



Patrik Mitro

Värähtelymittausten hyödyntäminen kestotestauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

29.11.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Patrik Mitro
Otsikko: Värähtelymittausten hyödyntäminen kestopestauksessa
Sivumäärä: 84 sivua
Aika: 29.11.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikan tutkinto
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka
Ohjaajat: Testauspäällikkö Tero Kiviniemi, MLE Oy
Lehtori Pasi Oikarinen, Metropolia AMK

Tämän insinööriyön tavoitteena oli selvittää, voiko kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käyttää trukin maston kestopestauksessa maston kunnon valvomiseen. Tutkimusmetodeina oli kirjallisuustutkimus, mittaukset, analysointi ja laskenta.

Kirjallisuustutkimuksessa perehdyttiin laakereiden ja värähtelyn teoriaan sekä lukuihin kunnonvalvontaa käsitteleviin standardeihin ja oppaisiin.

Käytännön osuudessa suoritettiin värähtelymittauksia mastolle erilaisilla simuloitulla laakerivaurioiden asteilla. Kiihtyvyyssantureilta saatava raakadata käsiteltiin mittausohjelmassa, josta muodostettiin 2D-kuvaaja aika- ja taajuustasossa.

Saatua dataa analysoitiin vertailemalla värähtelyn spektrejä aika- ja taajuustasossa referenssimittauksiin. Tuloksista kävi ilmi, että tietyt laakerivauriot on mahdollista havaita värähtelymittauksilla.

Kunnonvalvonnan värähtelymittauksia on mahdollista hyödyntää mastojen kestopestauksessa, kuitenkin vain tietyissä määrin. Värähtelymittausten valvonta on mahdollista liittää automatisoituun kestopestaukseen.

Avainsanat: värähtely, laakeri, kunnonvalvonta, FFT-analyysi, kestopestaus

Abstract

Author: Patrik Mitro
Title: Utilization of vibration measurements in endurance testing
Number of Pages: 84 pages
Date: 29.11.2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisors: Test Manager Tero Kiviniemi, MLE Oy
Senior Lecturer Pasi Oikarinen, Metropolia UAS

The objective of this Bachelor's thesis was to determine, if vibration measurements used in condition monitoring could be used in mast endurance testing to give more information of the condition of the mast. Methods used for this thesis were literature, measurements, analyzing and calculus.

Firstly the theory of bearings and vibrations was studied. Secondly multiple condition monitoring standards and guides were studied.

In the practical part of the thesis, vibration measurements were conducted to the mast with different stages of simulated bearing faults. Raw data from acceleration sensor were analyzed in the measurement software, and after that 2D graphs created in time domain and frequency domain.

The measured data were analyzed by comparing the data with the reference data in time and frequency domain. The results show that certain bearing faults are possible to recognize in vibration measurements.

In conclusion, condition monitoring vibration measurements can be used in determining the condition of the mast in endurance testing, however, only partially. It is also possible to add the vibration measurement to the test automation, so that the software monitors the vibration levels.

Keywords: Vibration, FFT, bearing, condition monitoring, endurance testing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teoriaa	1
2.1	Laakerit	2
2.1.1	Vierintälaakereiden historiaa	3
2.1.2	Vierintälaakereiden rakenne	4
2.1.3	Erilaiset vierintälaakerit	5
2.1.4	Laakerivauriot ja niiden havaitseminen	8
2.2	Värähtely	11
2.2.1	Värähtelyn vapausasteet	12
2.2.2	Vapaa värähtely	13
2.2.3	Harmoninen värähtely	15
2.2.4	Vaimeneva värähtely	17
2.2.5	Pakkovärähtely ja resonointi	20
2.3	FFT-analysointi	22
2.3.1	Käyttökohteet	23
2.3.2	FFT-muunnos	24
2.4	Värähtelymittaukset kunnonvalvonnassa	26
2.4.1	Värähtelytilan valvonta	27
2.4.2	Mittaussuureet	28
2.4.3	Anturit	30
2.5	Mekaaninen kestopotestaus	32
3	Kestotesti ja mittaukset	33
3.1	Kohteen esittely	34
3.1.1	Kohteen osat	35
3.1.2	Testi	37
3.2	Rasitukset	38
3.3	Masto ja laakeri	39
3.3.1	Mitattava masto	39
3.3.2	Mitattava laakeri	40
3.4	Mittalaitteisto	42
3.5	Mittaussuunnitelma	43

3.5.1	Mittauspisteiden valinta	43
3.5.2	Anturin valinta	44
3.5.3	Mittausasetukset	44
3.6	Mittausten toteutus	45
3.6.1	Referenssimittaukset	46
3.6.2	Vaurioituneiden laakereiden mittaukset	52
3.6.3	Mittausepävarmuus	56
4	Tulokset ja analysointi	59
4.1	Mittausten vertailu	62
4.1.1	Laakeri 1	62
4.1.2	Laakeri 2	65
4.1.3	Laakeri 3	67
4.1.4	Laakeri 4	69
4.1.5	Laakeri 5	69
4.1.6	Laakeri 6	71
4.2	Tulosten analysointi	73
4.3	Yhteenvedo	80
5	Johtopäätökset	81
5.1	Työn analysointi	81
5.2	Loppupäätelmät	82
	Lähteet	84

Lyhenteet

FFT: *Fast Fourier Transform*. FFT-muunnos on algoritmi, jolla lasketaan diskreetti Fourierin muunnos.

PLC: *Programmable logic controller*. Ohjelmoitava tietokone, jolla ohjataan automaatioprosesseja.

1 Johdanto

Varastotrukit joutuvat elinkaarensa aikana usein päivittäin sietämään suuria määriä räsitystä toistuvien ja pitkien työsykliä aikana. Kun tuote joutuu tällaisen pitkäkestoisen kulutuksen kohteeksi, se on alttiina mekaaniselle väsymiselle ja rikkoutumiselle, vaikka se ei koskaan saavuttaisikaan staattisia kestoarvojaan. Vaikka mekaanisten jännitysten laskeminen onkin hyödyllistä, sillä ei voida arvioida koko tuotteen elinkaaren pituutta suoraan, koska se ei ota huomioon ajansaatossa tulevia vaurioita eri käyttötilanteissa. Mekaaninen kestoarvotestaus on tällöin tarpeellinen, jotta voidaan mitata aiheutunut vahinko koko elinkaaren aikana. [1.]

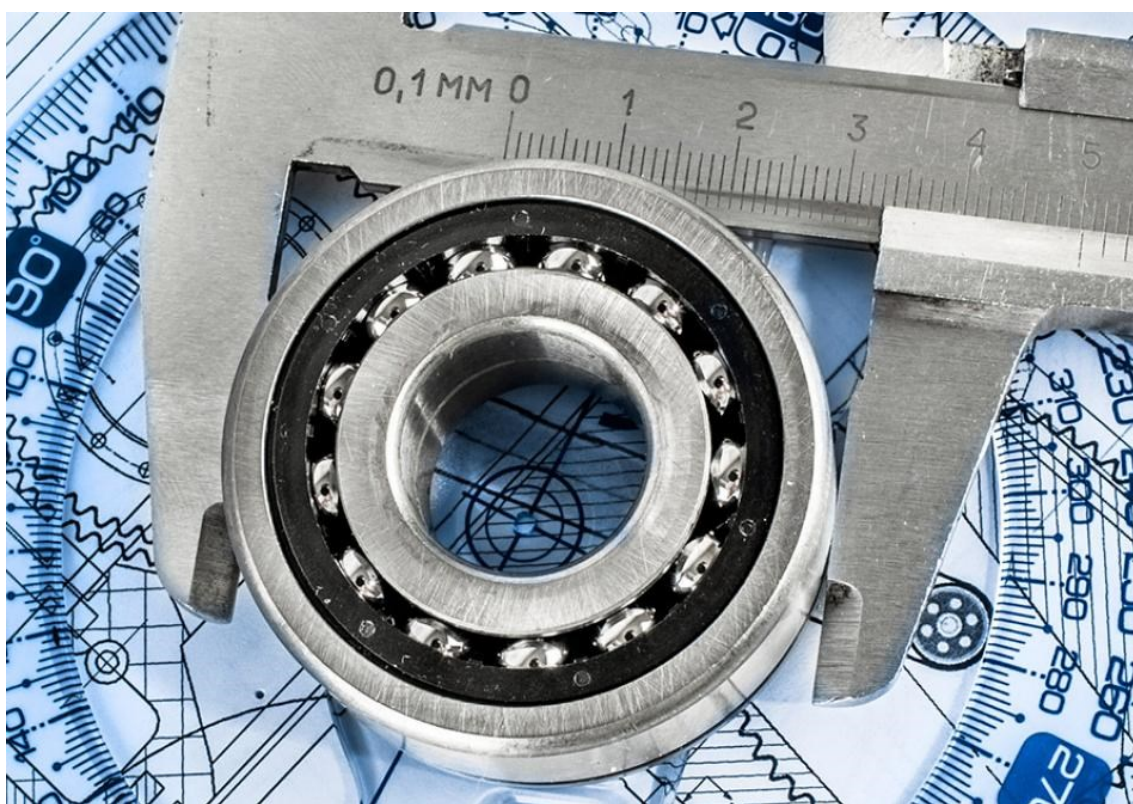
Työn tilaajana toimivalle Mitsubishi Logisnext Europe Oy:lle on erityisen tärkeää valmistaa laadukkaita ja kestäviä varastotrukkeja. Yrityksellä onkin erilaisia kestoarvotestejä trukkeja sekä niiden mastoja varten. Yksi näistä kestoarvotesteistä on trukin maston mekaaninen kestoarvotestaus. Työn tavoitteena on tuottaa lisää tutkimusdataa tällaisesta maston kestoarvotestistä ja arvioida kunnonvalvonnan värähtelymittausten hyödyllisyyttä kestoarvotestissä. Tutkimusmetodeina oli kirjallisuustutkimus, mittaukset, analysointi ja laskenta.

