimentimessa liikkuva massa onkin jousin kiinnitettynä koteloonsa, tai mihin tahansa apumassan onkaan tarkoitus törmäillä. [5.]

5.3 Aktiivinen vaimennus

Aktiivinen vaimennus tarkoittaa, että jollain apukeinolla aktiivisesti luodaan värähtelylle vastavärähtely tuomalla systeemiin lisää energiaa. Tällä tavoin pyritään täyttämään värähtelyspektrissä näkyvät ”kuopat” jolloin spektrissä ei olisi eroja, ja näin ei myöskään värähtelyjä. Aktiivinen vaimennus voidaan suunnitella täysin optimaaliseksi ja sopeutuvaksi, mutta se vaatii tarkan tuntoelin-, ja säätöjärjestelmän. Yleisesti käytössä olevia sovelluksia ovat aktiiviset massavaimentimet, aktiiviset jänteet, pulssivaimentimet sekä aerodynaamiset lisälaitteet. Aktiivinen vaimennus saattaa usein olla jopa passiivista ratkaisua helpompi ja edullisempi toteuttaa, mutta se vaatii koko ajan energiaa ja säätöjärjestelmän toimiakseen. [5.]

5.3.1 Aktiivinen massavaimennin

Aktiivinen massavaimennin toimii samalla periaatteella kuin dynaaminen massavaimennin. Aktiivisessa massavaimentimessa vain apumassaa ohjataan koko ajan aktiivisesti esimerkiksi sähkömoottorilla, hydraulisesti tai jollain vastaavalla mekanismilla. Tällöin saadaan pienemmällä apumassalla parempi vaimennuksen taajuusvaste ja kaistanleveys. [5.]

5.3.2 Rakenteen sisäinen aktiivinen toimielin

Tällaisen toimielimen periaatteena on luoda esim. ristikkorakenteissa paikallisille värähtelyille vastavoima, jolloin paikallinen värähdys ei pääse synnyttämään herätettä, joka kulkisi koko ristikkorakenteen läpi. Tällainen laite on toteutettu yksinkertaisesti liittämällä toimielin ja voima-anturi sarjaan niin, että anturin signaalia käännetään 90° ja syötetään toimielimelle. [5.]

5.4 Puoliaktiivinen vaimennus

Puoliaktiivisessa vaimennuksessa systeemin värähtelyä pyritään hallitsemaan systeemin ominaisuuksia muuttamalla eli lisätään jäykkyyttä tai säädetään vaimennusta sopivissa kohdissa rakenteita käyttäen passiivisia elementtejä, joita ovat massa, jousi ja vaimenninelementti. Muuttamalla näistä elementeistä jonkin ominaisuuksia, saadaan aikaan puoliaktiivinen vaimennus. Siinä tarvitaan kiihtyvyy- ja suhteellisen nopeuden anturit, sekä säätöyksikkö. Mikä tahansa laite, jonka toimintaa voidaan säädellä, voi toimia puoliaktiivisena vaimentimena. Esim. jarrut ja kytkimet, sekä laitteet joissa käytetään magneettista tai elektroviskoosia nestettä. Itse systeemiin ei kuitenkaan tuoda jatkuvaa uutta energiaa. [5.]

5.5 Perusteluja

Aktiiviselle ja puoliaktiiviselle värähtelynhallinnalle hyviä perusteluja ovat mm. seuraavat:

- Värähtelyongelmaa ei saada poistettua pelkästään pienentämällä herähteitä, tai herähteitä pystytään pienentämään tarpeeksi.
- Herähteet vaihtelevat huomattavasti
- Systeemin dynaamisia ominaisuuksia ei voida muokata, rakenteen painon, mittojen tai muodon takia.
- Passiiviset keinot saattavat olla liian monimutkaisia ja kalliita toteuttaa. Esim. heräte voidaan pystyä eliminoimaan lähellä vaikutuskohtaa, eli värähtelyä voidaan hallita halutuissa kohdissa ja tarpeen mukaan.

Puoliaktiivisia ja aktiivisia värähtelynhallintakeinoja käytettäessä joudutaan ottamaan huomioon, värähtelyn mekaanisen käyttäytymisen lisäksi, myös säätöjärjestelmän käyttäytyminen. Toisin sanoen kysymys onkin dynaamisen käyttäytymisen hallinnasta mekaniikkaa ja säätötekniikkaa yhdistämällä. [5.]

6 Mittaukset

6.1 Mittausvalmistelut

Aistinvaraisesti voidaan todeta, että värähtelyt johtuvat lavausrobottien liikkeistä. Robotti nostaa paketin kyytiin ja lähtee viemään sitä lavalle, jolloin massan kiihtyvyys aiheuttaa rakenteisiin voiman ja siten herätteen, joka saa sen värähtelemään. Vierestä, ihmisäis- tein tunnustellen, huomataan, että lavaaja tekee pikaliikkeitä, jolloin aiheutuvat suurimmat sykäykset. Heilahdukset voi tuntea selkeästi aina, kun robotti lähtee kiihdyttämään tai jarruttaa. Nämä liikkeet ovat äkkinäisiä, ja tuntuu kuin tässä ei olisi minkäänlaista hidastusta eli pehmeää pysäytystä robottien liikkeissä. Todennäköisesti pieni ohjelman muutos, jolla nämä sysäysliikkeet saataisiin pehmeämmiksi, vähentäisi värähtelyä ja säästäisi komponentteja ylimääräisiltä rasituksilta.

Koska kaikki rakenteet ovat kiinni toisissaan kiinteästi, ilman minkäänlaisia vaimentimia, alkaa koko rakennelma aina värähdellä kokonaisuudessaan. Lisäksi missään ei ole edes suuria massoja, jotka keräisivät värähtelyenergiaa. Kaikki välirakenteet ovat kevytrakenteita, joten lavaajien suuri massa aiheuttaa helposti värähtelyn, joka kulkee läpi koko lavausrivistön. Välirakenteilla tarkoitetaan kevyitä poikkirakenteita, joilla esim. kävelytasanne on toteutettu.

Tätä ongelmaa ja sen laajuutta lähdettiin selvittämään. Aiheuttaako jokainen paketin siirto herätteen, jolla koko lavausjärjestelmä alkaa heilua? Näillä spekseillä tehtiin mittaus suunnitelma, jonka mukaan mittaukset tehtäisiin. Mittaus suunnitelman mukaan tehdyllä mittauksella saadaan tietoa siitä, kuinka yksittäinen lavaaja tai kaikki yhdessä aiheuttavat värähtelyjä koko rakenteeseen.

Tarkastelua päätettiin lähteä tekemään kiihtyvyyssantureilla, ne ovat luotettavia ja riippumattomia kiinteästä referenssipisteestä. Tällaiset anturit löytyivät Metropolia Ammattikorkeakoulun mittaustekniikan laboratorion. Lehtori Tomi Hämäläinen ystävällisesti avusti näiden antureiden valitsemisessa, tarkisti kaikki mittauslaitteet ja teki mittausohjelman LabVIEW-ohjelmalla. Samalla häneltä saatiin joitakin arvokkaita ideoita ja ohjausta mittauksen tekemiseen. Ohjelma antaa ulos suoraan FFT-kuvaajat, joten se helpottaa tulosten analysointia, kun FFT:tä ei tarvitse erikseen laskea.

Mittauksille tehtiin mittaus suunnitelma, jonka mukaan tehtiin kaikki mittaukset järjestelmällisesti. Näin oli helppo seurata mittauksia ja pitää mittauspäiväkirjaa, sekä varmistaa samat mittausmenetelmät kaikille mittauksille. Mittaus suunnitelma on liitteenä 1 ja mittauspöytäkirjan malli, eli yhden mittauksen esimerkkipöytäkirja liitteenä 2.

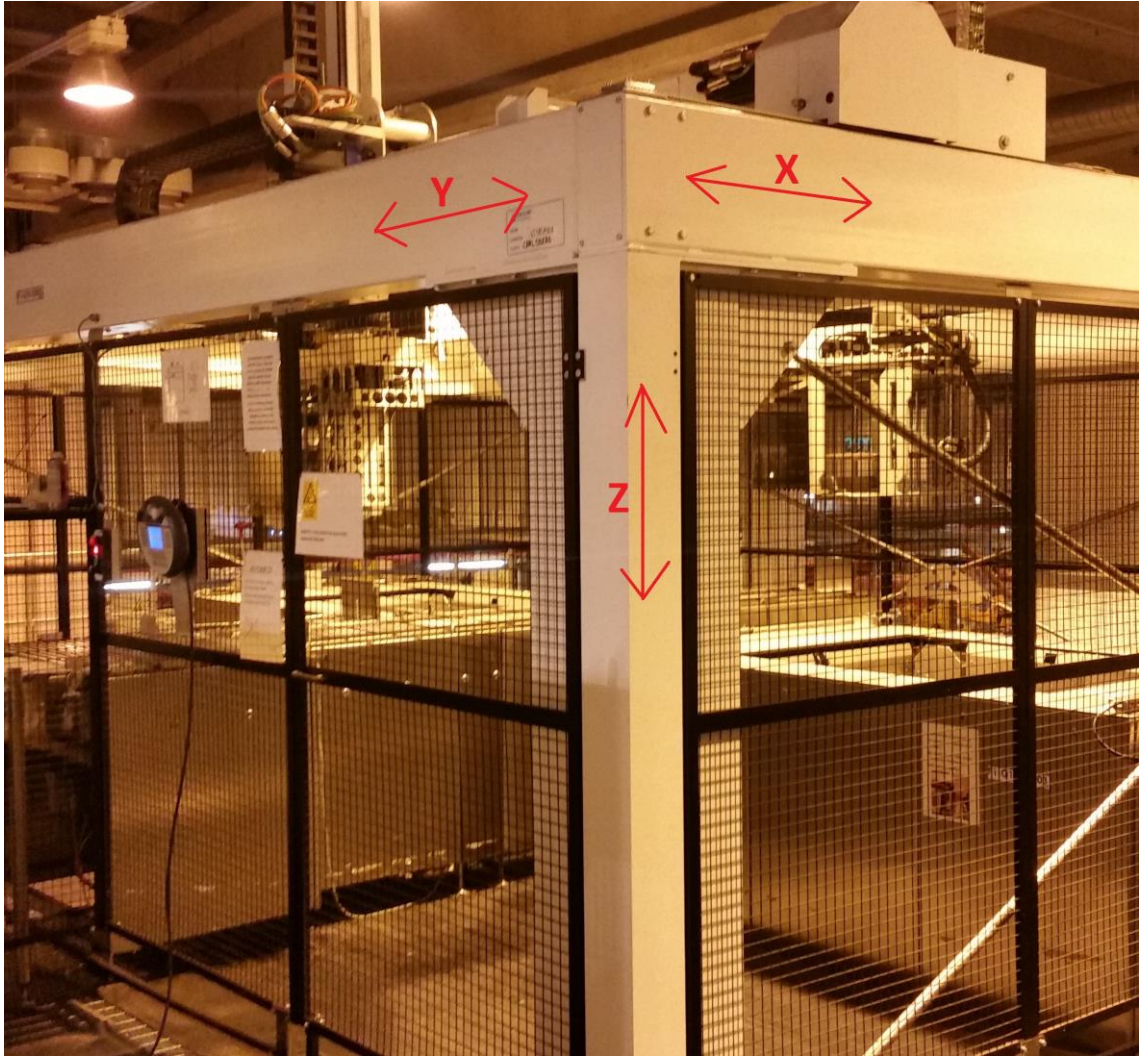
Mittausparametrit alkuperäisissä mittauksissa olivat ohjelman oletusasetukset. Näillä asetuksilla parametrit olivat; mittausresoluutio 2,5 Hz, näytteistystaajuus 40 000 Hz ja kaistanleveys 0 - 1000 Hz. Mittauksessa käytettiin Zoom FFT-näyttöfunktia, joka muodostettiin Hanning-funktiolla.

Mittauksen jälkeen huomattiin vajaavaisuuksia mittauksissa, joten tehtiin vielä lisämittaus yhdelle lavaajalle. Nämä mittaukset tehtiin lavaajalle 2. Alkuperäisistä mittauksista huomattiin kaikkien lavaajien toiminnan ja värähtelyjen vaikutusten olevan samoja, joten yhden lavaajan lisämittaukset voidaan yleistää kaikille.

Tässä kohtaa täytyy kuitenkin huomioida, että alkuperäiset mittaukset eivät ole kovin tarkkoja. Nämä mittaukset tehdäänkin uudelleen asian varmistamiseksi. Lisämittauksista puhuttaessa tarkoitetaan yhdelle lavaajalle, PKS2, tehtyjä mittauksia.

Lisämittauksissa tehtiin muutoksia mittausresoluutioon ja käytettiin alkuperäisen 2,5 Hz:n resoluution sijaan 0,1 Hz:n resoluutiota, kuitenkin mittauksen pituutta lisättiin yhdestä minuutista viiteen minuuttiin. Yksi mittaus tehtiin jopa 10 minuutin mittaisena, mutta sillä ei enää ollut mitään vaikutusta. Kymmenen minuutin ajan olosuhteiden pitäminen samana osoittautui lähes mahdottomaksi. Toisaalta lavaajat toimivat aina epätasaisesti ja lähes arvaamattomasti, joten kaikki eroavaisuudet ovat arkipäivää ja näin ollen tavaltaan kuuluvat mittauksiinkin.

Myöhemmin tehtiin vielä kolmas mittaus, eli lisämittaus 2. Tässä mittauksessa tehtiin monia eri testimittauksia, ja haettiin hyvää mittaustarkkuutta. Lopulta päädyttiin tekemään mittaus jossa kaistanleveydeksi valittiin 0 - 100 Hz, mittausresoluutio oli 0,1 Hz. Tällä mittauksella saatiin tarkat mittaustulokset ja kuvaajia voidaan lukea riittävän tarkasti. Tällä toisella lisämittauksella oli huomattava merkitys lopputuloksen kannalta. Tulokset eivät suuresti eroa alkuperäisistä paljoa, mutta huomattiin että x-suuntainen värähtely onkin matalampi taajuista, kuin y-suuntainen värähtely. Tämä ei alkuperäisistä mittauksista vielä käynyt ilmi, sillä taajuudet ovat niin lähellä toisiaan että ne osuivat samaan piikkiin. Alkuperäisissä tuloksissa kuitenkin nähtiin jo, että x-suuntaiset kuvaajat eivät nouse niin jyrkästi tuohon 7,5 Hz:n piikkiin. Tämä johtuu nimenomaan siitä, että oikeasti ominaistajuus on matalataajuisempaa. Lavaajilla suunnat ovat; lavaajat ovat rivissä y-suunnassa, tätä vastaan kohtisuora suunta on x-suunta ja z:lla on merkitty pystysuuntaa (ks. kuva 6).



Kuva 6. Lavaajien x-, y- ja z- suunnat merkittynä.

Kaikkia kohtia ei aina tehty juuri mittaus suunnitelmassa mainitussa järjestyksessä, vaan tilanteen mukaan toisessa järjestyksessä. Esimerkiksi jos mittauskohteena olevalta lavaajalta ei tullut lavoja juuri mittaus hetkellä, oli helppoa tehdä mittaus, jossa muut lavaajat olivat käynnissä ja kyseinen lavaaja pois päältä. Välillä joutui odottelemaan ja pysäytteleämään muita lavaajia, jotta niille saatiin kaikille lavattavaa ja haluttuja mittauksia tehtyä. Loppujen lopuksi kun oli lavattavaa sopivasti joka yksikössä, niin mittauksen tekeminen oli helppoa.

6.2 Mittausparametrien laskeminen

Mittausparametreja laskettaessa on aina jokin päämäärä tiedossa, eli tiedetään mitä halutaan laskea. Seuraavassa esimerkissä esitetään parametrien laskeminen, kun halutaan parametrit, joilla saadaan tietty resoluutio.

Taajuusresoluutioksi halutaan 0,05 Hz.

$$\Delta f = \frac{1}{T} \rightarrow T = \frac{1}{\Delta f} = 20 \text{ s}$$

Näin saadaan yhden jakson pituudeksi 20 s.

Tämän jälkeen valitaan suurin analysoitava taajuus f_N , josta saadaan näytteistystaajuus f_S , joka on aina 2 kertaa f_N .

$$f_N = 19\,000 \text{ Hz} \approx 20\,000 \text{ Hz} \rightarrow f_S = 2 \cdot f_N = 40\,000 \text{ Hz}$$

Nyt voidaan laskea näytteiden välinen aika:

$$\Delta t = \frac{1}{f_S} = \frac{1}{40\,000} = 0,000\,025 \text{ s}$$

Tästä voidaan jatkaa näytteiden lukumäärään mittausjaksossa N , joka on aina jokin luvun 2 potenssin kokonaisluku 2^n .

$$N = \frac{T}{\Delta t} = 800\,000$$

$$n = 20 \rightarrow 2^{20} = 1\,048\,576$$

$$N = 1\,048\,576$$

Nyt vielä täytyy päättää, kuinka monta keskiarvoa halutaan, k . Valitaan $k = 10$. Tällöin näytteiden yhteislukumääräksi tulee:

$$k \cdot N = 10 \cdot 1\,048\,576 = 10\,485\,760$$

Tämän jälkeen lasketaan vielä koko mittaukseen vaadittava aika:

$$T_K = k \cdot N \cdot \Delta t = 10 \cdot 1\,048\,576 \cdot \frac{1}{40\,000} s = 262,144 s \approx 4,4 \text{ min}$$

Δf = taajuusresoluutio

T = mittausjakson pituus

f_N = Nyqvistin taajuus

f_S = näytteistystaajuus

Δt = näytteenottoväli

N = näytteiden lukumäärä yhdessä mittausjaksossa

k = keskiarvojen lukumäärä

T_K = koko mittauksen aika

Näitä parametreja ei voitu kuitenkaan käyttää viimeisissäkään mittauksissa, sillä ohjelma ei hyväksynyt niitä. Samalla periaatteella voidaan kuitenkin laskea mitkä tahansa halutut mittausparametrit. Mittaukset tehtiin suoraan Zoom FFT:llä, jolloin saadaan esille helpommin haluttu mittausresoluutio vähemmällä laskentateholla. Ohjelmaan syötetään suoraan haluttu taajuusalue, joksi valittiin 0 - 1000 Hz. Sen jälkeen mittauspisteiden lukumäärä, joka valittiin 0,1 Hz:n resoluution saamiseksi, 10 000 mittauspistettä. Mittausajaksi valittiin 3 minuuttia, ja ohjelma tekemään 18 keskiarvotusta.