2 Teoriaa

Teoriaosuudessa perehdytään opinnäytetyön kannalta oleelliseen kirjallisuuteen. Aluksi käsitellään laakereita, joiden kunnonvalvontaa värähtelymittauksilla on ensisijaisesti tarkoitus pyrkiä suorittamaan. Tästä päästään suoraan värähtelyn teoriaan, värähtelymittauksiin kunnonvalvonnassa ja erilaisiin antureihin, joita kunnonvalvonnassa voidaan hyödyntää. Lopuksi tutustutaan vielä eri standardeihin, joita kunnonvalvontaan ja värähtelymittauksiin liittyy sekä hieman kestoarvotestauksen periaatteeseen.

2.1 Laakerit

Kuula- ja rullalaakerit, joita kutsutaan yleisesti vierintälaakereiksi (kuva 1), ovat usein käytettyjä komponentteja mekaanisissa laitteissa. Niitä käytetään sallimaan akselin liike tai liike akselilla yksinkertaisissa kaupallisissa laitteissa, kuten polkupyörissä, rullaluistimissa ja sähkömoottoreissa. Niitä käytetään myös monimutkaisissa mekanismeissa kuten lentokoneiden kaasuturbiineissa, valsaamoissa, hammaslääkärin porissa, gyroskoopeissa sekä voimansiirrossa. Vuoteen 1940 asti laakereiden suunnittelu ja soveltaminen oli enemmänkin taideteollista kuin tieteellistä. Kuitenkin 1945 luvulta lähtien, kun toinen maailmansota loppui ja atomiaika alkoi, tieteelliset harppaukset ovat olleet eksponentiaalisia. Siitä lähtien kun avaruusmatkailu alkoi vuonna 1958, ovat vaatimukset insinöörilaitteistoille kasvaneet jatkuvasti. Jotta modernien teknisten sovellusten vierintälaakereissa voidaan varmistaa tiettyntasoinen tehokkuus, tarvitaan vankkaa ymmärrystä laakereiden toiminnasta erilaisissa ja usein erittäin rankoissa olosuhteissa. [2.]

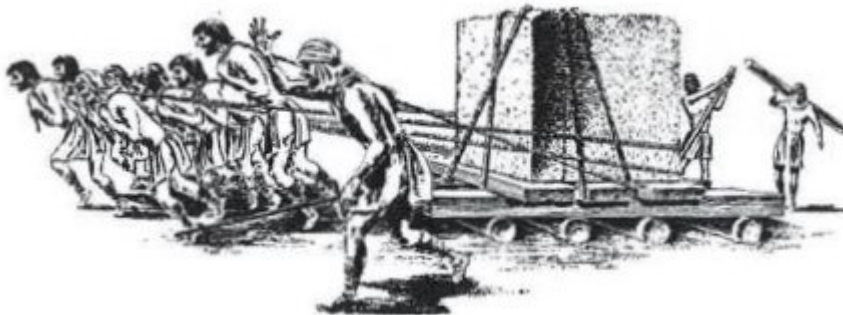


Kuva 1. Vierintälaakeri (kuulalaakeri) [3].

Huomattava määrä tietoa ja dataa laakereiden suorituskyvystä on esitetty valmistajien katalogeissa. Tämä data on yleensä luonteeltaan empiiristä tietoa, joka on saatu isoimpien laakerivalmistajien testeistä. Pienet valmistajat yleensä taas luottavat katalogeissaan standardien tarjoamaan dataan, esimerkiksi ANSI-, DIN- tai ISO-standardeissa esitettyihin tietoihin. Nämä tiedot kuitenkin kuvaavat vain laakereita, jotka toimivat hitaalla tai kohtalaisella nopeudella, yksinkertaisella kuormituksella ja nominaalisissa käyttölämpötiloissa. Laakereiden suorituskyvyn määrittämiseksi sovelluksissa, jotka ylittävät nämä rajat, on tarpeellista palata keskitettyjen pintakontaktien pyörimis- ja liukuliikkeiden perusteisiin, joita laakereissa esiintyy. [2.]

2.1.1 Vierintälaakereiden historiaa

Pyörän keksimisen jälkeen ymmärrettiin, että vaati vähemmän työtä siirtää objektia rullilla kuin liu'uttaa sitä samaa pintaa pitkin. Arkeologiset todisteet osoittavat, että jo 1100-luvulla eaa. assyrialaiset käyttivät rullia kelkkojen alla, kun he siirsivät raskaita objekteja (kuva 2). Näin ollen oli väistämätöntä, että monimutkaisiin mekanismeihin ja koneisiin keksittäisiin laakerit, jotka hyödyntävät vierivää liikettä.



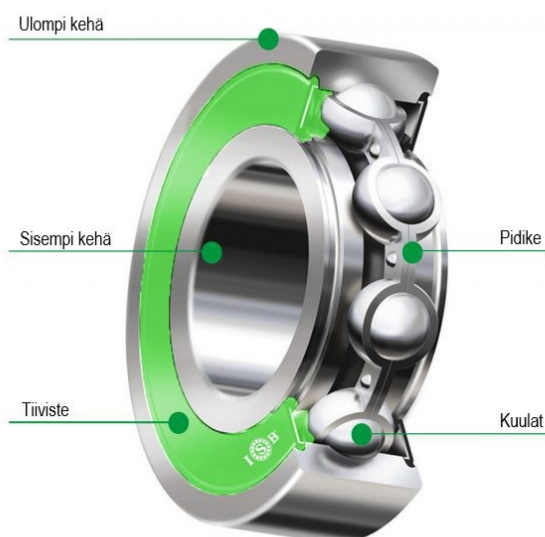
Kuva 2. Assyrialaiset siirtämässä raskasta kiveä rullilla [2, s. 1].

Vaikkakin vierivän liikkeen konsepti oli tiedossa ja käytössä tuhansien vuosien ajan sekä yksinkertaisia vierintälaakereita oli käytössä jo Rooman sivilisaation aikaan, vierintälaakereiden yleistymisen ilmaantui vasta teollisen vallankumouksen aikana. [2, s. 1.]

Alun perin valmistajat eivät kyenneet valmistamaan riittävän laadukkaita vierintälaakereita, jotka olisivat pystyneet kilpailemaan kestävyudessa hydrodynaamisten liukulaakereiden kanssa. Tilanne on kuitenkin kääntynyt pääläelleen 1900-luvun aikana ja varsinkin 1960-luvulta lähtien ylivoimaisten vierintälaakeriterästen ja jatkuvan valmistusmenetelmien kehityksen johdosta, jotka ovat mahdollistaneet erittäin tarkkojen geometrioiden aikaansaamisen. [2, s. 1.]

2.1.2 Vierintälaakereiden rakenne

Vierintälaakereihin luetellaan kaikki laakerit, joiden toiminta perustuu kitkan minimoimiseen kahden toistensa suhteen liikkuvan pinnan välillä käyttäen hyödyksi kuulia tai rullia (kuva 3). Yleensä vierintälaakeri on kokoonpantu yksikkö, joka koostuu kahdesta teräsrenkaasta. Kummassakin on vahvistettu vierintäura, jossa vahvistetut kuulat tai rullat vierivät. Kuulat tai rullat, joita kutsutaan myös vierintäelementeiksi, ovat usein ”häkissä” pidettynä paikallaan tietyssä kulmassa toistensa suhteen. ”Häkkiä” (englanniksi cage) kutsutaan erottimeksi tai pidikkeeksi. [2, s. 3.]



Kuva 3. Kuulalaakerin rakenne [4].

Vierintälaakerit valmistetaan yleensä teräksestä, joka karkaistaan erittäin kovaksi joko kauttaaltaan tai vähintään materiaalin pinnasta. Kuulalaakeriteollisuudessa universaalisti käytetty teräslaatu on AISI 52100, joka on kohtalaisen rikas kromipitoisuudeltaan ja on helposti kovetettavissa kauttaaltaan asteikolle 61-65 Rockwellin C-lujuusluokassa. Jotkin valmistajat käyttävät tätä terästä myös neulalaakereiden valmistuksessa. Minivierintälaakerit, joita käytetään esimerkiksi gyroskoopeissa, valmistetaan usein ruostumattomasta teräksestä kuten AISI 440C. Kehissä ja vierintäelementeissä käytetään usein pintakarkaistuja teräslaatuja kuten AISI 3310, 4118, 4620, 8620 ja 9310. Joissain erikoistapauksissa, esimerkiksi ajoneuvojen pyöränlaakereissa, vierintäkomponentit on valmistettu induktiokarkaistusta teräksistä. Kaikissa tapauksissa vähintään vierivien komponenttien pinnat ovat erittäin kovia. Joissain suuri nopeuksissa sovelluksissa, nämä komponentit valmistetaan erittäin kevyistä, korkean puristuslujuuden omaavista keraamisista materiaaleista, kuten piinitridistä, kuulien ja rullien inertian pienentämiseksi. Pidikemateriaalit ovat usein suhteellisen pehmeitä verrattuna kuuliin, rulliin ja kehiin. Niillä täytyy olla myös erinomainen paino-kestävyysuhde. Käytettävät materiaalit ovat usein pehmeää terästä, messinkiä, pronssia, alumiinia, nylonia, teflonia, lasikuitua tai hiilikuidulla vahvistettua muovia. [2, s. 4.]

2.1.3 Erilaiset vierintälaakerit

Vierintälaakerit voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan, kuula- ja neulalaakereihin. Näistä on vielä monia erilaisia muunnoksia, mutta tässä insinööriyössä esitellään näistä vain yleisimmät tyypit.

Kuulalaakerit

Yksirivinen syväura kuulalaakeri (kuva 4) on suosituin vierintälaakerityyppi. Useimmissa kaupallisissa laakereissa, sen sisemmän ja ulomman kehän vierintäuralla on 51,5 - 53 %:n kaarevuussäde kuulun halkaisijaan verrattuna. Nämä laakerit suoriutuvat hyvin isoillakin nopeuksilla, kunhan voitelu ja jäähdytys ovat asianmukaiset. [2, s. 11.]



Kuva 4. Yksirivinen syväurakuulalaakeri [5].

Kaksirivinen syväurakuulalaakeri (kuva 5) on nimensä mukaisesti varustettu kahdella kuularivillä. Tämä lisää poikittaiskuormituksen kestoa yksiriviseen verrattuna. Muuten laakerien ominaisuudet ovat melko samanlaiset yksirivisen syväurakuulalaakerin kanssa. [2, s.15.]



Kuva 5. Kaksirivinen syväurakuulalaakeri [6].

Rullalaakerit

Sylinterirullalaakeri (kuva 6) sopii erinomaisesti suurinopeuksiin sovelluksiin sen erittäin pienen kitkamomentin vuoksi. Laakeri kestää myös poikittaiskuormaa hyvin. Sylinterirullalaakerit ovat yleensä aksiaalisesti kelluvia. Yleensä vain ulkokehällä on sisäpuolella kaulukset, jotka pitävät rullaelementit paikallaan. Lisäämällä myös sisemmälle kehälle kaulukset voidaan saada hieman pitkäikäisemmän kesto. Myös näitä laakereita on mahdollista saada yksi- tai kaksirivisenä. [2, s. 23.]



Kuva 6. Sylinterirullalaakereita, vasemmalla yksikauluksinen laakeri [7].

Neulalaakeri (kuva 7) on myös sylinterirullalaakeri, mutta sen vierintäelementit ovat huomattavasti ohuempia. Tämän geometrian vuoksi niiden tarkka valmistus on haastavaa muihin sylinterirullalaakereihin verrattuna eikä niitä voida ohjata yhtä hyvin. Tämän seurauksena niillä on suurempi kitkakerroin kuin muilla sylinterirullalaakereilla. Näissä on myös mahdollista käyttää useampia rivejä vierinelementtejä. [2, s. 23.]



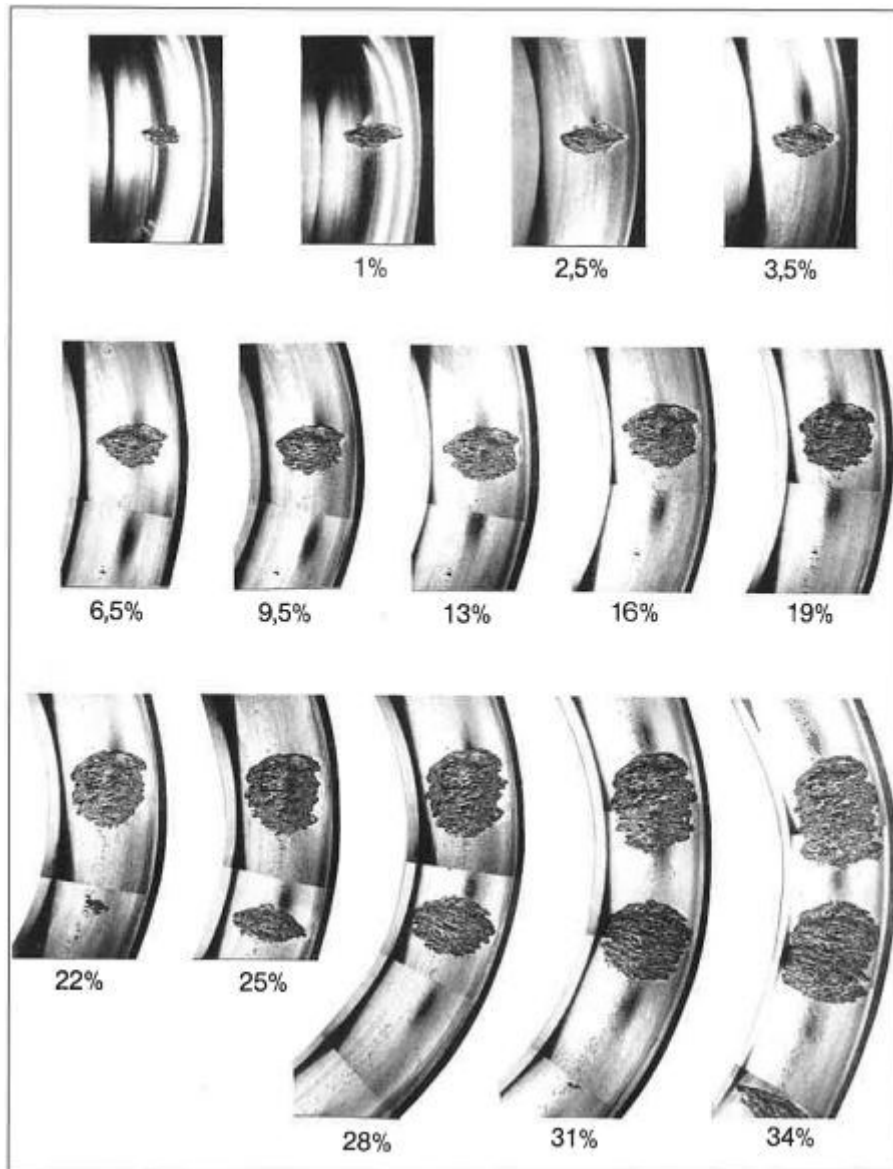
Kuva 7. Neulalaakereita [8].

2.1.4 Laakerivauriot ja niiden havaitseminen

Laakerivaurioiden ensimmäisiä merkkejä on usein toiminnan asteittainen heikentyminen. Toimintaympäristöstä riippuen aika, joka kestää vian alusta lopulliseen hajoamiseen, voi olla muutama minuutti tai jopa muutama kuukausi. Laakerin tai laakerien kunnonvalvontatavan valinnassa on otettava huomioon, millaisesta sovelluksesta on kyse ja millainen vaikutus laakerivauriolla on laitteen toimintaan. [9, s. 4.]

Laakereiden hajoamiselle on monia syitä, yleistettynä seuraavat:

- 1/3 hajoaa väsymisestä (kuva 8)
- 1/3 hajoaa voiteluongelmien vuoksi (väärä voiteluaine, väärä määrä)
- 1/6 hajoaa lian vuoksi (tehottomat tiivisteet)
- 1/6 hajoaa muista syistä (asennusvirheet, taakan kesto mitoitettu riittämättömäksi, huono istuvuus). [10, s. 8.]



Kuva 8. Väsymisvaurion kehitys laakerin sisäkehän vierintäuralla [9, s. 7].

Useimmissa sovelluksissa katsotaan riittäväksi laitekäyttäjän tarkkailu epätasaisen käymisen tai epätavallisen äänen varalta. Oireita, joita käyttäjä voi huomata, ja niiden mahdollisia syitä ovat seuraavat:

- epätasainen käyminen:
vaurioituneet kehät tai vierintäelementit, pinttynyt lika tai muut epäpuhtaudet, liiallinen laakerivälitys

- vähentynyt tarkkuus:
epäpuhtauksista tai riittämättömästä voitelusta johtuva kuluminen, vaurioituneet kehät tai vierintäelementit, muutokset säädöissä (vällys tai esikuormitus)

- epätavalliset käyntiäänet:
 - kitisevä tai vikisevä ääni
liian pieni käyntivällys

 - jylisevä/jyrisevä tai epäsäännöllinen ääni
liiallinen vällys, vaurioituneet kontaktipinnat, lika, sopimaton voiteluaine

 - asteittainen muutos käyntiäänessä
muutos käyntivällyksessä lämpötilasta johtuen, vaurioitunut johdin ("rata", jossa vierintälaakeri kulkee). [9, s. 4.]