6.3 Mittalaitteet

Tässä insinööriyössä käytettiin seuraavia mittalaitteita:

Kistler 8636C10 (anturit)

- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| - Kiihtyvyyssalue | +/-10 g |
| - Kiihtyvyyssraja | +/-16 g |
| - Kynnys | 280 μg_{rms} |
| | 140 μV_{rms} |
| - Herkkyys +/-5 % | 500 mV/g |
| - Resonanssitaajuus | 22 kHz |

- Taajuusvaste 1 ... 5000 Hz
- Vaihesiirto 4 ... 2000 Hz(interferenssi)
- Aikajatkuvuus 1 s

National Instruments NI-SCXI-1530 (mittakortti)

- Kanavien lkm 4
 - Virtapiirin vastus 1 M Ω (impedanssi)
 - Herätevirta 4 mA (+-10 %, 24 V)
 - Virtalähteen drift -2.5 $\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$ max
 - Dynaaminen vastus > 400 k Ω
 - Melu (output), 0.1 - 10 kHz 22 μA_{rms} typ, 80 μA_{pp} max
 - Vaimennus 75 dB min, 90 dB typ
-
- Max ulostulovirta +-10 V
 - Ulostulo impedanssi 200 Ω
 - Vahvistimen melu (input), RTO 25 μV_{rms} typ, 125 μV_{pp} max

7 Mittaustulokset

Mittaustulokset löytyvät liitteistä lavaajakohtaisesti, alkuperäisten mittausten mittaustulokset liitteinä 4 - 8, ja viimeisten mittausten tulokset liitteinä 11 – 14.

7.1 Yleinen analyysi

Mittauksista haluttiin saada FFT-kuvaajat, joista nähdään suoraan yleisimmät värähtelyt ja voimakkuudet. Kun lähdetään tarkastelemaan kuvaajia, alkuperäisissä mittauksissa huomataan saman taajuusalueen toistuvuus kaikissa mittauksissa. Näin voidaan todeta sen olevan ongelmallisin taajuus. Myöhemmin nämä vahvimmat taajuudet tarkentuivat, näihin tuloksiin palataan myöhemmin.

Kuvaajissa vaaka-akselilla näkyy aina taajuus ja pystyakselilla värähtelyn voimakkuus.

Kuvaajia luettaessa on hyvä huomata, että käyrät eivät ole kaikkialla samoja, vaikka tarkasteluissa monesti puhutaan yhteisistä piikeistä jne. Näissä tuloksissa tärkeämpää on huomata, että samat käyrät ovat usein keskenään lähes samanmuotoisia, niiden suuruudet vain vaihtelevat ja sehän tässä on ideanakin. Esimerkiksi; kun kaikki lavaajat ovat käynnissä ja tehdään mittaus, niin käyrä on lähes samanmuotoinen kuin samasta paikasta tehty mittaus, kun vain kyseinen lavaaja on käynnissä. Värähtelyn taso kylläkin muuttuu, luonnollisesti värähtely on heikompaa silloin, kun kyseinen lavaaja ei ole käynnissä.

Alkuperäisissä mittauksissa mittausresoluutio oli 2,5 Hz, joten tulokset ovat hieman epätarkkoja ja värähtelykomponenttien erottelu ei näy. Tämä hieman haittaa tulosten tarkastelua, mutta ongelma-alue löytyy silti.

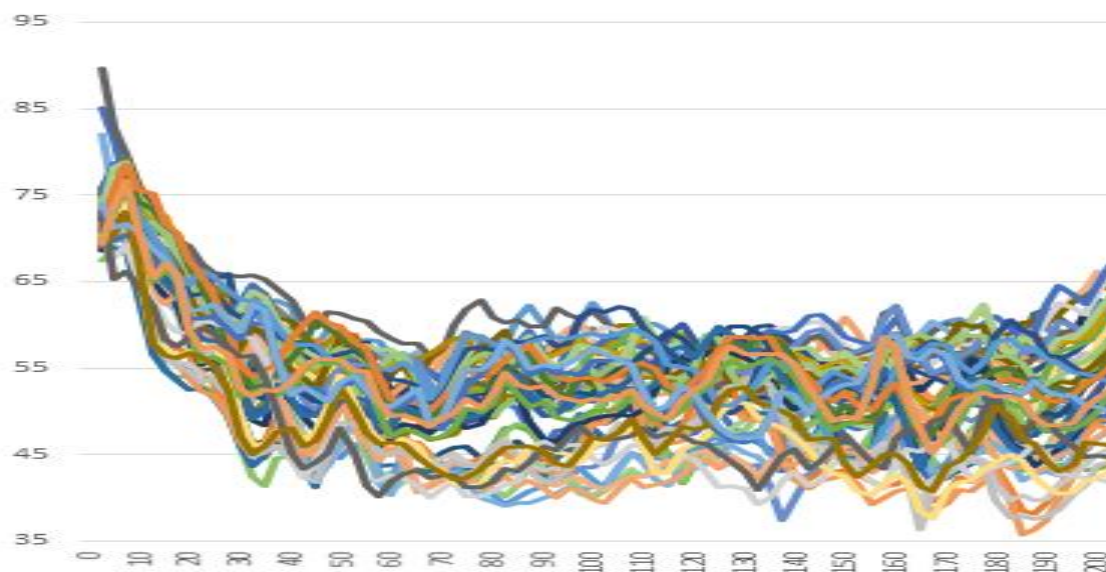
Hyvä asia on se, että kaikissa mittauksissa löytyy samanmuotoiset käyrät, ja kaikissa on sama 7,5 Hz:n piikki.

Tehtiin lisämittaus jossa otettiin tulokset 1 Hz:n tarkkuudella. Ensimmäisestä lisämittauksista huomataan, että tuo piikki on 7 Hz:n kohdalla.

Vieläkin voisi tehdä tarkemman mittauksen, esim. 0.1 Hz:n tai jopa 0.01 Hz:n tarkkuudella. Tällainen, toinenkin, lisämittaus lopulta vielä tehtiin.

Lopuksi tehtiin myös siis alkuperäiset mittaukset uudelleen, tarkemmalla resoluutiolla. Näin selkeytettiin tuloksia.

Varmuudella ei voida sanoa, vaikuttavatko x- ja y- suuntaiset värähtelyt keskenään toisiinsa koherenssin takia. Tarkemmilla kuvaajilla voitaisiin ehkä varmistaa asia, alkuperäisistä tuloksista voidaan vain epävarmuudella olettaa näin olevan. Kuvaa 7 voidaan tästä syystä tulkita vain suuntaa antavasti.



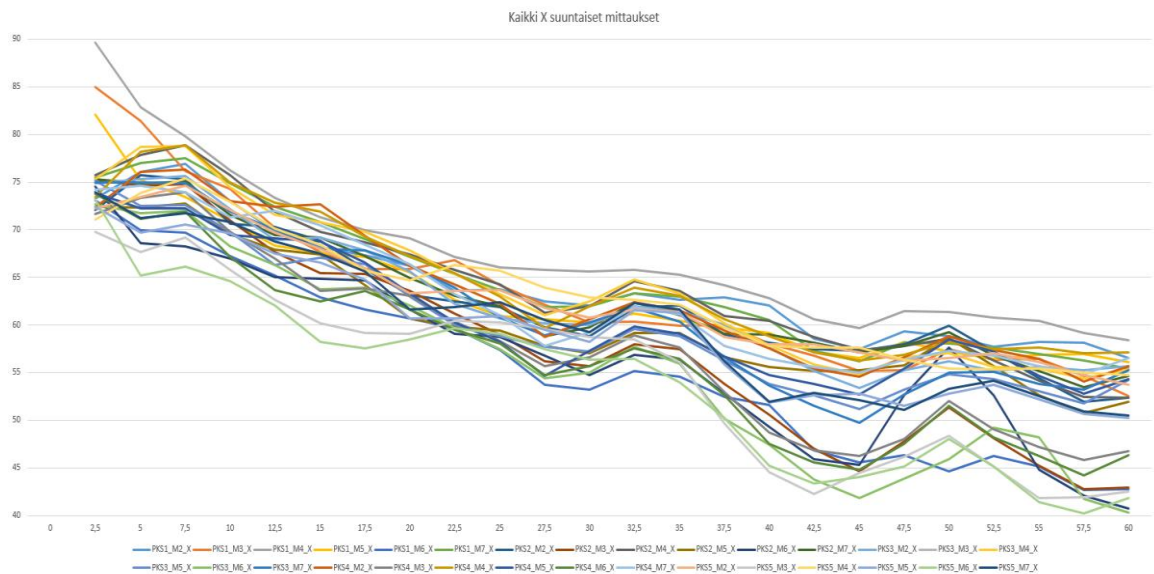
Kuva 7. Kuvassa nähdään kaikki x- ja y- akselien kuvaajat 0 - 200 Hz:n taajuusalueella, alkuperäisen mittauksen mukaan 2,5 Hz:n resoluutiolla.

Kuvassa näkyvät kaikki x- ja y- suuntaiset käyrät. Siitä nähdään, kuinka kaikkien käyrien tehomaksimi on tuossa alle 10 Hz:n kohdassa.

Mittaustulokset näkyvät 2,5 ja 1000 Hz:n välillä, ja kriittinen alue on 0 - 20 Hz, 50 Hz piikit tulevat sähköverkosta. Näin tuo 1000 Hz:n taajuusmaksimi on liikaa, sen olisi hyvin voinut pudottaa vaikka 100 Hz:iin. Tämä voitaisiin toteuttaa esimerkiksi säädettävällä AA-suodattimella. Käytetyllä ohjelmalla Zoom FFT:tä ei pystytty ottamaan pienemmällä kaistanleveydellä kuin 0 - 1000 Hz, sillä ohjelma pysähtyi virhetilanteen vuoksi, kun yritti tehdä mittauksia pienemmällä kaistanleveydellä.

Tarkemmassa tarkastelussa nähdään paremmin, että kaikki lavaajat värähtelevät lähes samalla tavalla.

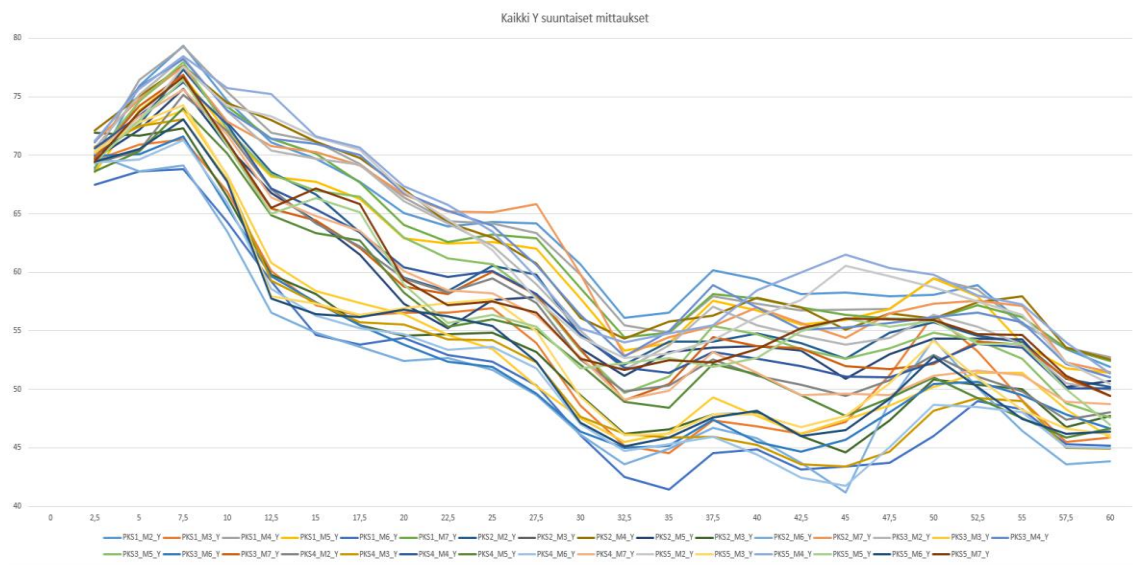
X-suuntaisten käyrien kuvassa (kuva 8) nähdään PKS1:llä mittaukset 3, 4 ja 5, joiden alkukäyrät eroavat muista, miksi? Vaikuttavatko alakerrassa olevat ristituennat juuri näihin? Voiko olla, että mittauksissa on tehty jotain väärin? Voiko syy näihin eroavaisuuksiin olla se, että PKS1 on reunimmainen lavaaja? Keskemmällä olevat lavaajat kuitenkin tukeutuvat paremmin naapureihinsa.



Kuva 8. Kaikki x-suuntaiset mittaustulokset 0 – 60 Hz.

Toisissa lisämittauksissa saatiin selville, että x-suuntaiset ominaisvärähtelyt ovat matalampi taajuista kuin y-suuntaiset. Tästä johtuu myös se, että x-suuntaiset käyrät lähtevät nousemaan pienemmässä kulmassa alussa.

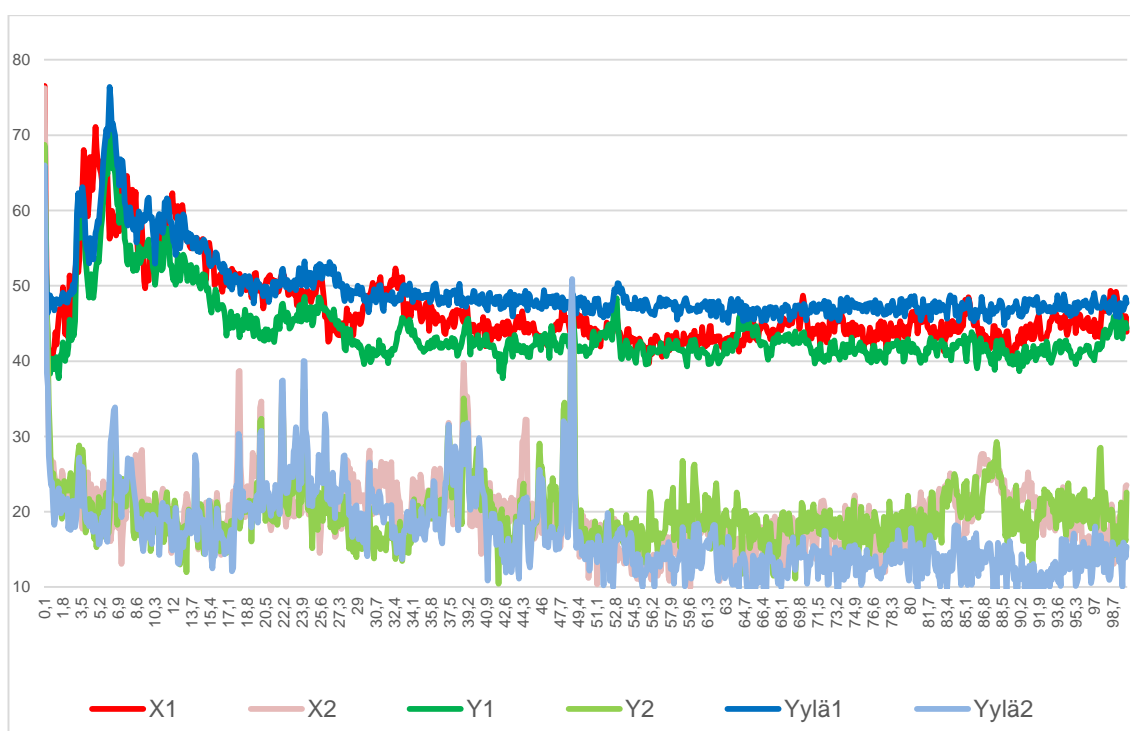
Kuvassa 9 nähdään selkeästi, että kaikilla lavaajilla x- ja y-suuntaisilla mittauksilla käyrät ovat lähes samanmallisia, riippumatta mittaussparametreista. Alimmat käyrät ovat mittauksista, joissa mittaushetkenä ollut lava ei ollut käynnissä. Ylimmät käyrät ovat mittauksista 2 ja 4, joissa siis teho ollut 80 % ja mitattu lavaaja ollut joko yksin käynnissä tai kaikki lavaajat olleet käynnissä. Puolivälin käyrät taas vastaavat mittauksia toteutettuna 60 %:n teholla. Lavaajan tehoilla 80 % ja 60 %, tarkoitetaan lavaajan toiminnan nopeutta. Tätä voidaan säätää portaittain lavaajan käyttöliittymästä. Lavaajan tehon suure siis tarkoittaa käytännössä lavaajan toimintanopeutta, sen maksiminopeudesta.



Kuva 9. Kaikki Y suuntaiset mittaustulokset 0 – 60 Hz.

Tulosten perusteella siis voidaan todeta värinätehon pientä laskua, kun lavausnopeutta lasketaan. Suurempi merkitys on kuitenkin ympäristöllä ja muiden lavaajien yhteisvaikutuksella. Toisin sanoen ongelma on siis värähtelyn siirtymisessä lavaajasta toiseen, jolloin värähtelyteho kertaantuu sitä mukaa, kun enemmän lavaajia on käynnissä.

Kuvan 10 kuvaajassa nähdään PKS2:n toinen lisämittaus, jossa mittausresoluutiona oli 0,1 Hz. Tästä kuvaajasta nähdään, että x- ja y-suuntaiset värähtelyt ovat lähellä toisiaan, mutta kuitenkin eroavat toisistaan. Värähtelyteho on molemmilla suunnilla sama, mutta taajuus on x-akselilla hieman matalampi. Tässä kuvassa sinisenä Yylä-akselina merkitty värähtely on myös y-suuntaista värähtelyä, jossa toinen y-suuntainen anturi on sijoitettu ylemmäs samaan palkkiin kuin toinen y-suuntainen anturi. X-suuntaiset värähtelymaksimit ovat 3,7 Hz:n ja 4,8 Hz:n taajuuksilla, kun taas y-suuntaiset maksimit ovat 3,6 Hz:n ja 6,1 Hz:n taajuuksilla.