Laakerit laitteissa, joiden vaurioitumisella olisi mahdollisesti katastrofaaliset seuraukset tai jotka johtaisivat pitkiin seisokkiaikoihin, esimerkiksi suihkukoneiden turbiinit tai paperikoneet, vaativat jatkuvaa sekä tarkkaa valvontaa. Tällaista valvontaa ei voi enää suorittaa ihmisen aistihavaintoihin perustuen vaan avuksi tarvitaan teknisiä laitteita. Jotta tarkkailu on luotettavaa, on raja-arvojen perustuttava sellaisten vaurioiden oireisiin, joiden odotetaan tapahtuvan.

Laaja-alaiset vauriot

Laakereiden suunnitellun toiminnan perusedellytys on riittävä voitelu, epätoivotuja muutoksia voidaan havaita seuraavilla menetelmillä:

- seuraamalla voitelun määrää

- mittaamalla partikkelien (esim. metallisilpun) määrää voiteluaineessa

- mittaamalla lämpötilaa.

Lämpötilan mittaaminen laakerista on erittäin luotettava ja melko helppo tapa joissakin sovelluksissa tarkkailla voitelun määrää. Normaalisti lämpötilan kuului olla melko tasaista. Jos laakerin voitelu on liian vähäistä tai muutoin puutteellista, se näkyy lämpötilan nopeana nousuna. [9, s. 5.]

Pistevauriot

Vaurioiden tarkentaminen tiettyihin laakerin osiin, esimerkiksi vierintäelementteihin tai kehiin, voidaan havaita aikaisessa vaiheessa värinämittauksilla. Tällaisia pistevaurioita on esimerkiksi murtumat tai väsymiskulumat kehissä ja kuulissa. [9, s. 6.]

2.2 Värähtely

Värähtely on jonkin termodynaamisen systeemin jaksollista liikettä suhteessa systeemin tasapainotilaan. Värähtely on läsnä kaikkialla, ja se vaikuttaa usein erilaisten koneiden tai systeemien suunnittelussa. Värähtely voi olla haitallista, ja sitä tulisi välttää, tai se voi olla erittäin hyödyllistä ja toivottua, kuten esimerkiksi kitaran kielessä. Värähtely koostuu kineettisen ja potentiaalisen energian vuorovaikutuksesta. Värähtelevässä systeemissä on oltava komponentti, joka varastoi potentiaalienergiaa ja vapauttaa sitä kineettisenä energiana massan liikkeenä eli värähtelynä. Massan liike vapauttaa kineettistä energiaa komponentille, joka varastoi potentiaalienergiaa. [11, s. 2.]

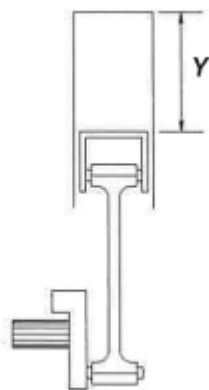
Värähtelyn perussuureita ovat amplitudi, jaksonaika ja taajuus. Amplitudi kuvaa kappaleen suurinta poikkeamaa tasapainoasemastaan; amplitudia merkitään tunnuksella A . Jaksonaika kuvaa yhden heilahdusliikkeen aikaa huipusta huippuun, jaksonaikaa merkitään tunnuksella T . Taajuus kuvaa jonkin toistuvan ilmiön tapahtumakertoja aikayksikköä kohden, taajuus on värähtelyn jaksonajan käänteisarvo (kaava 1), taajuus merkitään f . [12, s. 1.]

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

Tässä sovelluksessa keskitytään vain mekaanisiin värähtelyihin. Värähtely voi olla haitallista mastolle, esimerkiksi irtoavien muttereiden tai komponenttien kulumista edistävänä tekijänä. Värähtely voi kuitenkin indikoida vaurioita laakereilta kestopisteen mastossa, joita pyritään havaitsemaan ja analysoimaan mitauksissa.

2.2.1 Värähtelyn vapausasteet

Mekaanisella systeemillä voi olla kahdenlaista liikettä, pyörimisliikettä ja etenevää liikettä. Näin ollen muuttujien määrä, joka määrittelee systeemin massapisteen, on systeemin vapausaste. Esimerkkinä on moottorin mäntä kuvassa 9, joka voi liikkua vain ylös ja alas sylinterissä. Siinä ainoa muuttuja, joka tarvitsee tietää männän sijainnin määrittämiseksi, on matka sylinterinkannesta männänlakeen (Y). Tämä on yhden vapausasteen värähtelijä. [13, s. 11.]

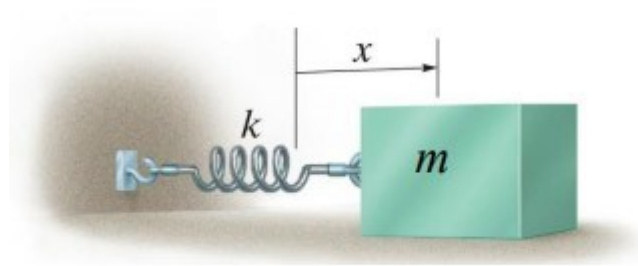


Kuva 9. Mäntä, yhden vapausasteen värähtelijä [13, s. 11].

Toisaalla taas kiinteällä kappaleella, joka liikkuu vapaasti avaruudessa, on kuusi vapausastetta: pyörimisliike kolmeen eri suuntaan ja etenemisliike kolmeen eri suuntaan. Värähtelyanalyysissä olemme yleensä kiinnostuneita vain yhden vapausasteen systeemeistä. Useimmissa systeemeissä, joilla on monta vapausastetta, suurimmat huolet värinästä löytyvät ensimmäisen vapausasteen alueelta. [13, s. 11.]

2.2.2 Vapaa värähtely

Kinemaattisen perusvärähtelyn ominaisuudet liikkuvalla partikkelilla yhdessä ulottuvuudessa ovat siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys. Yksinkertaiselle harmonisen liikkeen omaavalle jousimassasysteemille (kuva 10) nämä ominaisuudet voidaan esittää matemaattisesti. [11, s. 5.]



Kuva 10. Yhden vapausasteen värähtelijä, jossa x on liikematka tasapainoasemasta, k on jousivakio ja m on massa [14].

Liikkeyhtälö tälle on

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2)$$

jossa m on massa, $\ddot{x}(t)$ on siirtymän toinen aikaderivaatta, k on jousivakio ja x on asema. Yhtälö voidaan ratkaista aaltofunktioilla, jotka kuvaavat kappaleen siirtymää, nopeutta ja kiihtyvyyttä.

Yhtälö siirtymälle on

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (3)$$

jossa A on amplitudi tai siirtymän maksimiarvo, ω_n on ominaiskulmataajuus ja ϕ on vaihekulma, joka määrittää aaltofunktion alkuarvon.

Nopeus on siirtymän ensimmäinen derivaatta:

$$\dot{x}(t) = \omega_n A \dot{\cos}(\omega_n t + \phi) \quad (4)$$

Kiihtyvyys taas on siirtymän toinen derivaatta:

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n^2 A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (5)$$

Kun yhtälöt 5 ja 3 sijoitetaan liikeyhtälöön 2, nähdään, että yhtälö 3 on liikeyhtälön ratkaisu:

$$-m\omega_n^2 A \sin(\omega_n t + \phi) = -k A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (6)$$

Kun yhtälö 6 jaetaan amplitudilla ja massalla, saatu tulos kuvaa harmonista värähtelyä. Se ilmaisee värähtelijän paikan ajan funktiona:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \text{ tai } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

Vakio ω_n kuvaa jousimassa systeemin taajuutta, jolla liike toistaa itseään, minkä takia sitä kutsutaan systeemin ominaiskulmataajuudeksi. Koska liikeyhtälön 2 ratkaisuun vaaditaan integroimista kahdesti, on tutkittava integroituvia muuttujia A ja ϕ . Jousimassasysteemin alkutila määrittelee näiden kahden arvon. Kuten Newtonin ensimmäinen laki kertoo, jos kappaleeseen ei kohdistu ulkoista voimaa, se pysyy levossa. Jos taas massa on siirtynyt paikkaan x_0 ajanhetkellä $t = 0$, voima (kx_0) jousessa johtaa liikkeeseen. Myös jos massalle on annettu alkunopeus v_0 ajanhetkellä $t = 0$, liike johtuu momentin muutoksesta. Nämä ovat lähtötilanteita ja sijoitettuna yhtälöön 3:

$$x_0 = x(0) = A \sin(\omega_n 0 + \phi) = A \sin \phi \quad (8)$$

ja

$$v_0 = \dot{x}(0) = \omega_n A \cos(\omega_n 0 + \phi) = \omega_n A \cos \phi \quad (9)$$

Ratkaistaan yhtälöt muuttujille A ja ϕ :

$$A = \frac{\sqrt{\omega_n^2 x_0^2 + v_0^2}}{\omega_n} \quad (10)$$

ja

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega_n x_0}{v_0} \quad (11)$$

Näin liikeyhtälöksi jousimassa systeemille saadaan

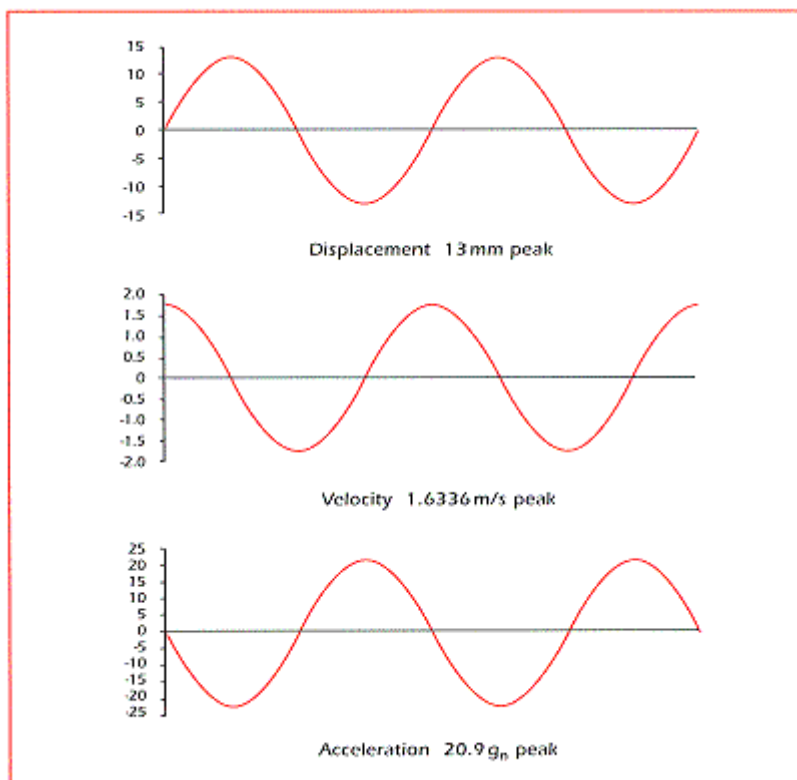
$$x(t) = \frac{\sqrt{\omega_n^2 x_0^2 + v_0^2}}{\omega_n} \sin(\omega_n t + \tan^{-1} \frac{\omega_n x_0}{v_0}) \quad (12)$$

Tätä ratkaisua kutsutaan systeemin *vapaaksi asteeksi*, koska ulkopuolista voimaa ei ole vaikuttamassa ajanhetken $t = 0$ jälkeen. Jousimassasysteemin liikettä kutsutaan *yksinkertaiseksi harmoniseksi liikkeeksi* tai *oskilloivaksi liikkeeksi*. Jousimassasysteemiin voidaan viitata myös nimillä *yksinkertainen harmoninen oskillattoori* tai *vaimentamaton yhdenvapausasteen systeemi*. [11, s. 7 - 10.]

2.2.3 Harmoninen värähtely

Yksinkertaisen harmonisen jousimassasysteemin perustavanlaatuisia kinemaattisia ominaisuuksia kuvaavat siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys. Näitä suureita kuvaavat yhtälöt ovat 3, 4 ja 5. Huomioitavaa on suureiden eri amplitudit suhteessa toisiinsa. Systeemille, jonka ominaistajuus on suurempi kuin 1 rad/s, suhteellinen nopeusvaste on suurempi kuin siirtymävaste ω_n kerrannaisella ja kiihtyvyysovaste on suurempi ω_n^2 kerrannaisella. Systeemille, jonka ominaistajuus on alle 1 rad/s, nopeuden ja kiihtyvyyden amplitudit ovat pienempiä suh-

teessa siirtymään. Huomionarvoista on myös se, että nopeuden vaihe on 90 astetta eri tahdissa kuin siirtymä, kun taas kiihtyvyys on 180 astetta eri vaiheessa kuin siirtymä ja 90 astetta eri vaiheessa kuin nopeus (kuva 11). [11, s. 11.]



Kuva 11. Siirtymän (displacement), nopeuden (velocity) ja kiihtyvyyden (acceleration) vaihe-ero [15].

Ominaiskulmataajuutta ω_n (yhtälö 3) mitataan radiaaneina per sekunti, ja se kuvaa oskillaation toistuvuutta. Aika, joka syklillä kestää toistaa itsensä, kuvataan jaksonajalla T . Sinifunktion ominaisuuksien perusteella harmonisen värähtelyn jaksonajaksi saadaan

$$T = \frac{2\pi \text{ rad}}{\omega_n \text{ rad/s}} = \frac{2\pi}{\omega_n} \text{ s} \quad (13)$$

Usein taajuutta mitataan sykleinä per sekunti, jota kuvataan suureella hertsi eli (Hz). Taajuus hertseinä (f_n) liittyy kulmataajuuteen (ω_n):

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\omega_n \text{ rad/s}}{2\pi \text{ rad/sykli}} = \frac{\omega_n \text{ sykli}}{2\pi \text{ s}} = \frac{\omega_n}{2\pi} \text{ (Hz)} \quad (14)$$

Harmonisen värähtelyn taajuus riippuu ainoastaan systeemin ominaisuuksista. Se ilmaisee, kuinka kappale luonnostaan värähtelee, kun ulkoisia pakotteita ei ole. Taajuus f_n kuvaa siis systeemin ominaisvärähtelyä, jota kutsutaan ominaistaajuudeksi. [16, s. 208.]

2.2.4 Vaimeneva värähtely

Ideaalin jousimassa systeemin oletetaan värähtelevän ikuisesti. Todellisuudessa on kuitenkin havaittu, että vapaasti värähtelevän systeemin värähtely vaimenee hiljalleen, kunnes lopulta loppuu kokonaan. Tästä syystä yhtälöä 2 on muokattava, jos halutaan esittää todellisia vapaasti värähteleviä kappaleita, kuten esimerkiksi ajoneuvon lehtijousta. Differentiaaliyhtälöiden teoria ehdottaa, että lisäämällä termin $c\dot{x}(t)$, jossa c on vakio, yhtälöön 2, johtaa ratkaisuun $x(t)$ jossa värähtely loppuu. Fyysinen havainnointi tukee tätä mallia, ja sitä käytetään kuvaamaan vaimennusta tai häviötä erilaisissa mekaanisissa systeemeissä. Tällaista vaimennusta kutsutaan viskoosiseksi vaimennukseksi. [11, s. 19.]

Otetaan esimerkiksi ajoneuvon iskunvaimennin, joka nimensä mukaisesti pyrkii vaimentamaan liikkeen. Iskunvaimentimen sylinterin sisällä on mäntä ja öljyä. Männän liikkuessa sylinterissä öljy toimii vastuksena männän liikkeelle, jolloin männän liike vaimenee. Voima on suhteessa männän nopeuteen, mutta vastakkaiseen suuntaan kuin männän liike. Tätä vaimennusvoimaa merkitään f_c , joka voidaan esittää

$$f_c = c\dot{x}(t) \quad (15)$$

jossa c on vakio, joka kuvaa öljyn viskositeettia. Vakiota c kutsutaan vastuskerroimeksi, jonka yksikkö on voima per nopeus. SI-järjestelmässä tämä voidaan kuitenkin supistaa muotoon kg/s (yhtälö 16).

$$[c] = \frac{[F]}{[v]} = \frac{N}{m/s} = \frac{Ns}{m} = \frac{\frac{kgm}{s^2} \cdot s}{m} = \frac{kg}{s} \quad (16)$$

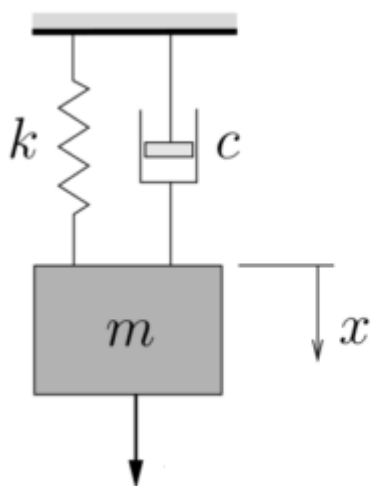
Iskunvaimentimessa vakio c voidaan määrittää nesteen kinematiikalla. Useimmissa tapauksissa kuitenkin f_c täytyy määrittellä ekvivalenteilla efekteillä, joita systeemin materiaalissa on. Esimerkkinä ajoneuvon moottorin kannakkeen kumityyny (jossa on myös jäykkyyttä f_k). Kaikissa tapauksissa, joissa vaimennusvoima f_c on verrannollinen nopeuteen, käytetään vaimennussylinterin kuvaajaa esittämään tämän voiman läsnäolo (kuva 12). Käyttämällä yksinkertaista voimabalanssia x :n suuntaan kuvan 12 massassa, liikeyhtälöksi saadaan

$$m\ddot{x} = -f_c - f_k \quad (17)$$

tai

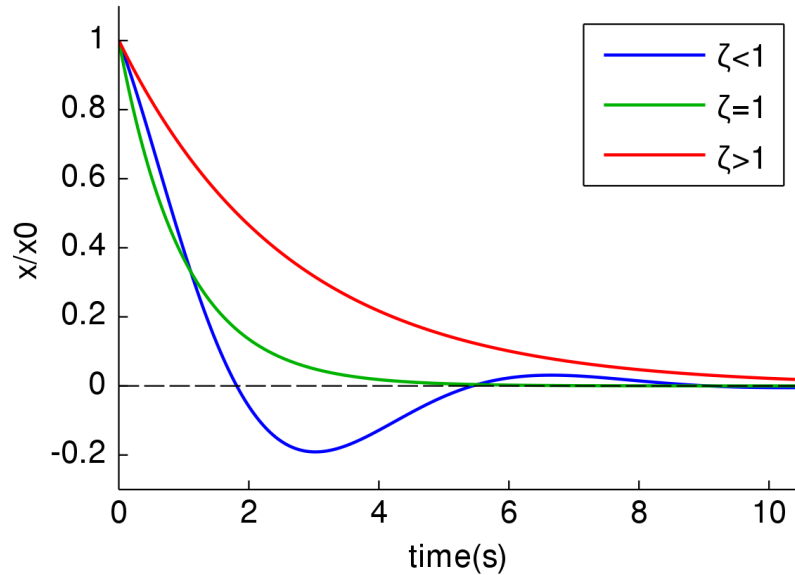
$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (18)$$

Yllä olevan yhtälön 18 ratkaisu riippuu vaimennuksen määrästä. Jos systeemi on alivaimennettu, se värähtelee tietyn aikaa mutta lopulta saavuttaa tasapainoasemansa. Jos systeemi on ylivaimennettu, se ei värähtele. Kriittisesti vaimennettu systeemi, jolle $\delta = \omega_0$, palaa tasapainoasemaansa nopeimmin [16, s. 224]. Kuvassa 13 on esitetty alivaimennetun, ylivaimennetun ja kriittisesti vaimennetun systeemin värähtely.