Kuva 10. Lisämittauksen kuvaajaa, mittausresoluutio 0,1 Hz. Tummemmat viivat kertovat tulokset, kun vain PKS2 lavaa. Vaaleat viivat kertovat tulokset, kun mikään lavaaja ei ole käytössä.

7.2 Tulosten tarkastelua

Tässä kappaleessa läpikäydään yleisesti tuloksia tutkiessa huomattuja asioita, yhteneväisyyksiä ja eroavaisuuksia. Eri lavaajien omat mittaukset puidaan tämän jälkeen.

Kävelytaso ei tulosten perusteella siirrä värähtelyä kokonaan, vaan imee sitä hieman itseensä. Kaikissa lavaajissa huomattiin sama ilmiö, suurin värinätehonlasku nähtiin, kun mittauskohteena ollut lavaaja sammutettiin. Käyrän muoto kuitenkin pysyy samana tässä tilanteessa, joten värähtelyn muoto on sama kuin mittauksissa, joissa mitattu lavaaja on käynnissä. Yleisesti tasolla värähtelytehot vaihtelevat suuresti, minkään lavaajan z-suuntaiset, eli pystysuuntaiset, mittaukset eivät olleet keskenään samanmuotoisia muiden lavaajien kanssa. Toisaalta anturikin oli joka lavaajalla eri kohdassa pystysuuntaista värähtelyä mitattaessa, sillä tasosta joutui aina etsimään kohdan, johon anturin sai kiinnitettyä.

Kaikissa mittauksissa nähdään, että x-suuntainen värähtely on voimakkaampaa ja selkeämpää. Tähän saattaa vaikuttaa se, että lavaajat ovat y-suunnassa rivissä ja näin päin siis hieman enemmän tukevat toisiaan. Samalla ne myös resonoivat helpommin tässä suunnassa. Herätteet tulevat x-, ja y-suunnassa aina robotin liikkeen mukaan, riippuen siitä mihin suuntaan robotti liikkuu.

Myös värähtelyiden hallinta on helpompaa y-suunnassa, sillä viereisiä lavaajia voidaan käyttää apuna. x-suunnassa viereisiä lavaajia on hankalampi saada hyötykäyttöön, ehkä esim. kitkavaimennuksella voitaisiin tässäkin suunnassa hyödyntää viereisiä lavaajia. Tähän asiaan paneudutaan enemmän myöhemmin, kun mietitään parannusmenetelmiä.

Jos mittaukset olisi tehty vielä tarkemmalla resoluutiolla, tulokset todennäköisesti yhtenäistyisivät paremmin. Samalla näkisi paremmin, missä on lavaajien selkeät ominaistajuudet. Korkeilla taajuuksilla todennäköisesti sorterilta tulee värähtelyä, joka sekin on kytköksissä koko rakenteeseen.

Pakkovoimien taajuus tulee suoraan siitä, kuinka nopeasti robotit liikkuvat, ja nämä liikenopeudet eivät ikinä ole lähelläkään rakenteiden ominaistajuutta. Tämä on hyvä asia huomata, sillä suurempia ongelmia syntyisi, jos rakenteet saavat koko ajan ominaistajuutta vastaavia herätteitä. Onneksi näin ei tässä tapauksessa ole. Rakenteet jäävät näiden herätteiden avustamana värähtelemään ominaistajuudellaan.

Helpointa on lähteä tulkitsemaan kuvaajia, joissa mittauskohteena oleva lavaaja on pois päältä. Tämä sen takia, että silloin lavaaja ei itsessään aiheuta mitään herätteitä, vaan tuloksissa näkyvät ainoastaan värähtelyt jotka johtuvat muiden lavaajien aiheuttamista herätteistä.

Lavaajan itsensä aiheuttamia herätteitä on helpointa lähteä hallitsemaan ohjelmamuutoksilla ja huoltotoimilla. Kun lavaaja pidetään kunnossa ja väljyyttä ei hihnoissa tai muualla esiinny, niin näistä aiheutuvat turhat herätteet pysyvät poissa tai ainakin mahdollisimman alhaisina. Muiden lavaajien aiheuttamia herätteitä taas pystytään vähentämään mekaanisin keinoin, laittamalla jonkinnäköisiä vaimentimia lavaajien välille.

7.3 Yksittäisten lavaajien analysointi

Tässä kappaleessa analysoidaan lavaajia yksitellen, eikä oteta kantaa eroavaisuuksiin eri lavaajien välillä. Tässä tarkastellaan piirteitä, jotka ovat selkeitä kyseisellä lavaajalla, pääasiassa samat piirteet löytyvät kuitenkin kaikilla lavaajilla. Näitä yleisiä tapahtumia tarkastellaan myös omassa kappaleessaan.

Eri tehoilla tehdyissä samoissa mittauksissa, ei löydy suuria eroavaisuuksia matalilla taajuuksilla. Korkeilla taajuuksilla ei ole niinkään merkitystä tässä tutkimuksessa, muutenkin oletettavaa on, että myös korkeiden taajuuksien teho laskee.

Liitteet 4 - 8 sisältävät alkuperäiset mittaustulokset, joissa on siis tulokset välillä 0 - 1000 Hz ja mittausresoluutio 2,5 Hz. Seuraavat analyysit on tehty alkuperäisten, epätarkkojen mittausten perusteella.

Seuraavissa kappaleissa puhutaan paljon z-suuntaisista, eli pystysuuntaisista, tapahtumista, mutta tason värähtelyä ei oleellisesti ole analysoitu. Kaikki tason mittaukset tehtiin eri paikoista, sillä anturia ei saatu kiinnitettyä joka lavaajalla samaan paikkaan. Lisäksi tasolla kävellään koko ajan ja se vaikuttaa oleellisesti mittaustuloksiin, joten yhtenäisten tulosten saaminen osoittautui mahdottomaksi.

7.3.1 PKS1

Ensimmäisellä lavaajalla tuloksiin saattaa vaikuttaa hieman se, että se on reunimmainen lavaaja ja näin ollen ei saa tukea y-suunnassakaan kuin toiselta puolelta. z-suunnassa nähdään 10Hz:n ja 60Hz:n kohdalla selkeä piikki. x-suuntainen värähtely on selkeästi voimakasta ja tehomaksimi näkyy käytännössä 2,5 Hz:ssä. (Liite 4.)

7.3.2 PKS2

Myös PKS2:lla löytyy 7,5 Hz:n piikki, lisäksi z-suunnassa näkyy selkeä piikki 30 Hz:n ja 70 Hz:n kohdalla, (liite 5).

7.3.3 PKS3

Lavaajalla erot mittaustilanteiden välillä ovat selkeämpiä, tai oikeastaan samat mittaukset ovat selkeämmin yhtenäiset. Tarkoitetaan, että sama mittaus eri tehoilla antaa lähes täysin samanmuotoisen käyrän vain tehon erolla. Tämän voi tulkinta niin, että tämä lavaaja on ”parempi” kuin muut lavaajat ja tällä lavaajalla ei esiinny niin paljon väljyyttä. (Liite 6.)

7.3.4 PKS4

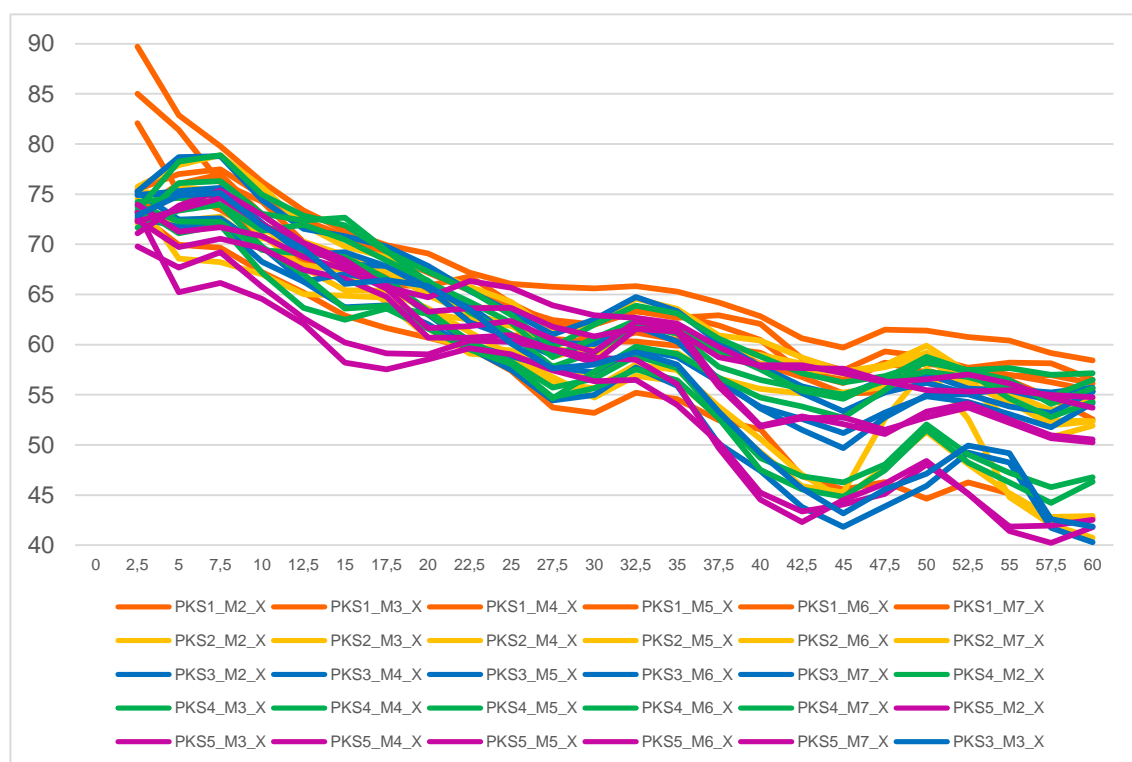
Tällä lavaajalla z-suunnassa näkyy piikkejä aina noin 20 Hz:n välein alkaen vaimeana piikkinä 17 Hz:n kohdalla, ja 37 Hz:n kohdalla piikki on jo voimakas ja teho pysyy korkeana, (liite 7).

7.3.5 PKS5

PKS5:lla tuli mittavirhettä z-suunnassa, sillä anturi oli paikassa, jossa koko ajan käveltiin edestakaisin. Lisäksi portaikko on aivan vieressä, joten jo pelkästään portaissa kävely aiheutti ylimääräistä värähtelyä tasolle tässä kohtaa. Tälläkään lavaajalla ei esiinny suuria tehoeroja x-, ja y-akseleilla. (Liite 8)

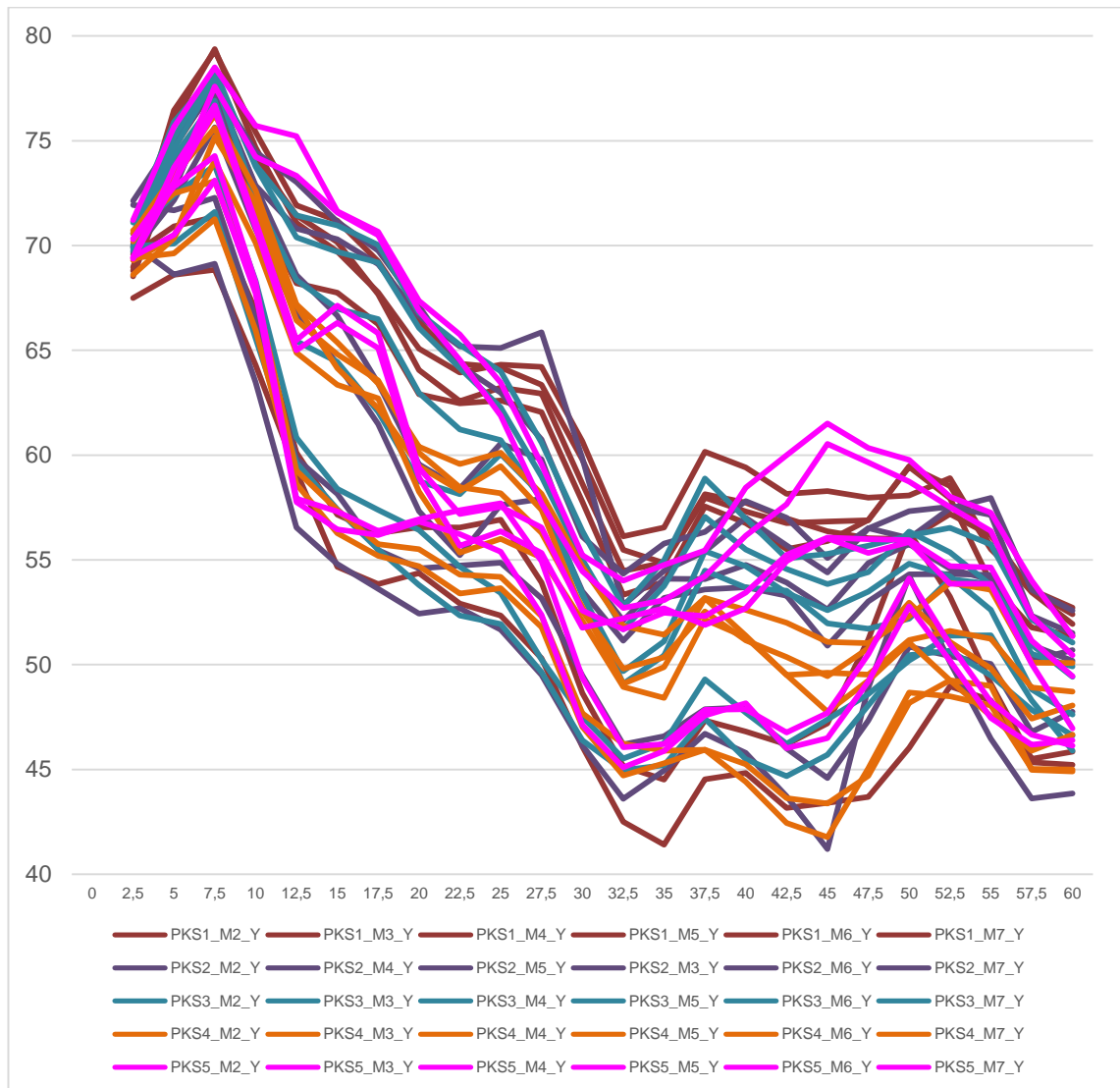
7.4 Alkuperäiset mittaustulokset visuaalisena

Kuvan 11 kuvaajassa nähdään kaikki alkuperäiset x-suuntaiset mittaustulokset. Kaikki samat mittaukset eri lavaajilla ovat hyvin lähellä toisiaan. Suurimmat erot muodostuvat eri mittausten välillä. Otetaan esimerkiksi purppuran väriset käyrät, eli PKS5, kaksi ylintä käyrää ovat mittauksia, joissa kaikki lavaajat ovat olleet käynnissä. Sillä ei siis ole suurta merkitystä millä teholla lavaajaa ajetaan, 20 % nopeuden lasku ei vaikuta suuresti tuloksiin.



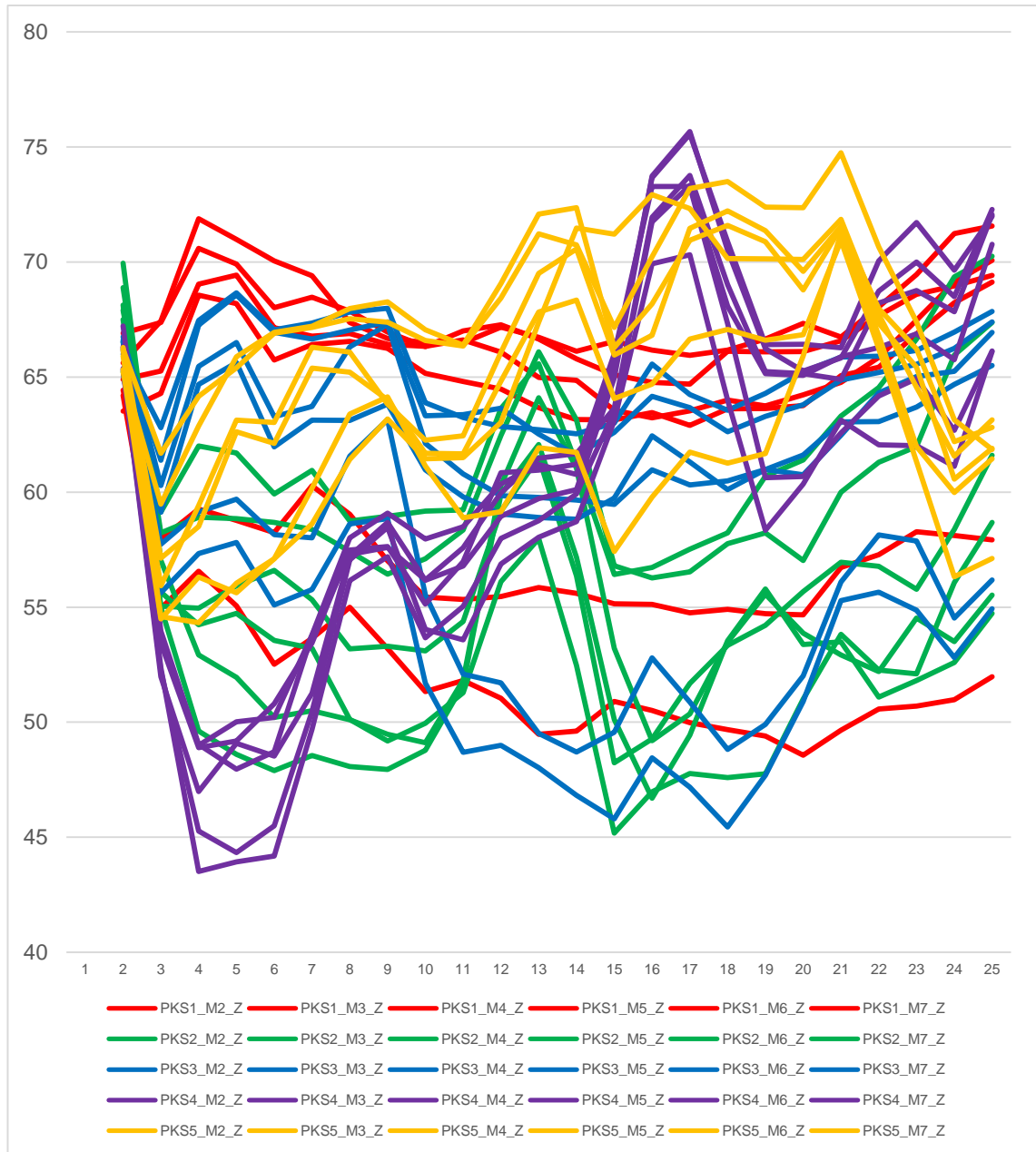
Kuva 11. Kaikki x-suuntaiset alkuperäiset mittaukset

Kuvan 12 kuvaajassa nähdään kaikki y-suuntaiset mittaustulokset. Samalla tavalla kuin x-suunnassakin, myös tässä suunnassa nähdään isoimmat erot mittaustilanteiden välillä. Näistä tuloksista voidaan jo päätellä, että ympäristö vaikuttaa värähtelyihin enemmän kuin lavaajan omat herätteet.