Kuva 12. Vaimennettu jousimassa systeemi [17].

Voimat f_c ja f_k ovat negatiivisia yhtälössä 17, koska ne vastustavat liikettä (positiivinen alas).



Kuva 13. Kuvassa punaisella ylivaimennettu, vihreällä kriittisesti vaimennettu, ja sinisellä alivaimennettu systeemi [18].

Määritellään vaimennuskerroin

$$\delta = \frac{c}{2m} \quad (19)$$

joka kuvaa värähtelyn vaimenemisnopeutta. Vaimenemiskertoimen yksikkö on

$$[\delta] = \frac{[c]}{[m]} = \frac{\frac{kg}{s}}{kg} = \frac{1}{s} \quad (20)$$

Värähtelevän liikkeen luonne riippuu siitä, kuinka suuri vaimennuskerroin on vaimenemattoman värähtelijän ominaiskulmataajuuteen $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, verrattuna.

Kriittisen vaimennuksen (c_{cr}) saavuttamiseen tarvittava vaimennuskerroin saadaan seuraavalla kaavalla

$$c_{cr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} \quad (21)$$

Systeemissä olevan vaimennuksen määrittelemiseksi käytetään termiä vaimennussuhde, ζ , jolla tarkoitetaan vaimennuksen määrää systeemissä suhteessa kriittisen vaimennuksen saavuttamiseen tarvittavaan määrään systeemissä. Vaimennussuhde voidaan laskea kaavalla

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (22)$$

[11, s. 20 - 22.]

2.2.5 Pakkovärähtely ja resonointi

Pakkovoima on ulkoinen voima, joka kohdistuu systeemiin ja saa sen värähtelemään. Jaksollisesti muuttuvan pakkovoiman perusmalli on sinimuotoisesti vaihteleva voima

$$F(t) = \hat{F} \sin \omega t \quad (23)$$

jossa \hat{F} on pakkovoiman huippuarvo ja ω on voiman kulmataajuus. Kulmataajuus kertoo voiman vaihtelun nopeuden. Se ei välttämättä ole yhtä suuri kuin systeemin ominaiskulmataajuus. [16, s. 225.]

Vaimennetussa systeemissä vaikuttavat voimat ovat nyt sinimuotoinen pakkovoima \bar{F} , väliaineen vastus ja jousivoima. Newtonin toisen lain mukaan sinimuotoinen pakkovärähtely tapahtuu pakkovoiman kulmataajuudella ω . Voiman ja värähtelyn taajuus on $f = \frac{\omega}{2\pi}$. Värähtelyn amplitudi on

$$\hat{x} = \frac{\hat{F}}{m\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}} \quad (24)$$

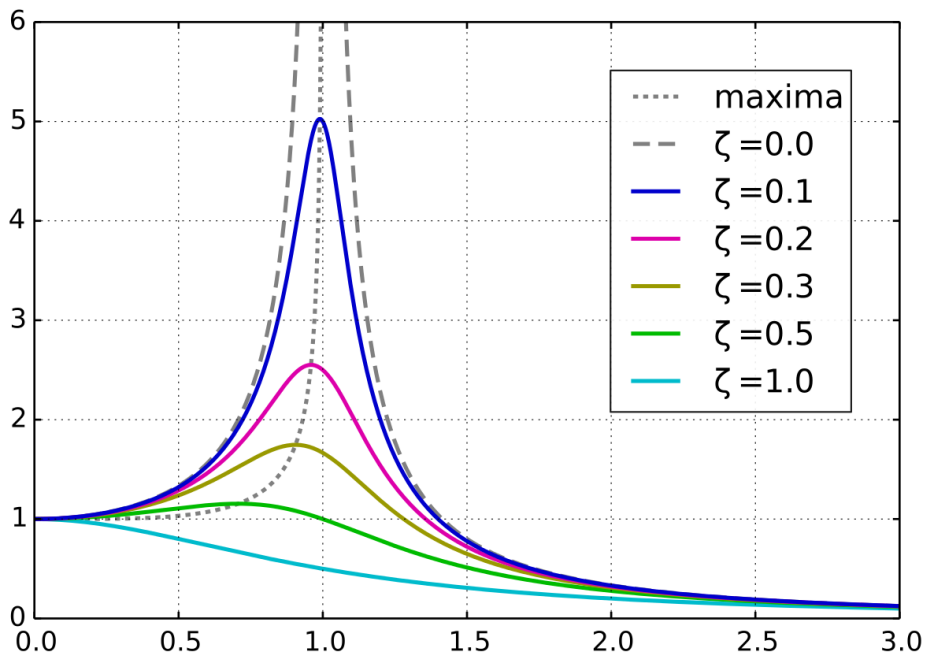
jossa m on massa, ω_0 vaimenemattoman systeemin ominaiskulmataajuus ja δ vaimennuskerroin. Nopeuden huippuarvon kaava on

$$\hat{v} = \frac{F}{m\sqrt{\frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^2}{\omega^2} + 4\delta^2}} \quad (25)$$

Kuvassa 14 esitettävät resonanssikäyrät kuvaavat värähtelyn amplitudia pakkovoiman taajuuden funktiona. Kun pakkovoiman taajuus on lähellä vaimenemattoman systeemin ominaistajuutta $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, värähtelyn amplitudi on suurimmillaan. Tällöin systeemi on amplitudiresonanssissa. Amplitudiresonanssia vastaavan resonanssitaajuuden tarkka arvo on

$$f_{res} = \sqrt{f_0^2 - \frac{\delta^2}{2\pi^2}} \quad (26)$$

Resonanssitaajuus on hieman vaimenemattoman systeemin ominaistajuutta pienempi. [16, s. 226.]



Kuva 14. Värähtelyn amplitudi pakkovoiman taajuuden funktiona suhteessa vaimennukseen [19].

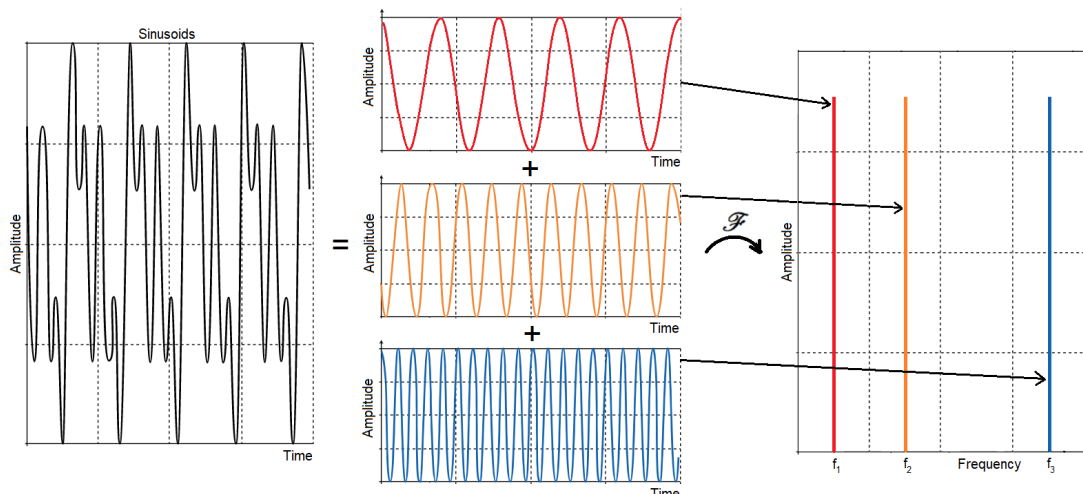
Systemi on nopeusresonanssissa eli nopeuden huippuarvo on suurimmillaan, kun pakkovoiman taajuus on yhtä suuri kuin vaimenemattoman värähtelijän ominaistaajuus. Nopeusresonanssia vastaava resonanssitaajuus on siis

$$f_{res} = f_0 \quad (27)$$

Resonanssi tarkoittaa tilannetta, jolloin systeemin värähtelyn amplitudi kasvaa suureksi ulkoisen pakotteen taajuuden ollessa lähellä systeemin ominaistaajuutta. [16, s. 226.]

2.3 FFT-analysointi

FFT (Fast Fourier Transform) eli suomeksi nopea Fourier-muunnos on yksi signaalinkäsittelyn käytetyimmistä työkaluista. FFT-muunnoksella muutetaan signaali aikatasosta taajuustasoon. FFT-analyysiä käyttämällä voidaan signaalin ominaisuuksia tutkia ja hyödyntää laajemmin kuin vain aikatasoa tutkimalla. Taajuustasossa signaalin ominaisuuksia kuvaavat yksittäiset taajuuskomponentit, kun taas aikatasossa sitä kuvaa yksi aaltomuoto, joka sisältää kaikkien komponenttien summan. Kuvassa 15 voidaan nähdä aikatasossa olevan signaalin koostuvan eri taajuudellisista sinimuotoisista komponenteista, ja miten ne voidaan esittää taajuustasossa. [20.]



Kuva 15. Signaalin muutos aikatasosta taajuustasoon [20].

2.3.1 Käyttökohteet

Datan tutkiminen taajuustasossa on usein keskeisin osa signaalien analysointia ja tarkkailua. Lähestulkoon kaikilla aloilla käytetään jonkinlaista dataa erilaisilta sensoreilta ratkaisemaan erilaisia ongelmia ja auttamaan laitteiden suunnittelussa, esimerkiksi

- kunnonvalvonnassa
- rakenteiden dynaamisessa analyysissä
- kestävyys- ja väsymisanalyyseissä
- pyörivien koneiden, laakeri- ja kiertoanalyyseissä
- palamisanalyyseissä
- ihmiskehon värinätesteissä
- huoneiden akustiikassa, kaiuttimien suunnittelussa ja ympäristömelun analysoinnissa
- mekaanisissa isku- tai pudotustesteissä.

Esimerkiksi pyörivien sähkömoottoreiden diagnosoinnissa voidaan eri komponentit laitteesta tunnistaa niiden taajuuden perusteella. Muuttamalla spektrin amplituditasoja ajansuhteen voidaan nähdä suoraan, missä kunnossa yksittäiset osat, kuten rattaat tai laakerit, ovat ja milloin niitä täytyy huoltaa. [20.]

Kovaäänisissä ympäristöissä FFT-analyysillä voidaan mitata äänenpainetta. Kriittisten taajuusalueiden ja voimakkaiden tonaalisten komponenttien löytäminen äänestä auttaa insinöörejä suunnittelemaan vaimentimia. Kuvassa 16 on esimerkki äänenpaineen signaalista taajuustason spektrissä, joka on mitattu

meluisassa ympäristössä. Spektristä nähdään voimakkaat tonaaliset komponentit ja tietyt taajuudet. [20.]



Kuva 16. Äänenpaineen signaali taajuustasossa [20].

Kun komponenteilla ja laitteilla tehdään värähtelymittauksia, FFT-analyysi mahdollistaa laitteiden tutkimisen tietyillä taajuuksilla. Taajuusspektri voi auttaa suunnittelussa sekä taipuman määrittelyssä. FFT-spektriä voidaan myös käyttää värähtelyalueen raja-arvojen määrittelyyn kunnonvalvonnassa, jolloin käyttäjää varoitetaan, jos värähtely ylittää annetut arvot tai esimerkiksi automatisoitu logiikka pysäyttää koko koneen toiminnan. [20.]

2.3.2 FFT-muunnos

Varsinainen nopea Fourierin muunnos tarkoittaa algoritmia, jolla voidaan laskea diskreetti Fourierin muunnos ja sen käänteismuunnos. Algoritmi hetkelliselle kompleksille FFT-spektrille perustuu diskreettiin Fourierin muunnokseen, joka voidaan esittää matemaattisesti:

$$A/(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(t_n) e^{-i \frac{2\pi kn}{N}} \quad (13)$$

jossa t_n on diskreetit aikanäytteet, f_k on diskreetit taajuusnäytteet, N on näytteiden määrä ja $1/N$ on normalisointikerroin.

Hetkellisen tehospeskrin ja ristitehospeskrin laskeminen hetkellisestä FFT-spektristä $A(f)$ ja $B(f)$ tapahtuu seuraavasti:

FFT-spektrissä on amplitudi- sekä vaihearvo jokaiselle taajuuskomponentille, jotka voidaan esittää koordinaatteina:

$$A(f) = |A(f)|e^{i\theta_A(f)}, B(f) = |B(f)|e^{i\theta_B(f)} \in \mathbb{C} \quad (14)$$

Tehospektri ja ristitehospetri lasketaan sitten kahden FFT-spektrin geometrisena tulona:

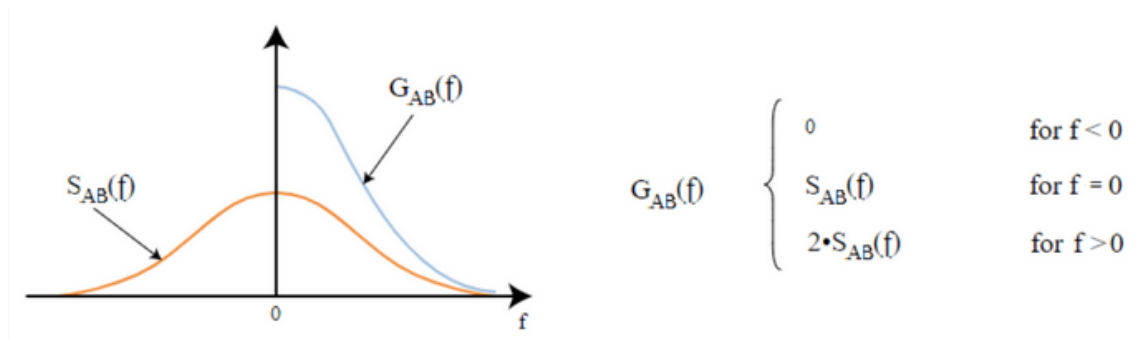
$$S_{AA}(f) = A * (f) * A(f) = |A(f)| * |A(f)|e^{i(\theta_A(f)-\theta_A(f))} = |A(f)|^2 \in \mathbb{R} \quad (15)$$

$$S_{AB}(f) = A * (f) * B(f) = |A(f)| * |B(f)|e^{i(\theta_B(f)-\theta_A(f))} \in \mathbb{C} \quad (16)$$

Lopputuloksen amplitudi on kahden FFT spektrin amplitudien tuotos, ja vaihe on kahden FFT-spektrin vaihe-ero. Nämä tehospeskrin keskiarvotetaan tietyllä määrällä tai tietyllä aikavälillä. [20.]

S-merkintää käytetään usein kuvaamaan kaksipuolista tehospeskrin alkuperäisen kompleksi FFT-spektrin muodossa. Kaksipuolisessa muodossa taajuusakseli skaalautuu välillä $-f_N$ ja f_N , jossa f_N on Nyquistin taajuus. Nyquistin teoreeman mukaan signaalista on otettava näytteitä kaksinkertaisella taajuudella alkuperäisen signaalin suurimpaan taajuuteen nähden, jotta näytteestä voidaan luoda alkuperäistä vastaava signaali. [20.]

Yleisesti käytetään yksipuolista spektriä, jota kuvataan tunnuksella G, joka määritellään alla olevan kuvan 17 mukaisesti.



Kuva 17. Yksipuolisen G-spektrin ja kaksipuolisen S-spektrin ero. [20].

Viimeiseksi voidaan saada yksipuolinen tehospektri ja ristitehospektri. Nämä spektrit saadaan yleensä suoraan FFT-analyyseriohjelmistolla, esimerkiksi Dewesoftin FFT analyzer -työkalulla. [20.]

2.4 Värähtelymittaukset kunnonvalvonnassa

Värähtelymittausten tarkoitus kunnonvalvonnassa on tuottaa tietoa koneen käyttökunnosta, jotta tarvittavia toimenpiteitä käyttökunnon ylläpitämiseksi voidaan tehdä ennakkoon. Oleellista kunnonvalvonnassa on koneen värähtelyspektrin vertailu käyttöajan suhteen. Kunnonvalvonta perustuu värähtelymittausten vertailuun keskenään eri ajanhetkinä, jotta mahdolliset muutokset värähtelyssä olisivat selkeästi nähtävissä. [21, s. 4.]

Erilaisia muutoksia systeemin värähtelyssä voivat aiheuttaa muun muassa muutokset koneen tasapainossa, muutokset laitteen linjauksessa, liuku- tai vierintälaakerin kuluminen sekä vikaantuminen, kytkimen tai vaihteen viat, halkeamat kriittisissä koneenosissa, käytöstä johtuvat transientit, nestevirtauksen häiriöt hydraulisissa koneissa, transienttiherätteet sähkökoneissa, hankaus tai mekaaninen väljyys. [21, s. 4.]

Värähtelymittauksilla kunnonvalvonnassa voidaan tuottaa tietoa muun muassa laitteen suojauksen lisäämiseen, henkilöturvallisuuden parantamiseen, kunnossapitokäytäntöjen parantamiseen, ongelmien havaitsemiseen aikaisessa vaiheessa, katastrofaalisten vikojen estämiseen, koneen eliniän pidentämiseen ja yleiseen käytön kohentamiseen. [21, s. 4.]