Kuva 12. Kaikki y-suuntaiset alkuperäiset mittaukset

Kuvan 13 kuvaajassa on kaikkien lavaajien z-suuntaiset tulokset, eli tason pystysuuntainen värähtely. Tulokset eivät ole kovinkaan vertailukelpoisia keskenään, mutta tämä johtuu suurelta osin siitä, että anturia ei pystynyt sijoittamaan aina samaan paikkaan joka lavaajalla. Lisäksi tasolla kävellään koko ajan ympäriinsä, jolloin sen mittaaminen ei ole tarkkaa.



Kuva 13. Kaikki z-suuntaiset alkuperäiset mittaukset

7.5 Ensimmäiset lisämittaukset

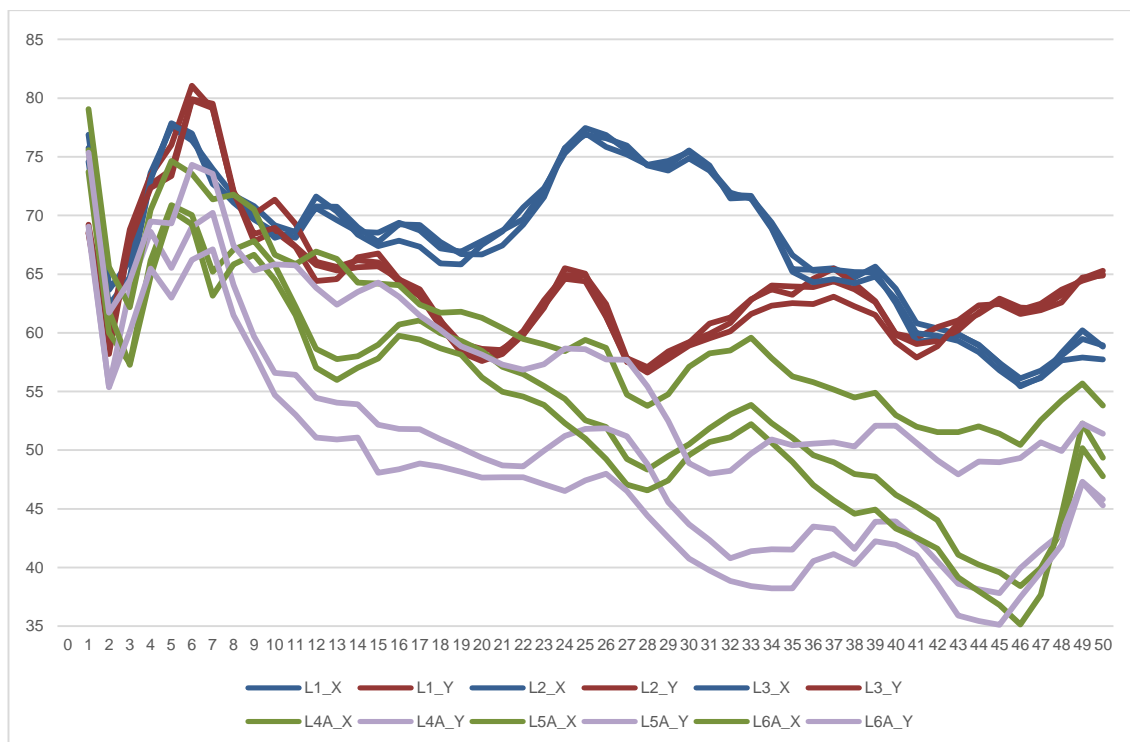
Varsinaisten mittausten jälkeen tehtiin vielä lisämittauksia, ja kuten jo aikaisemmin on todettu, nämä lisämittaukset tehtiin vain yhdellä lavaajalla. Tämä sen vuoksi, että alkuperäisistä tuloksista voitiin jo todeta, että lavaajat käyttäytyvät kaikki samalla tavalla. Lisämittausten mittauspäiväkirja on liitteenä 9.

Parametrit näillä lisämittauksilla olivat seuraavat:

- Anturit: 0=X, 1=Y ja 2=ottopöydän y-suunta, x ja y ovat kuitenkin mitattuna yläpalkkien puolivälistä mittauksissa L1-L3. Alkuperäisissä paikoissa, nurkapalkkien puolivälissä, mittauksissa L4-L6.
- Kaikki lisämittaukset suoritettiin niin, että kaikki lavaajat lavasivat samaan aikaan 80 %:n teholla. Tämä siksi, että näin saadaan kokonaisvaltaisin värähtely aikaiseksi.

Näissä lisämittauksissa tihennettiin mittausresoluutio 1 Hz:iin, joten tulokset ovat hieman tarkempia kuin alkuperäisissä mittauksissa.

Näissä lisämittauksissa huomataan, että mittaustulokset ovat yhtenäisemmät, kun mitaustulokset on otettu lavaajan poikkipalkista (ks. kuvia 14). Tämä sen takia, että heräte tulee näihin palkkeihin suoraan roboteista. Toisaalta poikkipalkin värinä ei suoraan vaikuta tason värinään, vaan se kulkee pystypalkkien kautta, joten pystypalkkien värähtely on tässä tapauksessa tärkeämpää.

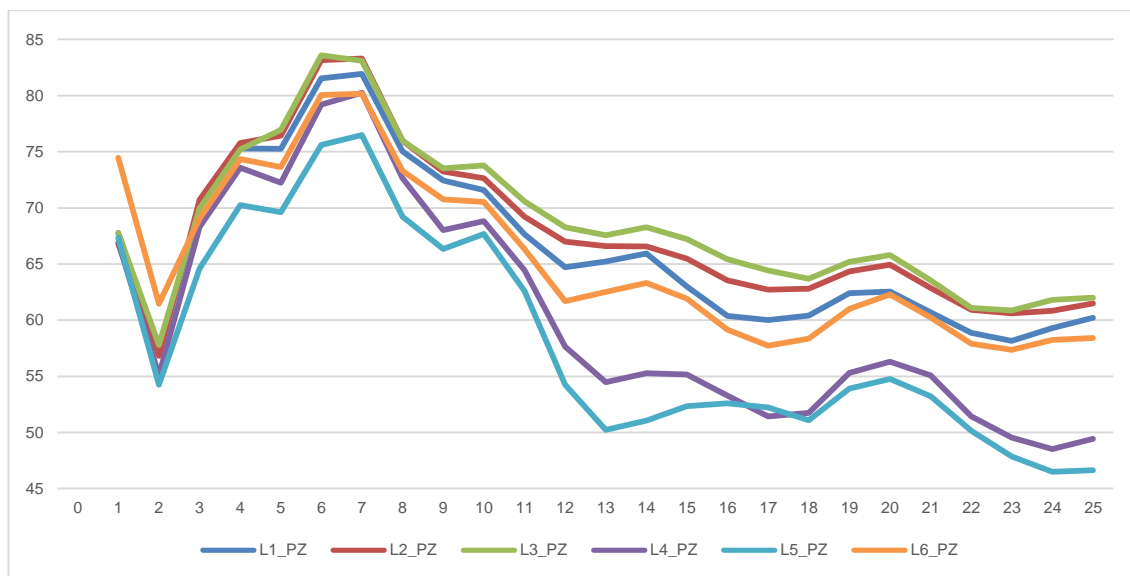


Kuva 14. Tässä kaaviossa on ensimmäisen lisämittauksen x-, ja y-mittaustulokset taulukoituna 1 Hz:n tarkkuudella.

Tietysti mittauksia kannattaisi tehdä vielä pystypalkin yläreunasta ja selvittää, onko siinä tuloksissa eroa. Pystypalkin värinä on saman taajuista koko palkissa, mutta värinätehoon voimakkaampaa ylempänä. Heräte tulee palkin yläreunaan, ja palkki itsessään vaimentaa värähtelyä, joten alempana palkissa myös värähtely on vaimeampaa.

Näissä tuloksissa saadaan tarkennettua y-suuntaisen värähtelyn tehomaksimi 6 Hz:n taajuudelle, ja x-suuntaisen värähtelyn tehomaksimi 5 Hz:n taajuudelle. Tässä huomataan, etteivät x-, ja y-suuntainen värähtely olekaan keskenään saman taajuisia.

Lisämittauksessa tehtiin mittaus robotin ottopöydälle (kuva 15), sillä sen heiluminen huolestuttaa. Paketit eivät saisi olla vinossa, eikä varsinkaan pöytä, kun robotti hakee pakkettin. Ottopöydän heiluminen johtuu todennäköisesti täysin lattiatason heilumisesta, sillä lattiatasoonhan pöytäkin on kiinnitetty. Näin ollen tähänkin värähtelyyn saataisiin helpotusta, kun koko lavaajan värähtelyä saataisiin vaimennettua.



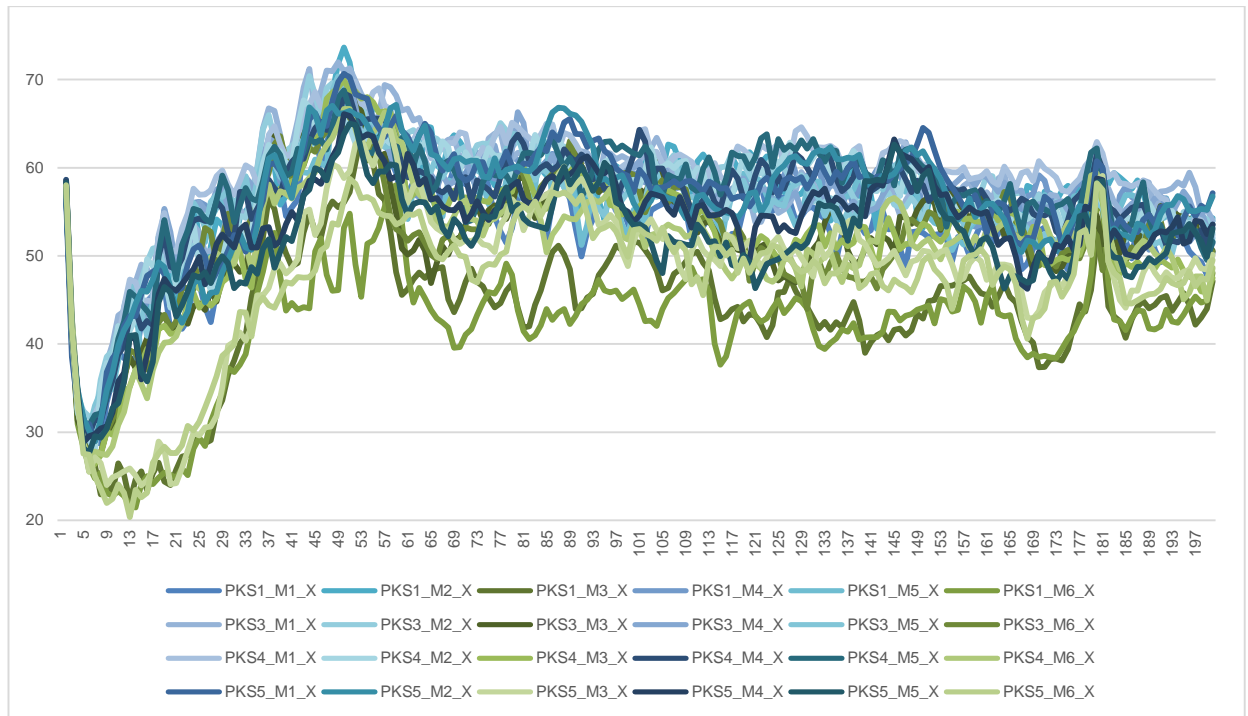
Kuva 15. Tässä kuvaajassa on esitettyä 1 robotin ottopöydän poikkisuuntainen, eli y-suuntainen, värähtely.

7.6 Viimeiset lisämittaukset ja lopulliset tulokset

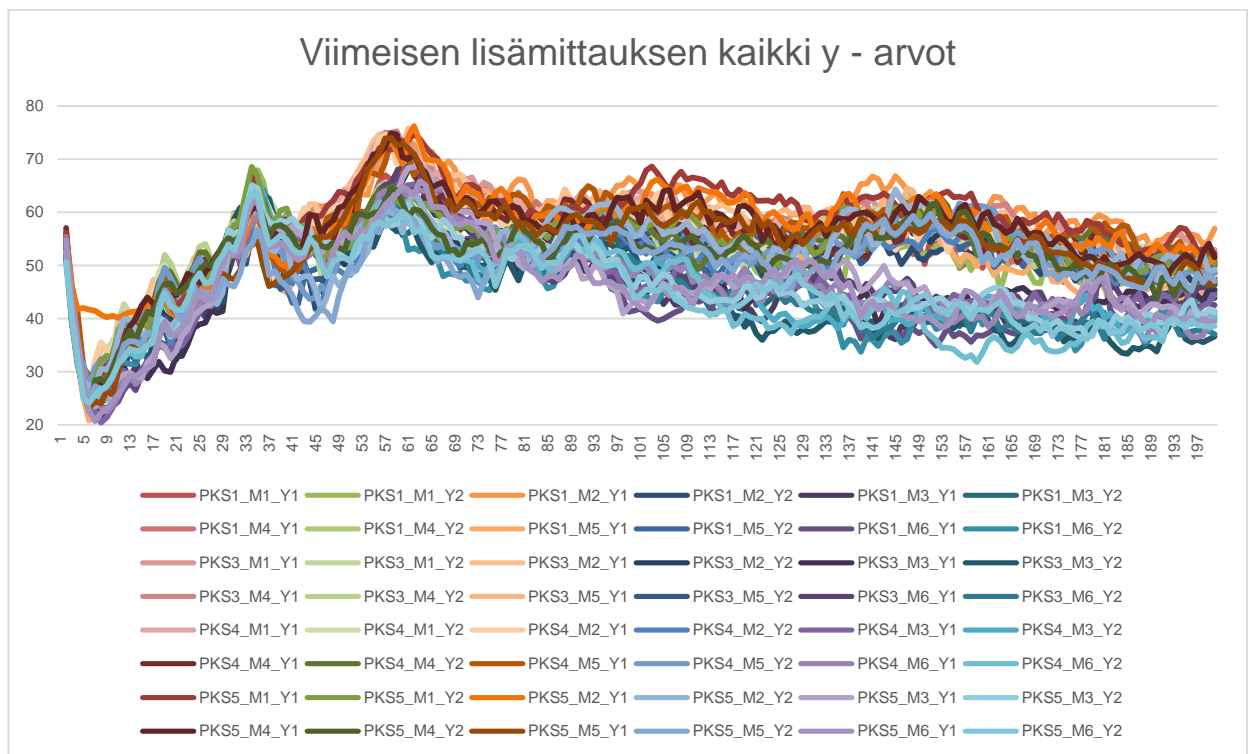
Lisämittauksia tehtiin, jotta saataisiin vielä tarkennettua alkuperäisiä tuloksia, sillä alkuperäiset mittaukset olivat hieman epätarkkoja. Niitä ei kannata kokonaan jättää huomioimatta. Ne kuitenkin toimivat tilastollisena hyötynä ja nyt voidaan nähdä, ettei ensimmäisissä ja viimeisissä mittauksissa ole muuta eri tavalla huomioitavaa, kuin mittaustarkkuus.

Alkuperäisillä mittauksilla pystyttiin jo toteamaan, että kaikki lavaajat värähtelevät samalla tavalla keskenään. Samoin alkuperäisissä mittauksissa löydettiin lavaajien keskinäinen vaikutus, joka pystytään myös vahvistamaan näillä uusilla mittauksilla.

Voimakkaimmat värähtelyt, eli ominaistajuuudet lavaajilla, ovat y-suunnassa 3,4 - 3,6 Hz ja 5,6 - 6,3 Hz. X-suunnassa 3,7 - 4,2 Hz ja 5,0 - 5,4 Hz. Tulokset nähdään vielä kuvajina (kuva 16 ja 17). Kävelytasanteen pystysuuntainen värähtely, eli z-suuntainen värähtely, jää analysoimatta sen mittausten epäluotettavuuden takia.



Kuva 16. Tässä kuvaajassa on kaikki uudet x-suuntaiset mittaustulokset 0,1 Hz:n tarkkuudella.



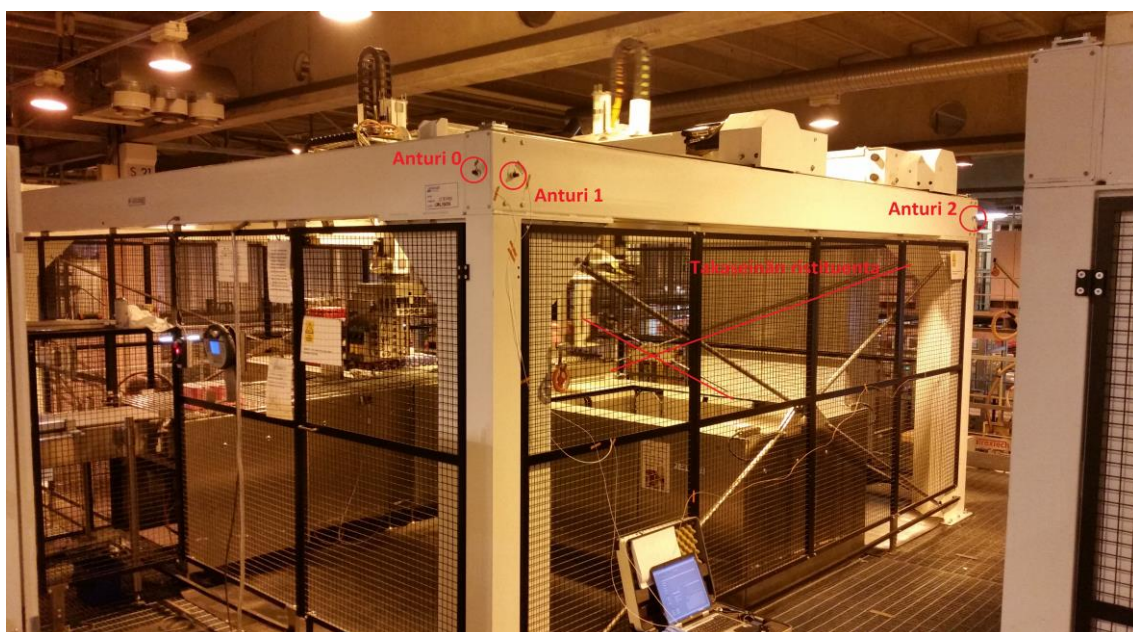
Kuva 17. Tässä kuvaajassa on kaikki uudet x-suuntaiset mittaustulokset 0,1 Hz:n tarkkuudella.

Lavaajien päädyissä y-suuntainen värähtely on erimuotoista. Taaempana, eli robotti 1:n päädyssä värähtely on erimuotoista kuin robotti 2:n päädyssä. Värähtelyllä on siis ainakin kaksi ominaismuotoa. Värähtelyn ominaismuodolla tarkoitetaan, että kun rakenne värähtelee samaan aikaan erimuotoisesti, tällöin rakenteella on myös monta ominaistaajuutta.

FFT-kuvaajien perusteella y-suunnassa näyttäisi esiintyvän kaksi lähekkäistä ominaistaajuutta. Ensimmäisellä ominaistaajuudella sekä takareunan että etureunan mittauspisteen värähtelyamplitudit ovat yhtä suuret. Toisen ominaistaajuuden kohdalla takareunan mittauspisteen värähtely on pienempää kuin etureunan. Tähän syynä on todennäköisesti lavaajan takareunassa oleva ristituenta, joka lisää rakenteen jäykkyyttä takaseinällä. (ks. kuva 18). Perusteellinen värähtelytutkimus antaisi tarkemman kuvan näitä ominaistaajuuksia vastaavista rakenteen ominaismuodoista.

Mittausten aikana PKS2, eli lavaaja 2, oli huollossa, joten sitä ei päästy mittaamaan eikä se ollut käynnissä missään mittauksessa. Tästä syystä PKS1:stä mitattaessa, mittaukset 3 ja 6 antoivat tulokset, joissa värähtelyteho on huomattavasti pienempää kuin muissa mittauksissa. Tämä johtuu siis siitä, että viereinen lavaaja ei ollut toiminnassa.

Näiden mittauksen pöytäkirja ja mittauspäiväkirja löytyvät liitteenä 10. Lisäksi kaikki tulokset löytyvät lavaajakohtaisina käyriä liitteinä 11–14.



Kuva 18. Viimeisen mittauksen anturinpaikat sekä takaseinän ristituenta.

8 Jatkokehitys

Tässä kappaleessa keskitytään siihen, mitä hyötyjä tehdyillä mittauksilla ja tuloksilla voidaan saavuttaa.

Kun mittaukset on suoritettu ja analyysit tehty, niin pystytään jatkamaan kohti värähtelyn vaimennuksen toimenpiteitä. Hieman asiaa on jo sivuttu aikaisemminkin tässä raportissa, mutta nyt olisi tarkoitus paneutua asiaan hieman paremmin. Tarkoituksena on löytää toimivia ratkaisuvaihtoehtoja juuri näille lavaajille.

Lavaajien ominaistuuksia ja -muotoja voitaisiin lähteä vaimentamaan lavaajarivistön suuntaisesti, eli y-suuntaisesti. Värähtelyn vaimentaminen on tässä suunnassa mahdollista yksinkertaisella jousi-vaimenninsysteemillä, sillä viereisiä lavaajia voidaan käyttää hyödyksi. Toiseen suuntaan, eli x-suuntaisen värähtelyn vaimentamiseen saatetaan tarvita monimutkaisempia lisälaitteita, sillä tukea ei saada yhtä helposti kuin toisessa suunnassa. Yksi mahdollinen vaihtoehto voisi olla kitkavaimennus, jolloin pystyttäisiin vaimentamaan samanaikaisesti molempien suuntien värähtelyä.

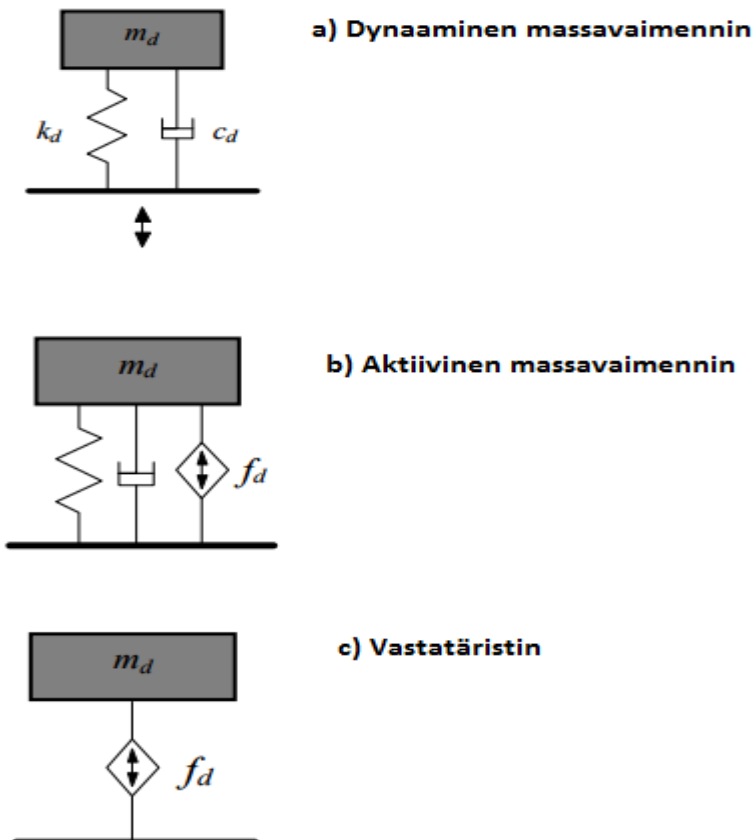
Tällainen jousi-vaimenninsysteemi oikein viritettynä vaimentaisi tehokkaasti halutut taajuudet. Tietenkin tarkoituksena on vaimentaa voimakkaimmat taajuudet, eli ominaistajuudet, jotka y-suunnassa ovat 3,6 ja 6,0 Hz. Yksinkertaisin ratkaisu olisi passiivinen systeemi, mutta sen taajuusalue on rajallinen ja se vaatii tarkan optimoinnin. Parempi samantapainen ratkaisu olisi puoliaktiivinen systeemi, esim. magnetoreologinen iskuvaimennin. Tällaisen iskuvaimentimen jäykkyyttä voidaan aktiivisesti muuttaa sähkömagneettisesti, tällöin saataisiin yksinkertaisesti vaimennettua kaksi ominaistajuutta.

Tällaisella lavaajien ”yhteen sitomisella” saattaa kuitenkin olla myös negatiivisia vaikutuksia, jos lavaajat joutuvat resonanssiin. Tällöin jousivaimentimesta ei ole hyötyä, sillä lavaajat alkavat värähdellä samalla taajuudella ja nopeudella samaan aikaan. Tällainen jousivaimennin saattaa jopa edesauttaa resonanssin syntymistä, joten yksittäiset massavaimentimet saattaisivat olla paras ratkaisu (ks. kuva 19).

X-suuntaista värähtelyä voisi olla helpointa lähteä hallitsemaan passiivisella massavaimentimella. Tällöin lavaajaan kiinnitetään oikealle taajuudelle, x-suunnassa 5,2 ja 3,8 Hz, viritettyjä passiivisia massavaimentimia (kuva 19 a, kuva 20). Näissäkin ongelmana

on rajallinen taajuusvaste. Tällainen ratkaisu täytyy virittää juuri oikealle taajuudelle. Toinen vaihtoehto voisi olla jonkinnäköinen kitkavaimennus, jolloin viereistä lavaajaa voisi pystyä hyödyntämään. Aktiivinen vaimennus voisi olla hyvä, ainakin varmin, vaihtoehto saada toimiva vaimennus aikaan. Tällainen aktiivinen vaimennus toimisi niin, että lavaajalle tuotaisiin apumassa, jota liikuteltaisiin oikeanlaisen vastavärähtelyn luomiseksi (kuva 19 b ja c).

Aktiivisen vaimennuksen parhaita puolia on sen varmuus. Se ei ole niin riippuvainen laitteen ominaisuuksien muuttumattomuudesta, sillä tällainen systeemi automaattisesti sopeutuu värähtelyjen muutoksiin. Tällaisia muutoksia ovat mm. ruuvien löystyminen ja kulumien osien kuluminen. Toisaalta aktiivisen vaimennuksen rakentaminen vaatii suurempaa osaamista ja isompaa taloudellista investointia.



Kuva 19. Apumassallisten vaimentimien kuvia [11].



Kuva 20. Passiivisia massavaimentimia asennettuna, ehkäisemään parvekkeen lattian värähtelyä [13].

Oli vaimennuskeino mikä tahansa, jotta voidaan lähteä vaimentamaan tiedettyjä taajuuksia, ei pelkkä värähtelyn taajuus ja värähtelytehon tietäminen riitä. Oikeanlaisen vaimennuksen laskemiseksi tarvitaan muitakin suureita. Tehollisen massan avulla, vaimennuskohdassa, voidaan värähtelytaajuuden kanssa laskea tarvittava vaimennuskerroin.

9 Yhteenveto

Tämän työn tarkoituksena oli tehdä lavaajille värähtelymittaukset ja löytää voimakkaimmat värähtelyt lavaajien rakenteissa. Tätä asiaa lähdettiin tutkimaan sen takia, että lavaajat heiluvat ja aiheuttavat työntekijöille epämiellyttävyyden tunnetta ja ylimääräisiä häiriöitä lavaajilla.

Lavaajilta löydettiin ominaistajuudet välillä:

- $X = 3,7 - 4,2 \text{ Hz}$ ja $5,0 - 5,4 \text{ Hz}$
- $Y = 3,4 - 3,6 \text{ Hz}$ ja $5,6 - 6,3 \text{ Hz}$

Lattiatason värähtely tässä työssä jää tulkitsematta, mutta sitä ei kehoteta tulevaisuudessaan tarkastelemaan erikseen. Sen värähtelyt ovat kuitenkin todellisia ja työntekijöitä häiritsevää, joten operaattorien työpistettä voisi harkita vaimennettavaksi. Pöytää voisi vaimentaa asentamalla vaimentavat tassut pöytään ja erottamalla pöytä takana olevasta lavaajasta. Työpisteen siirtämistä eri tasolle lavaajien kanssa voisi myös harkita. Silloin täytyy kuitenkin huomioida sekin, ettei työpiste ole liian hankalassa paikassa. Operaattoreiden täytyy kuitenkin pystyä myös silmämääräisesti valvomaan laitteita, sillä aina ei voi luottaa pelkästään tietokoneiden näytölle ilmestyviin vikailmoituksiin. Lavaajien värähtelyjen vaimentaminen todennäköisesti vähentää myös tason värähtelyjä, ja niin edelleen operaattorien työpisteen värähtelyjä, sekä lavaajilla ottopisteiden värähtelyä.

Tärkein tässä työssä esille tullut asia on värähtelyn leviäminen. Jokainen heräte saa koko lavaajarivistön värähtelemään.

Työssä perehdyttiin pääasiassa värähtelyn teoriaan, mittaustekniikkaan, mittauksiin sekä mittaustulosten analysointiin.

Värähtelyn vaimennus ja sen suunnittelu jää seuraavaan projektiin.

Lähteet

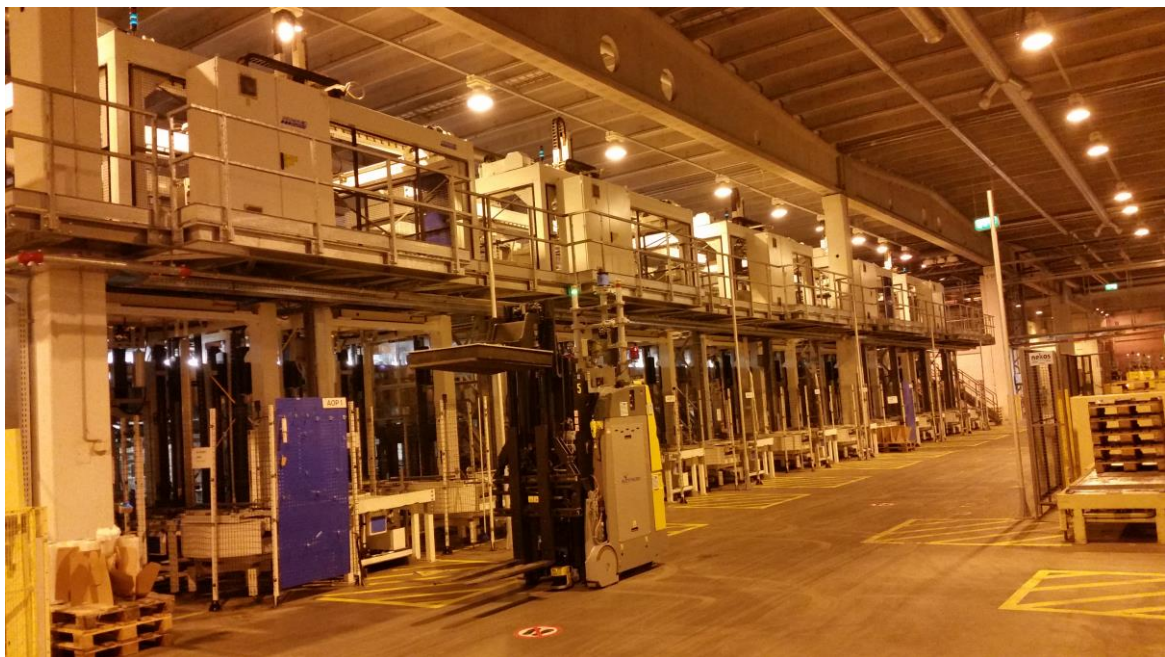
- 1 Suvanto Kari & Laajalehto Kari, Tekniikan fysiikka 2. Helsinki Edita Publishing Oy, 2005.
- 2 Aumala Olli, Mittaustekniikan perusteet. Espoo Otatieto, 1989.
- 3 Wilson, Jon S., Sensor Technology Handbook. Elsevier Science & Technology, 2004.
- 4 Siltarakenteiden värähtelymitoitus, värähtelymitoituksen periaatteet. 2010. Verkkodokumentti. Liikennevirasto <http://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/64349/Kiviluoma_Siltarakenteiden_varahtelymitoitus.pdf/7566cccc-dddc-4344-a56f-4c986d74cf8b> Päivitetty 22.3.2010. Luettu 25.2.2016.
- 5 Hakala Matti, Kullaa Jyrki, Kivento Teppo & Linjamaa Jukka, Mekaanisten värähtelyjen hallinta, kirjallisuustutkimus. Espoo VTT, 1994.
- 6 Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneissa. 2002. Verkkodokumentti. VTT <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2160.pdf>> Päivitetty 30.4.2002. Luettu 25.2.2016.
- 7 Värähtelyfysiikka, luentokalvot. Heikki Pitkänen. Verkkodokumentti <<http://www.mafy.lut.fi/study/HeikkiP/Fysiikka-L-osa-4/luento1.pdf>> Luettu 8.4.2016.
- 8 75 years after infamous Tacoma Narrows Bridge collapse: Not so fast!.2015. Verkkodokumentti. <http://www.txstate.edu/news/news_releases/news_archive/2015/November-2015/TacomaNarrows110315.html>Luettu 8.4.2016.
- 9 Randall R.B., Tech. B., Frequency Analysis, Revision Brüel & Kjaer, 1987
- 10 Mekaaniset aallot. Verkkodokumentti. <https://noppa.oulu.fi/noppa/kurssi/761104p/materiaali/761104P_1_mekaaniset_aallot.pdf><http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1727.pdf>> Luettu 17.4.2016
- 11 Tuloksia käytännön rakenteiden värähtelyn hallinnasta aktiivisella vaimentimella. 1996. Verkkodokumentti.<<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1727.pdf>> Luettu 4.5.2016.
- 12 Inman Daniel J, Engineering vibration, Pearson education, 2008.
- 13 Floor vibration control. Verkkodokumentti. <<http://www.deicon.com/floor-vibration-control/>> Luettu 17.4.2016.

- 14 Osa Carlsberg-konsernia. Verkkodokumentti. <<http://www.sinebrychoff.fi/yhtiö/carlsberg/Pages/OsaCarlsberg-konsernia.aspx>> Luettu 25.2.2016

Kuvat lavaajista



Tässä kuvassa nähdään kaikki lavaajat vierekkäin vastapuolen tasanteelta kuvattuna.



Tässä kuvassa nähdään kaikki lavaajat vierekkäin alhaalta kuvattuna.

Mittaussuunnitelmat

1. Mittaussuunnitelmat:

1. Mittaus lavaajasta kun siihen kopauttaa vasaralla
2. Mittaus lavaajasta, kun vain kyseinen lavaaja käynnissä. 80 %
3. Mittaus lavaajasta, kun kaikki muut käynnissä. 80 %
4. Mittaus lavaajasta, kun kaikki lavaajat käynnissä. 80 %
5. Mittaus lavaajasta, kun vain kyseinen lavaaja 60 %.
6. Mittaus lavaajasta, kun muut käynnissä 60 %.
7. Mittaus lavaajasta, kun kaikki lavaajat 60 %.

Kohta 1, todennäköisesti turha, mutta kannattaa yhdelle lavaajalle tehdä.

2. Lisämittaukset: Lavaajalle 2

1. Lavaajan pöydän mittaus
 - Mitataan pöydän y-suuntainen värähtely, sillä se on merkittävin.
2. Samalla tehdään pidempiä (5 min) mittauksia lavaajan x ja y-suunnista.

Mittauspöytäkirjaesimerkki

Mittauksen tekijä: JKL Työn tunnus: PKSS-MS Lämpötila:	Päivämäärä: 16.3.16 Kellonaika: 16.18
--	--

Mittauspöytäkirja

Käytettävät mittalaitteet

Kistlerin piezokiteisiä kiihtyvyyssantureita, malli:

- 8636c10 PiezoBEAM
 - o Anturien numerointi, kanavat ja sijoituspaikka:
 - Anturi 0, Kanava 1: Y
 - Anturi 1, Kanava 2: X
 - Anturi 2, Kanava 3: Z

Signaalin vahvistin ja mittakortti, National Instrumentsin valmistamat:

- Vahvistin: National Instruments sc-2345
- Mittakortti: National Instruments acc-01

Mitä ollaan mittaamassa, eli mitä sanotaan mittaussuunnitelmassa:

- VAIN PKSS 60%

Mittausparametrit: (näytteistys taajuus, mittausjakso, alipäästösuodattimen rajataajuus, vahvistus xx g/V)

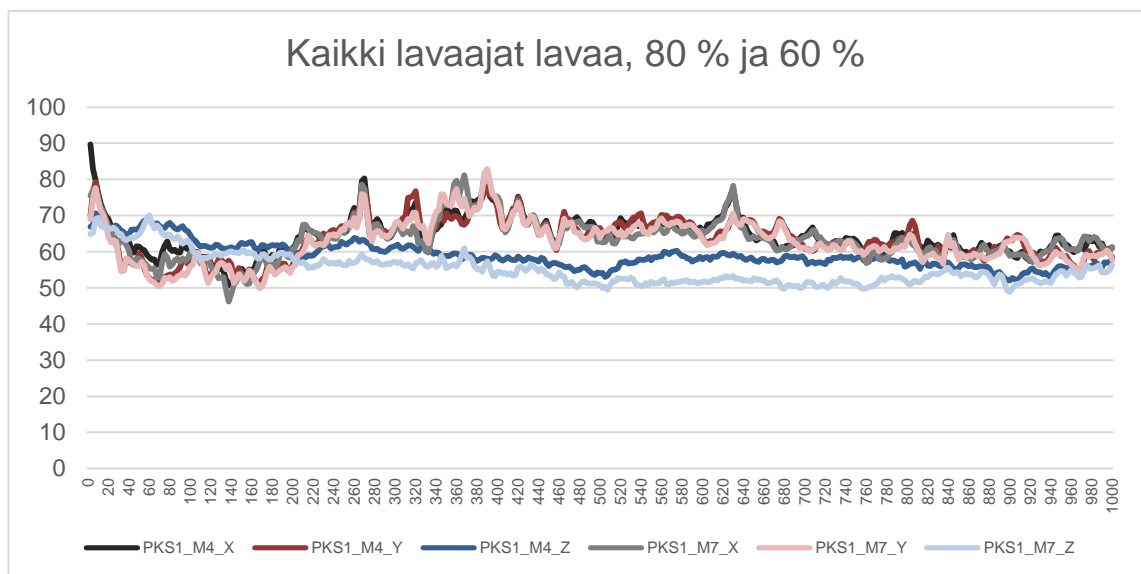
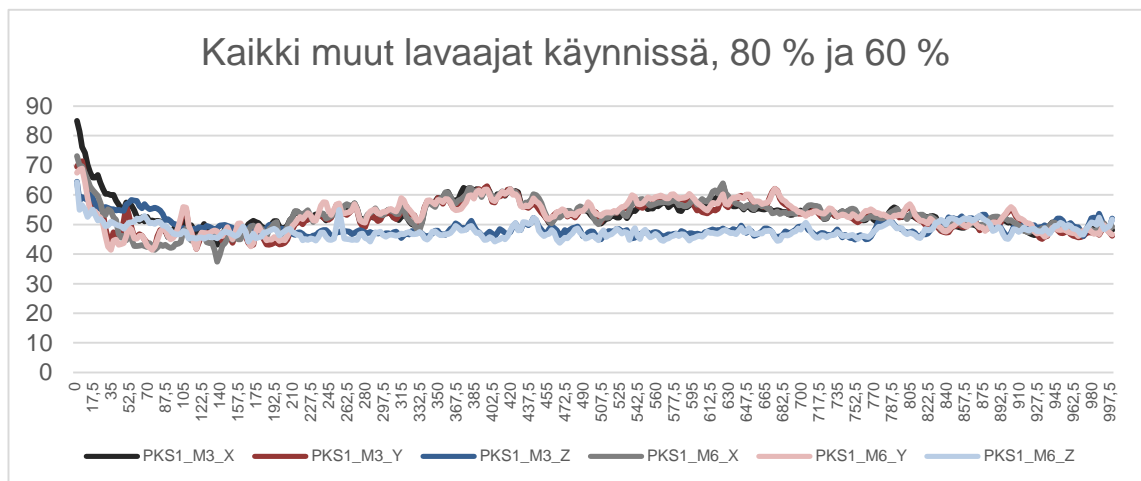
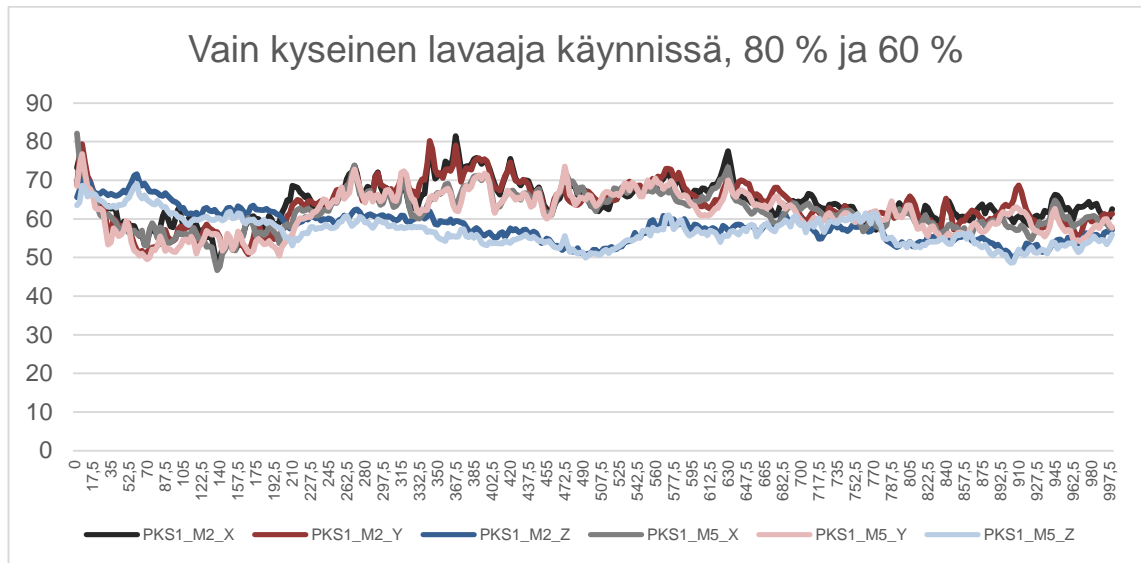
- Nämä tulee kyllä ohjelmasta ulos tiedostona.

Mittaukseen tapahtumat, arvot ja huomiot

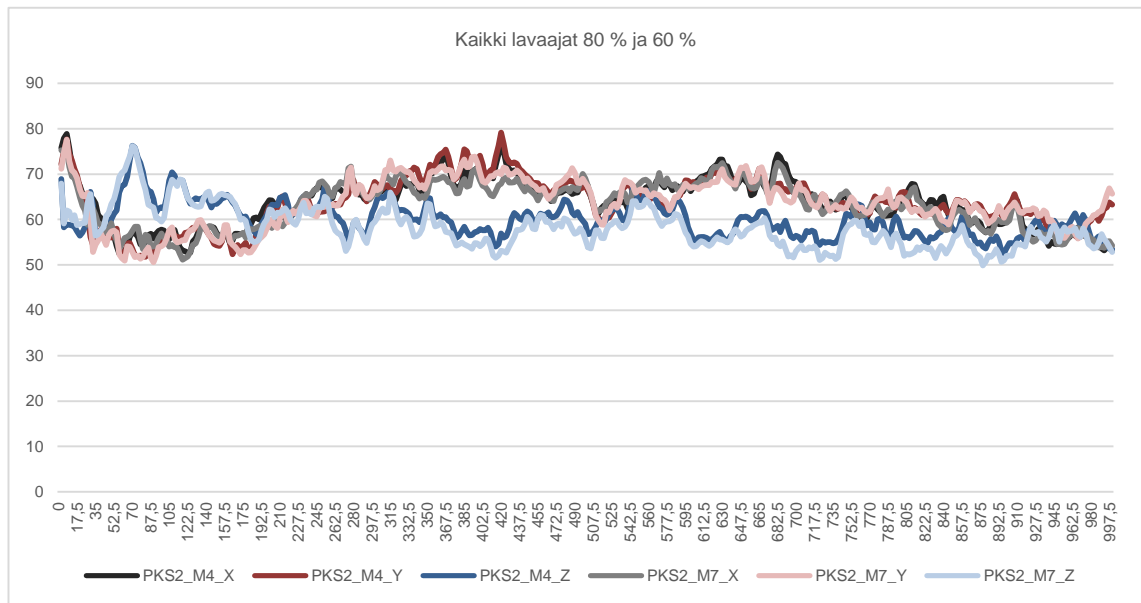
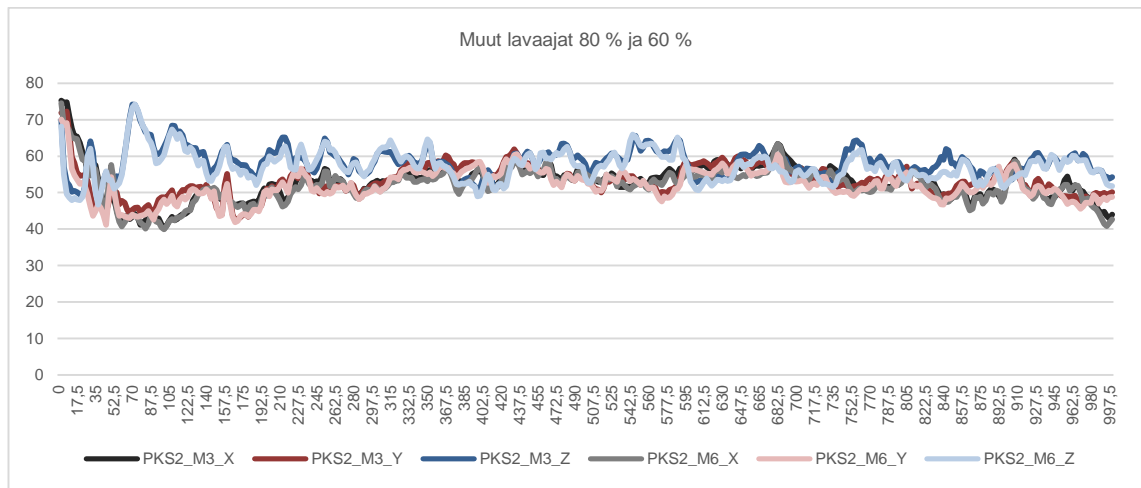
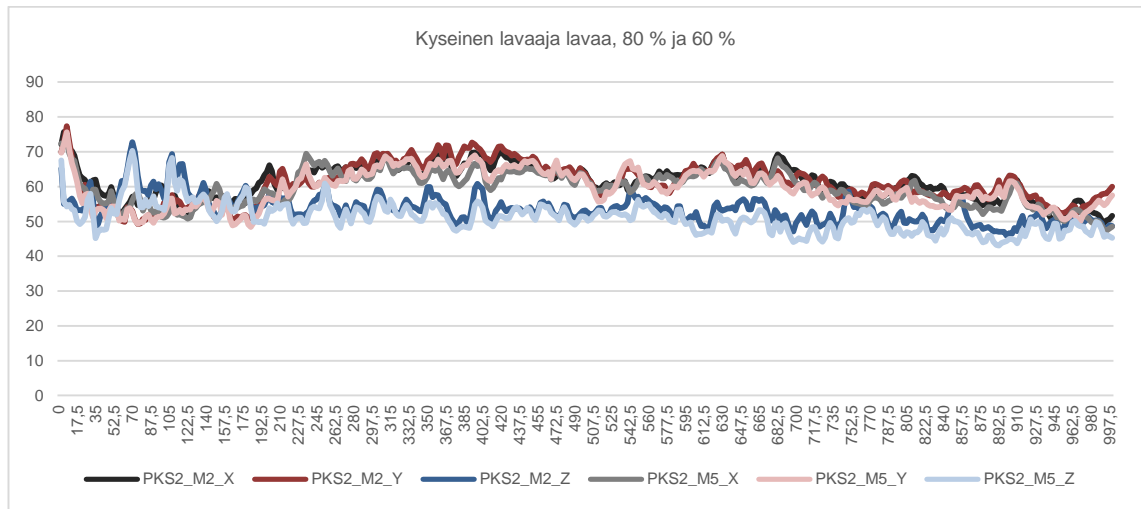
- tallennustiedosto: PKSS-mittaus-5
- PKSS lausasi koko mittauksen ajan vain tölkkä

1

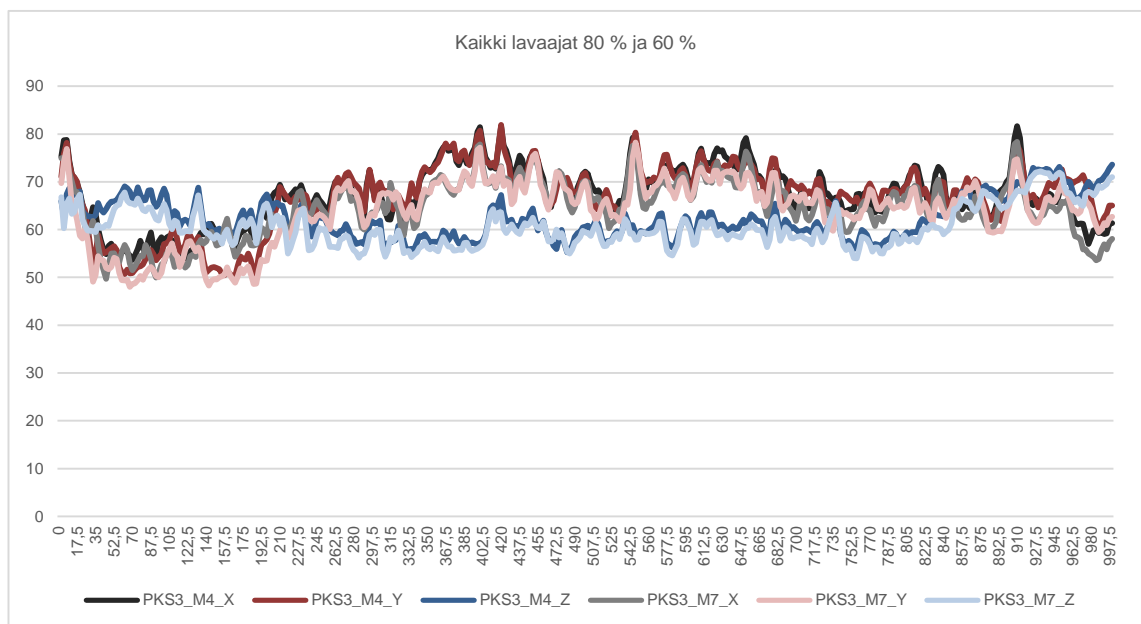
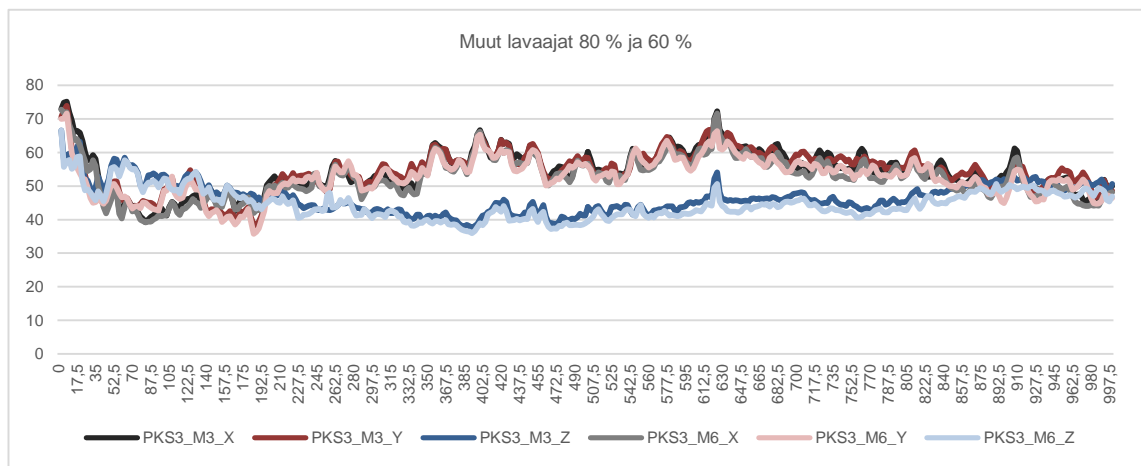
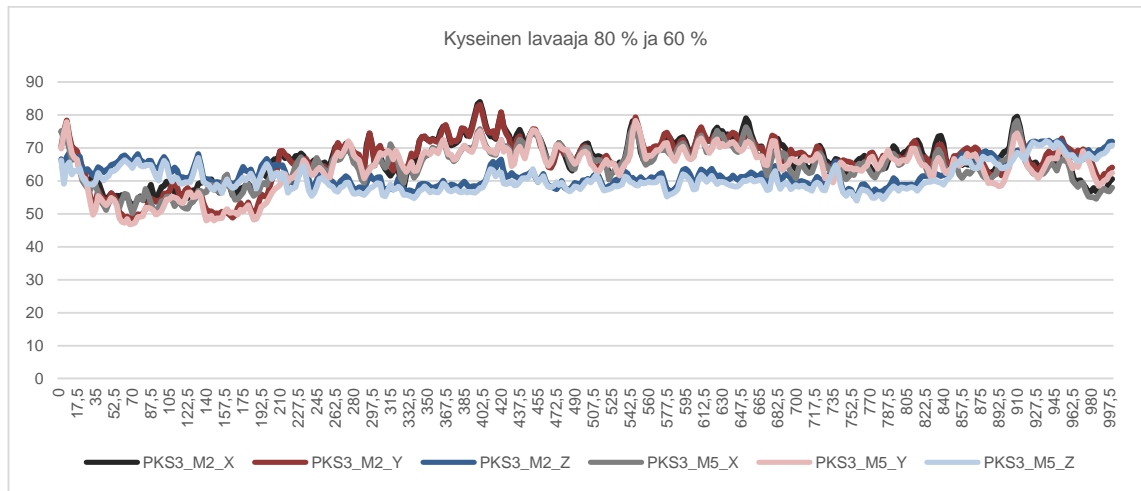
Lavaaja 1:n kuvaajat, alkuperäiset



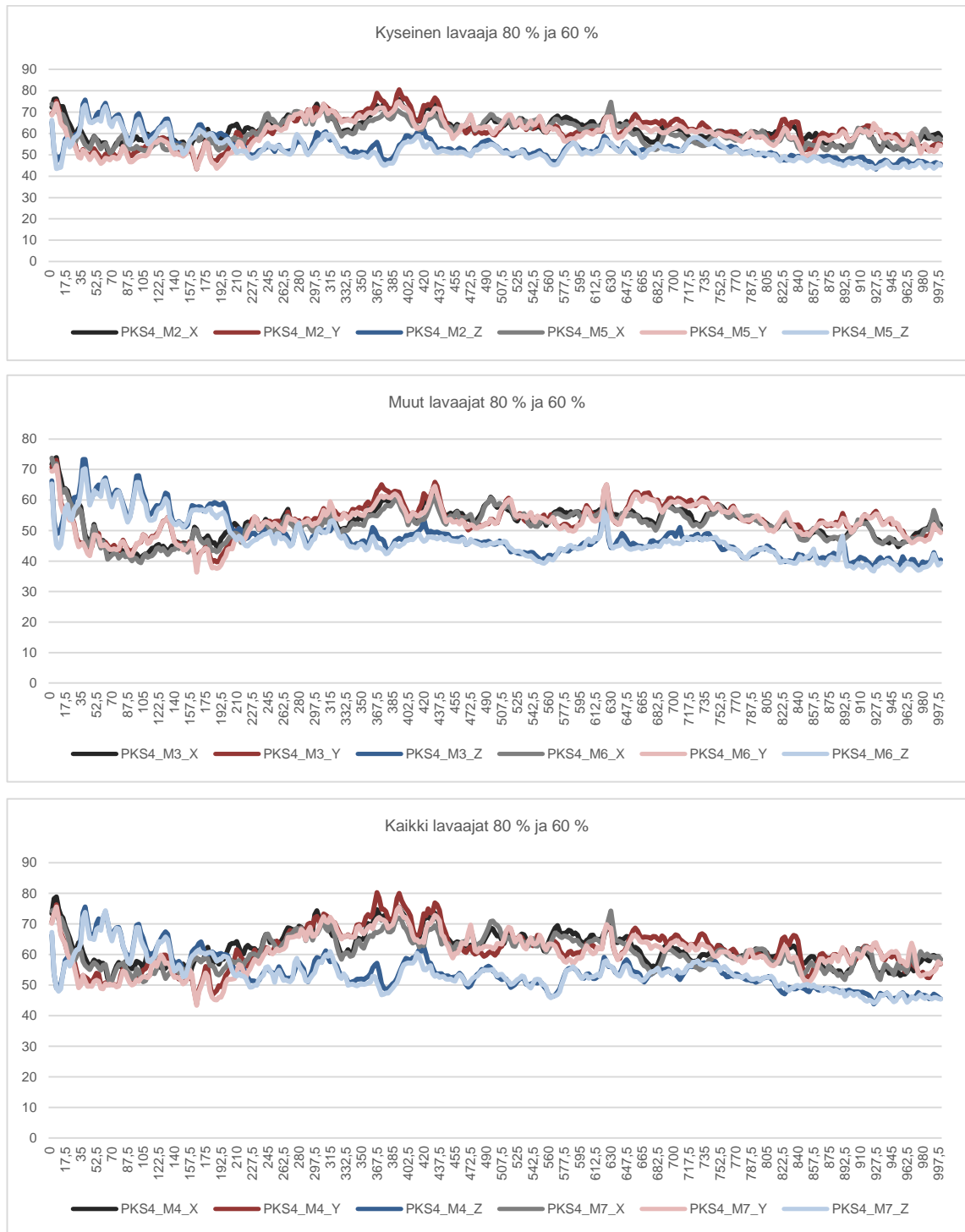
Lavaaja 2:n kuvaajat, alkuperäiset



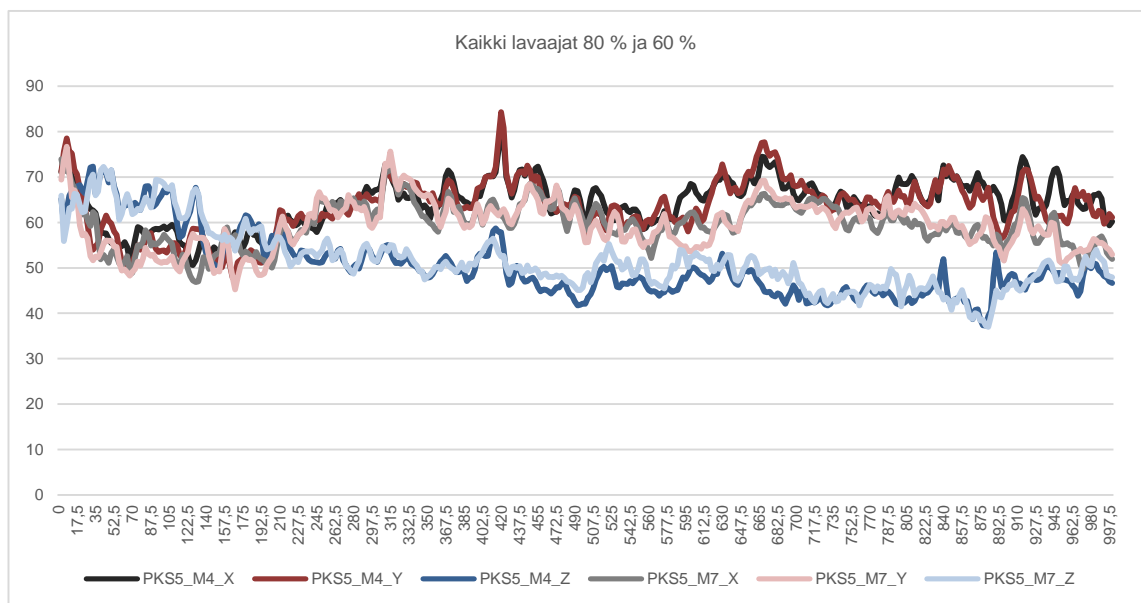
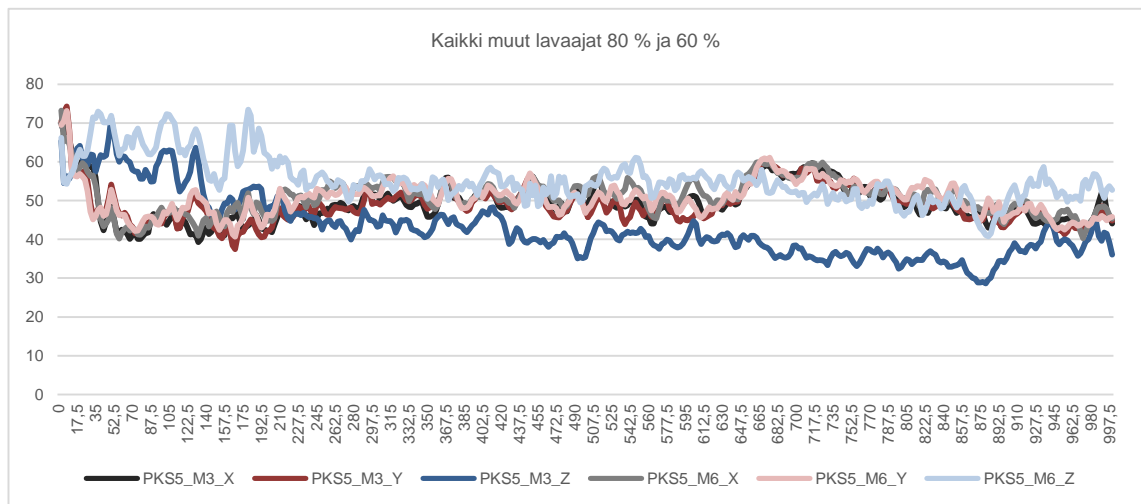
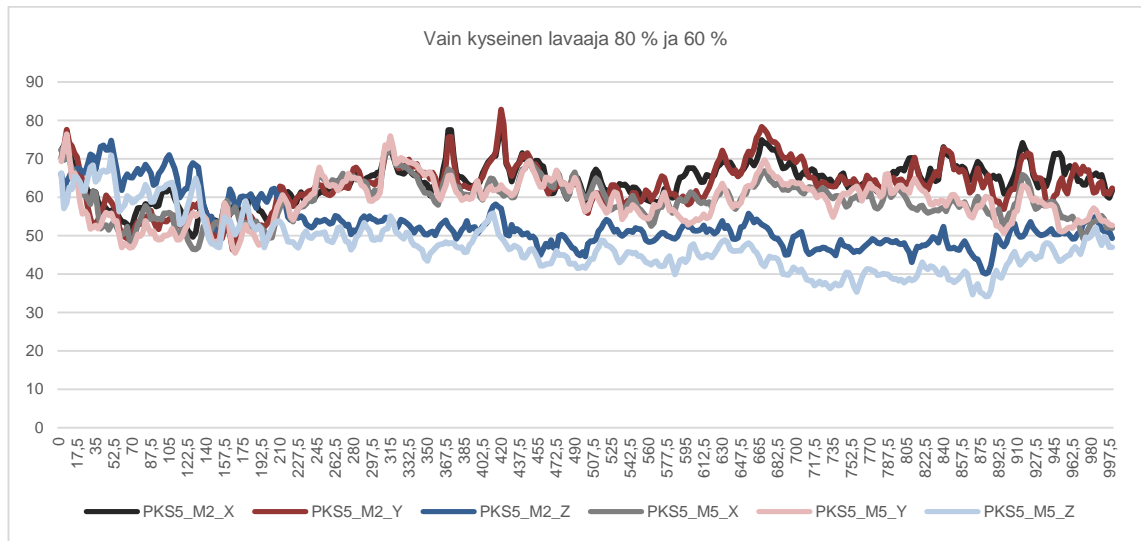
Lavaaja 3:n kuvaajat, alkuperäiset



Lavaaja 4:n kuvaajat, alkuperäiset



Lavaaja 5:n kuvaajat, alkuperäiset



Pöytäkirja, lisämittaus

Lisämittaus 1:

- Nyt anturit: X-0, Y-1, Z-2. Tai siis on samat suunnat kuin aikaisemmissa mittauksissa, mutta koneen omat suunnat ovat nämä: X-0, Y-1, Z-2, joten voisi aikaisempiinkin mittauksiin muuttaa, jotta välttyy sekaannuksilta.
- Anturit 0 ja 1 sijoitettu poikkipalkkeihin ylös.
- Nyt z-suunta on ottopöydän y-suunta! Eli anturi 2 on kiinnitettynä ottopöytään.
- Eka mittaus 5min. Kaikki lavaajat 80 % teholla.

Lisämittaus 2:

- Sama kuin lisämittaus 1, mutta lavaaja 5 ei lavaa.

Lisämittaus 3:

- Sama kuin L1 ja L2, mutta 10 min

Lisämittaus 4:

- Mittausparametrit antureille 0 ja 1 ovat samat kuin alkuperäisissä mittauksissa, mutta mittari 2 on lavaajalla pöydässä kiinni.
- Mittausaika 5 min. Vain PKS3 ja PKS5 lavaa.
- 120000 (jäljellä) ms PKS4 alkoi lavaamaan.
- 95000 (jäljellä) ms kohdalla PKS1 alkoi lavaamaan.

Lisämittaus 5:

- En tiedä mitä tapahtui, tuli tilanne, että oli pakko poistua hetkeksi ja ainaki pari lavaajaa oli jumissa, kun tulin takaisin. Luultavasti kuitenkin kaikki mittauksessa ok, eli mittaukset tulivat valmiiksi ennen häiriötä.

Lisämittaus 6:

- Kaikki, paitsi PKS4, lavaa 80 % teholla.
- Anturit 0 ja 1 tolpassa kiinni ja anturi 2 pöydässä kiinni.
- 150 000ms (jäljellä), kun PKS2:lta loppui lavaus.
- 40 000ms (jäljellä), kun alkoi taas lavaamaan.

Viimeiset lisämittaukset, mittaussuunnitelma ja pöytäkirja

HUOM! PKS2 huollossa, joten ei mitata, eikä myöskään ole käytössä missään mittauksessa.

Mittaussuunnitelma:

1. Kaikki 80 %
2. Vain ko. 80 %
3. Muut 80 %

4. Kaikki 60 %
5. Vain ko. 60 %
6. Muut 60 %

Anturien paikat:

- 0: X – Ylös
1: Y – Ylös
2: Y₂ – Ylös

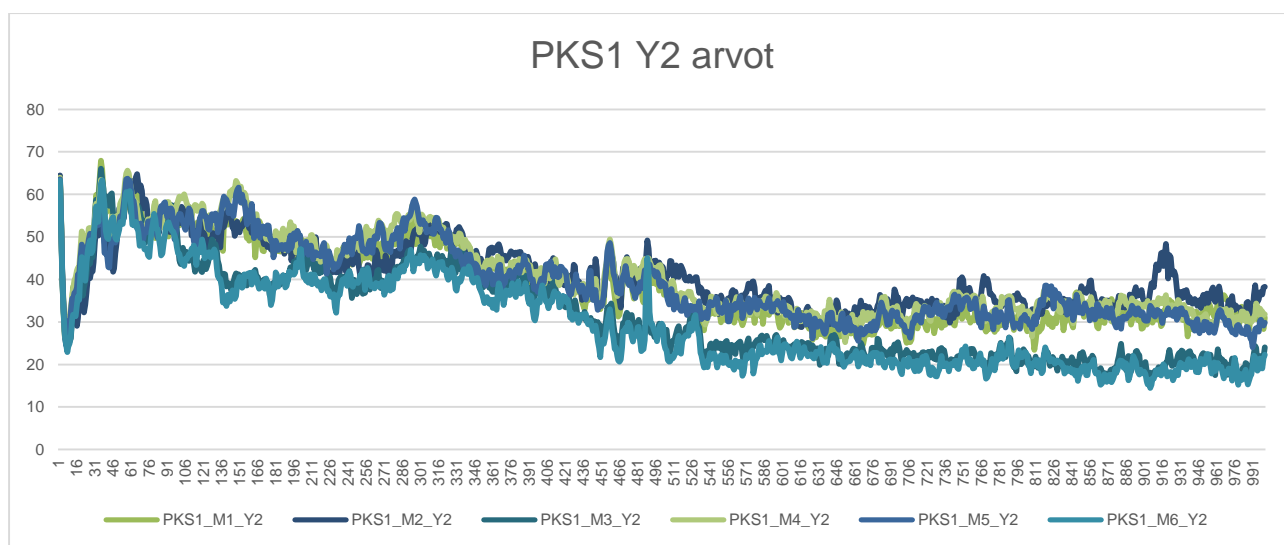
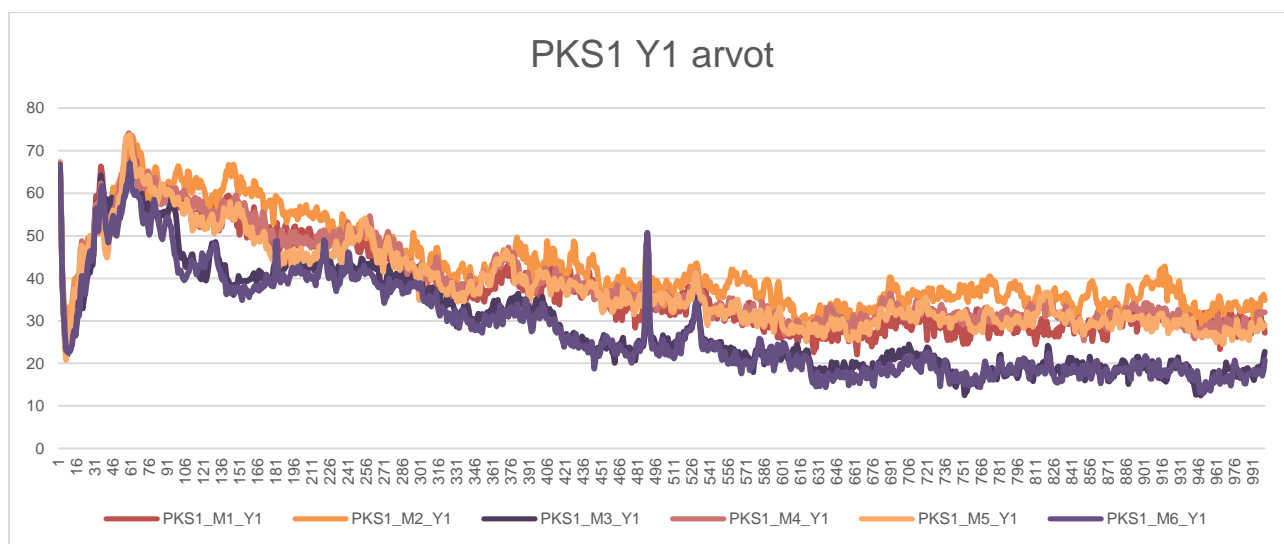
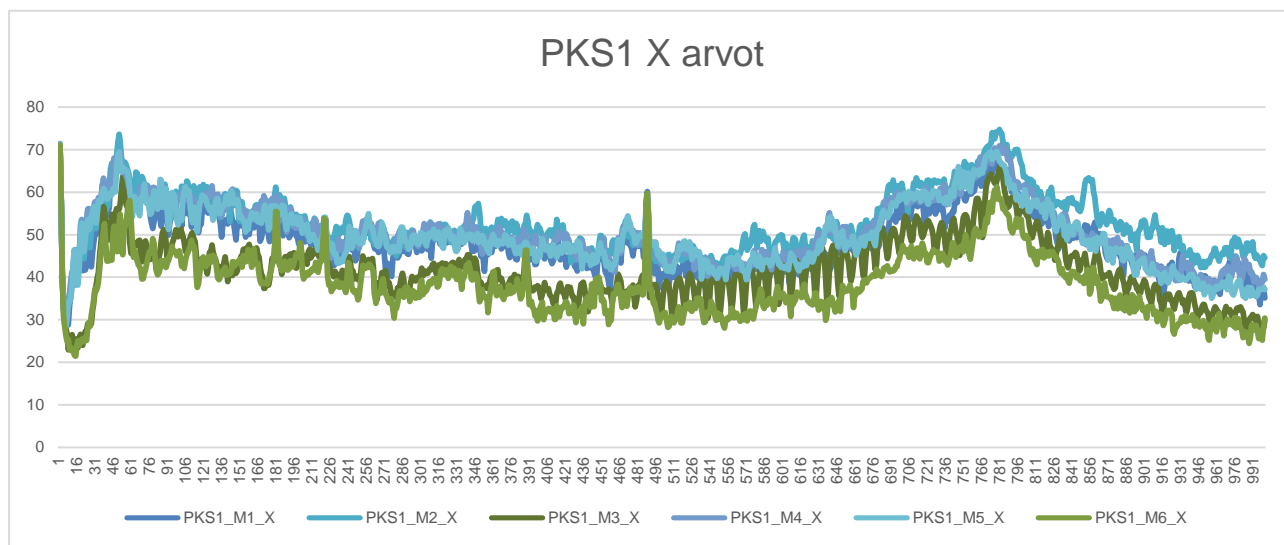
Zoom FFT:

measurement time: 180
number of samples: 4000
scan rate: 40 000
start-stop freq.: 0-1000
number of lines: 10 000

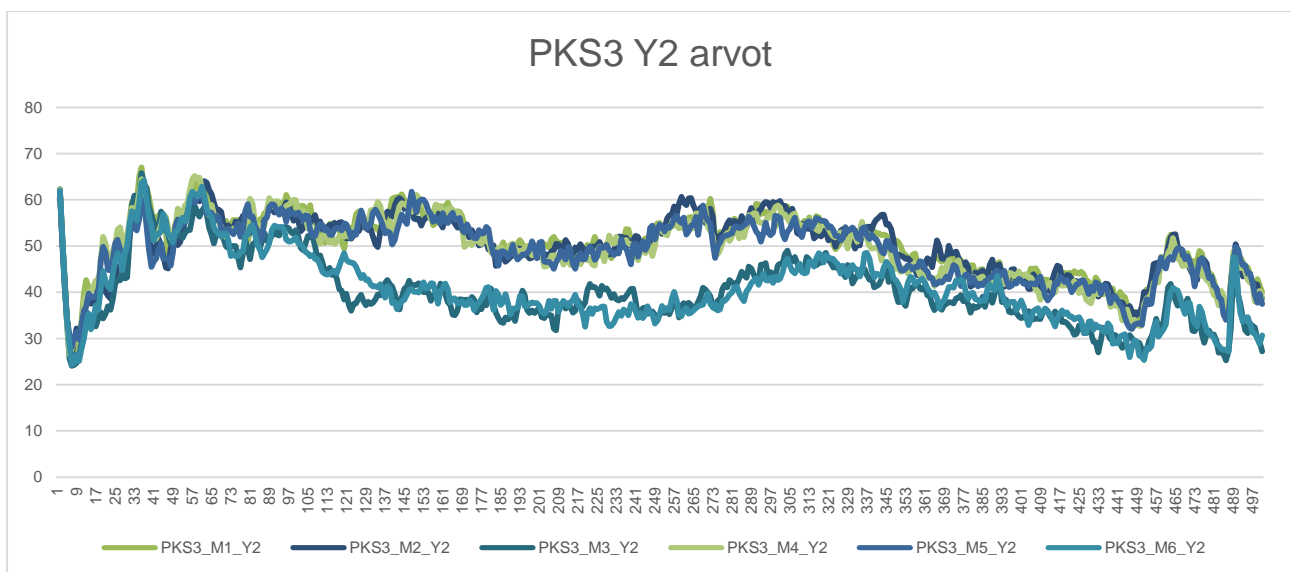
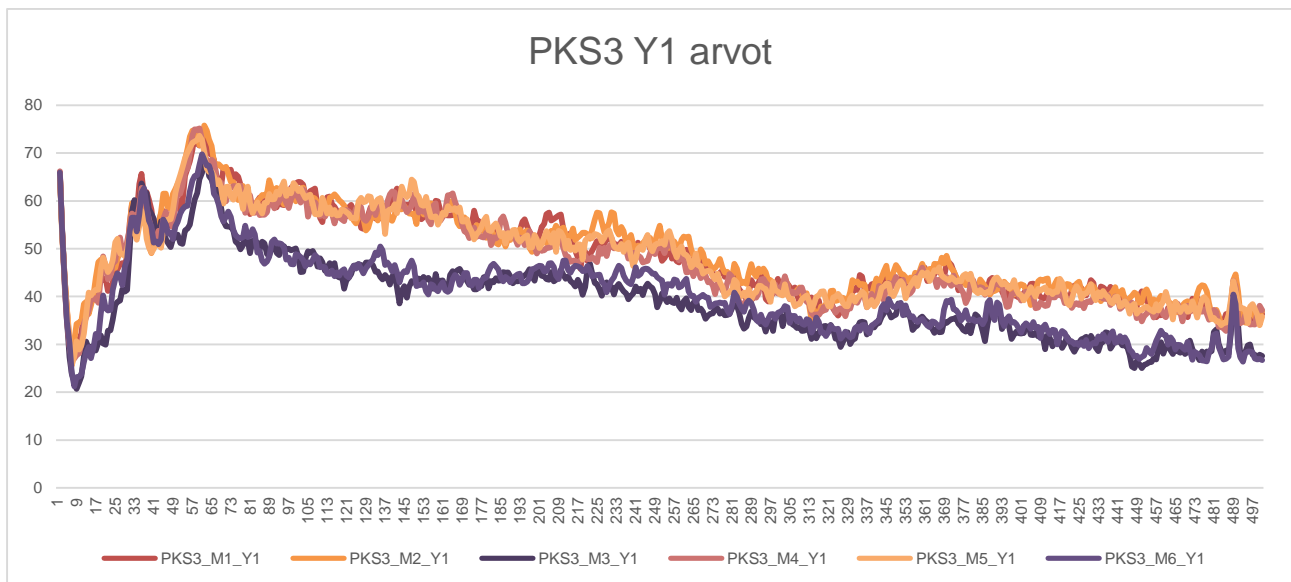
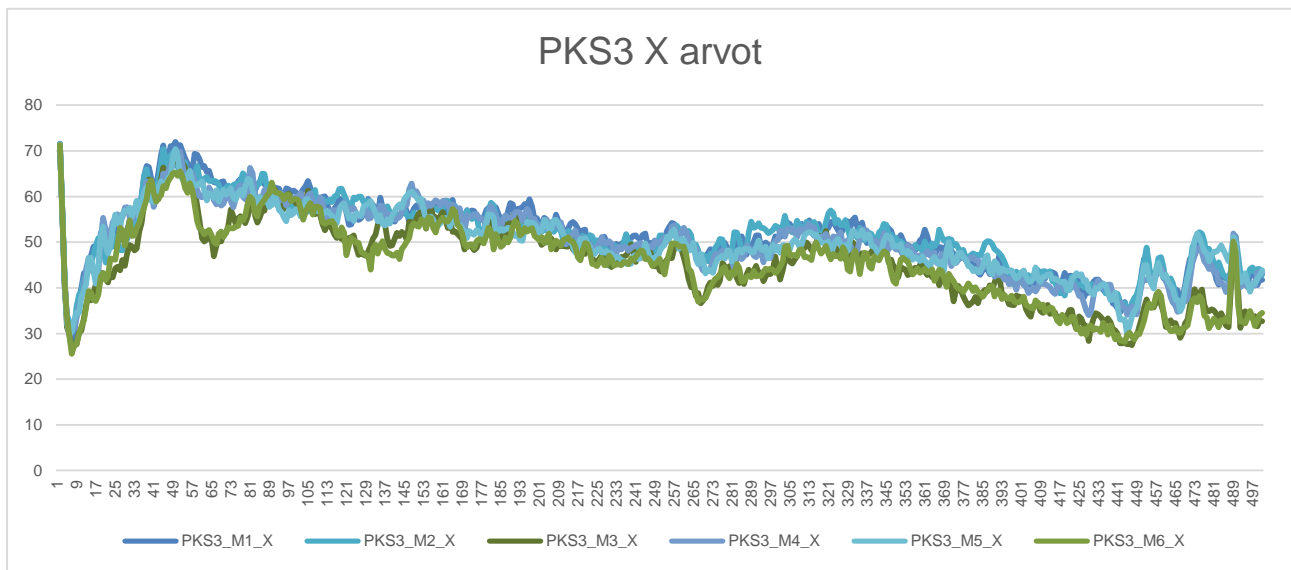
Mittaustapahtumia:

- PKS3_M1: PKS1 lavasi vain 1min 40sek alusta.
- PKS3_M3: PKS1 ei lavaa.
- PKS4_M2: PKS4 jumittui n. 30sek ajaksi.
- PKS4_M1: PKS3 oli jumissa n. 45sek ajan.
- PKS4_M4: PKS4 oli seis n. 40sek ajan.
- PKS5_M5: PKS5 oli seis n.40sek.ajan.

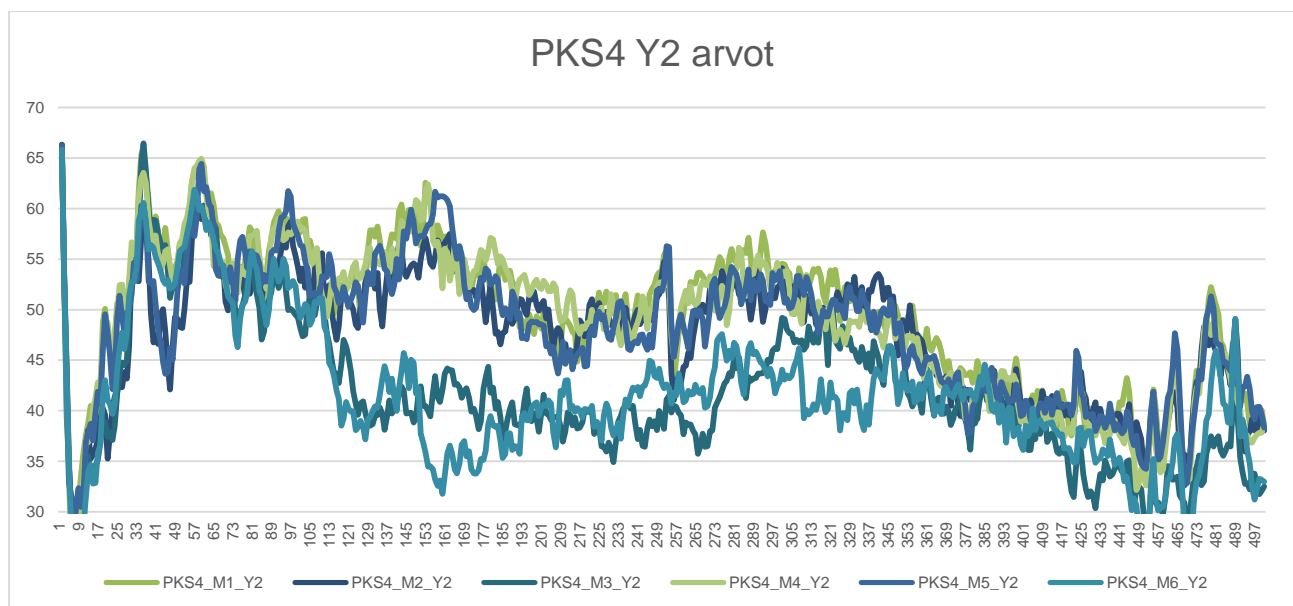
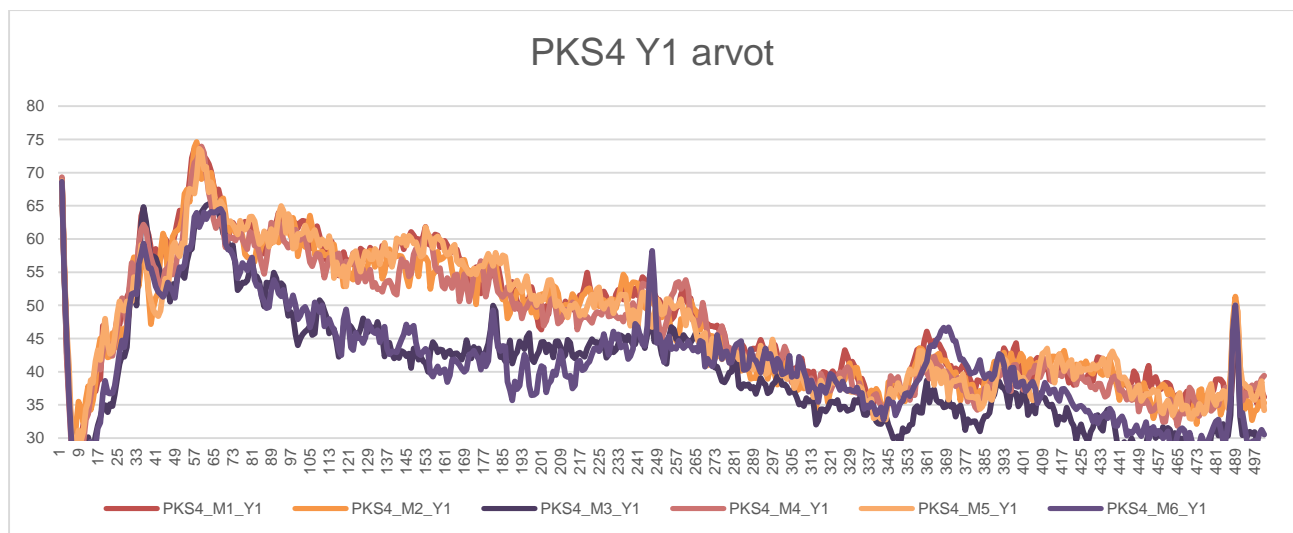
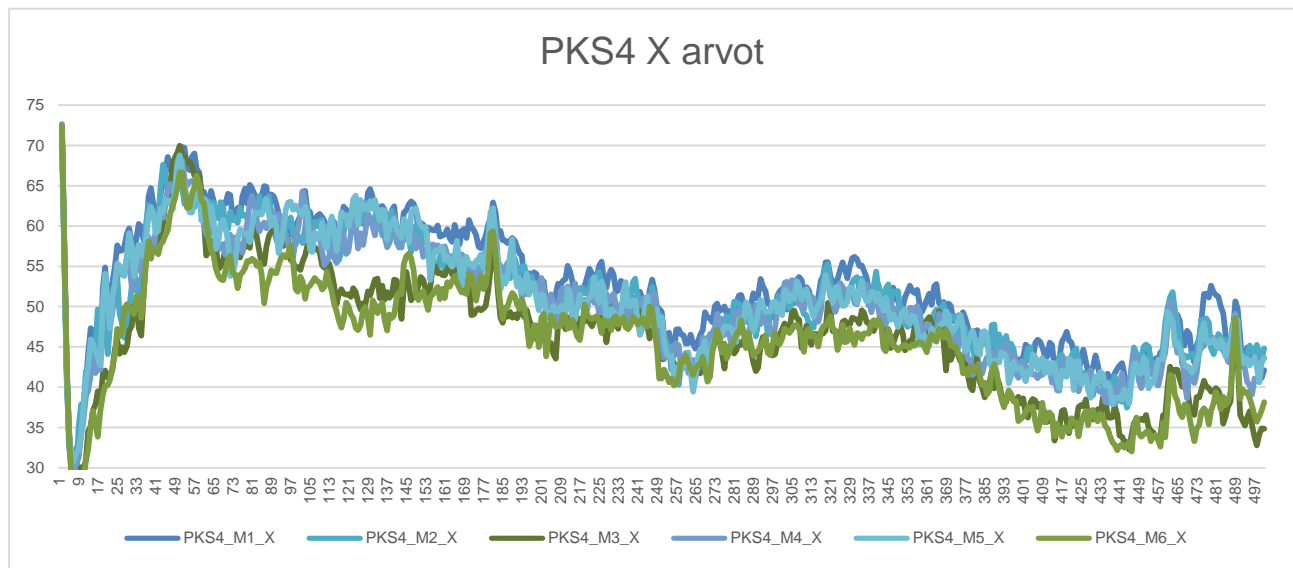
Lavaaja 1:n viimeiset mittaustulokset



Lavaaja 3:n viimeiset mittaustulokset



Lavaaja 4:n viimeiset mittaustulokset



Lavaaja 5:n viimeiset mittaustulokset