Värähtelymittauksia voidaan toteuttaa yksinkertaisista mittauksista aina erittäin monimutkaisiinkin riippuen kohteesta ja sen kunnonvalvonnan kriittisyydestä. Mittaukset käsittävät jatkuvia mittauksia sekä jaksollisia mittauksia; molempien tarkoituksena on kuitenkin määrittää koneen kunto tarkasti ja luotettavasti. [21, s. 4.]

Kunnonvalvonnan värähtelymittauksiin löytyy eri standardeja, yleisesti käytettyjä ISO-standardeja sekä esimerkiksi PSK-standardeja, joita käyttävät Suomessa useat yritykset. Tässä opinnäytetyössä on käytetty lähteenä sekä ISO- että PSK-standardeja.

2.4.1 Värähtelytilan valvonta

Värähtelyvalvontaa suoritetaan auttamaan koneen kunnon arvioinnissa pitkäaikaisen käytön aikana. Koneen tyypistä sekä koneen kriittisistä osista riippuen on valittava yksi tai useampi mittausparametri ja soveltuva valvontajärjestelmä. Tarkoituksena on havaita epänormaalityytila ajoissa, jolloin laitteelle voidaan tehdä korjaukset ennen kuin mahdolliset viat kasvavat merkittäviksi. Valvontajärjestelmiä on useita erilaisia, kiinteitä, puolikiinteitä tai kannettavia mittalaitteita. Käytettävä valvontajärjestelmä riippuu useista eri tekijöistä valvottavassa järjestelmässä muun muassa koneen toiminnan kriittisyydestä, seisokkikustannuksista, katastrofaalisen vian kustannuksista, koneen kustannuksista, vikaantumismuodon kehittymisnopeudesta, kunnossapidon luokse päästävydestä, mittauspaikkojen luokse päästävydestä, mittausjärjestelmän laadukkuudesta, valvontajärjestelmän kustannuksista, turvallisuudesta ja ympäristötekijöistä. [21, s. 6 - 7.]

Datan keräämisessä käytetään kahta eri tyyppiä, jatkuvaa tiedonkeruuta ja jaksollista tiedonkeruuta. Jatkuvassa tiedonkeruussa värähtelyanturit ovat kiinteästi asennettuja mitattavaan kohteeseen, ja näiltä saatavaa mittausdataa tallennetaan koko ajan koneen käydessä. Jatkuvassa tiedonkeruussa on mahdollista hyödyntää esimerkiksi hälytysjärjestelmää, jolloin järjestelmä ilmoittaa käyttäjälle asetettujen raja-arvojen ylityksistä tai alituksista. Tällaisen hälytysjärjestelmän voi myös automatisoida ja liittää esimerkiksi osaksi logiikkapiiriä, jolloin

raja-arvojen ylittyessä logiikka pysäyttää laitteen. Jaksollisessa tiedonkeruussa nimensä mukaisesti dataa haetaan tietyin ajoin antureilta; myös tällainen järjestelmä voidaan rakentaa täysin automaattiseksi tai manuaalisesti käytettäväksi. [21, s. 8 - 9.]

Valvottavat suureet riippuvat koneen rakenteesta, mittaustekniikasta sekä ennakoitavista vikatyypeistä. Valvontasuureina käytetään siirtymää, nopeutta ja kiihtyvyyttä. Tärinänvalvonnassa käytetään useimmiten nopeutta. Matalataajuisista, alle 10 Hz:n värähtelyä, valvotaan usein siirtymänä. Kun ylärajataajuus on yli 1 kHz, suositellaan kiihtyvyyden valvontaa. Liukulaakeroitujen koneiden akselivärähtelyä valvotaan siirtymänä. [22, s. 67.]

Erilaisia valvontatekniikoita on useita: kokonaistasovalvonta, tunnuslukuvalvonta, aikatasovalvonta, spektrivalvonta, verhoikäyrävalvonta, vektorivalvonta, profiilivalvonta, korkeataajuiset valvontamenetelmät (akustinen emissio, iskusysäys, ultraääni) sekä kepstrivalvonta. Tämän insinööriyön mitattavassa kohteessa näistä hyödynnetään jossain muodossa seuraavia valvontamenetelmiä:

- aikatasovalvontaa, joka tarkoittaa näytteen muodon vertailua referenssimittauksiin
- spektrivalvontaa, joka tarkoittaa mitatun spektrin vertailua aiemmista mittauksista muodostettuihin spektreihin. [22, s. 67 - 72.]

2.4.2 Mittaussuureet

Värähtelymittauksissa käytetään suureina lineaarista tai kulmasiirtymää, nopeutta tai kiihtyvyyttä. Paikallaan pysyvistä koneen osista mitattuna suositeltava suure on värähtelynopeus. Pyörivien osien suhteellisen aseman ja liikkeen valvomiseen suositellaan siirtymää. Vierintälaakereissa ja vaiheissa viat ilmenevät korkeilla taajuuksilla, minkä vuoksi niihin suositellaan kiihtyvyyttä mittaussuureeksi. [21, s. 18.]

Mittauksen voimakkuusalueen asteikko valitaan joko kokemuksen perusteella tai valvottavan koneen arviointiin sovellettavien kriteerien pohjalta niin, että matalin sekä korkein oletettu amplitudi tulevat katetuiksi. Mittauslaitteistoin oma kohina saisi olla vähintään 10 dB alle tai yhden kolmasosan matalimmasta mitattusta värähtelyarvosta, samalla kuitenkin varmistuen, että järjestelmä pystyy käsittelemään myös signaaleja, jotka ovat vähintään 10 dB korkeampia kuin voimakkain odotettavissa oleva signaali. [21, s. 18.]

Taajuusalueen on oltava riittävän laaja, jotta mittalaite kattaa akselin pyörimistaajuuden ja sen monikertojen lisäksi myös muiden komponenttien, kuten laakereiden, aiheuttamat taajuudet. Mitattava taajuusalue tulee valita valvottavan kohteen mukaisesti mahdollisuuksien mukaan, mutta se ei saa normaalisti olla suurempi kuin anturin suurin lineaarinen alue. Järjestelmän lineaarisen taajuusalueen tulisi kattaa taajuudet aina 0,2 kertaa matalimmasta pyörimistaajuudesta korkeimpaan kiinnostavaan herätetaajuuteen saakka, joka on yleensä pyörimistaajuus kerrottuna hampaiden, siipien tms. määrällä. Mekaanisessa soveltamisessa 10 kHz on riittävä ylätaajuus. Erittäin korkeataajuisien signaalien käsittelyssä, esimerkiksi vaihteiden ja vierintälaakereiden tapauksessa, 10 kHz:n raja-arvoa voidaan kuitenkin korottaa jopa anturivalmistajan suositteleman lineaarisen käyttöalueen yläpuolelle. Niistä voidaan saada arvokasta informaatiota, vaikkakin korkeataajuisien signaalien amplitudien tarkkuus kärsii. [21, s. 18 - 19.]

Vaihekulma ilmaisee sinimuotoisen värähtelysignaalin kulma- tai aikaeroa toiseen signaaliin tai värähtelysignaalia kiinteään referenssiin. Vaihejättämää käytetään yleisesti kunnonvalvonnassa. Vaihejättämä vastaa esimerkiksi aikavivettä akselilla olevan referenssikodan ja värähtelysignaalin maksimin tai nolla-arvon välillä. Mitä tahansa etäjatkuvuuskohtaa, joka ilmestyy vain kerran kierroksessa ja aikaansaa erottuvan signaalin, voidaan käyttää pysyvänä vaihereferenssinä. [21, s. 19.]

Mittaustarkkuus ja toistettavuus ovat keskeisessä osassa kunnonvalvontaa. Mittaustyyppinä on kahta erilaista, joiden mittauksilla on 5 % ja 10 % sallittu toleranssi kalibrointiherkkyydelle vaaditulla mittauksen amplitudi- ja taajuusalueella. Tärkeää on myös datan toistettavuus. Data tulisi kerätä samalla laitteistolla, samoilla kiinnitystavoilla, herkkyyksillä sekä kalibroinnilla. Muutoin signaalien vertailu ja trendaus saattavat olla harhaanjohtavia. [21, s. 19.]

2.4.3 Anturit

Kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa on käytössä kaksi erilaista anturien perustyyppiä: seismiset laitteet, jotka yleensä kiinnitetään laitteen rakenteeseen ja joiden ulostulo mittaa rakenteen absoluuttista värähtelyä sekä suhteellisen siirtymän anturit, jotka mittaavat värähtelyn siirtymää ja keskimääräistä asemaa koneen pyörivien ja ei pyörivien osien välillä. Myös venymäliuskoilla on mahdollista mitata koneen kuntoa, joskin kunnonvalvonnassa näitä harvoin käytetään. [21, s. 20.]

Käytettävän anturin valinta riippuu mitattavasta kohteesta. Kunnonvalvonnassa on yleensä käytössä kolmea erilaista anturia:

- kiihtyvyyssanturi, josta voidaan saada ulos kolme parametria (kiihtyvyys, nopeus ja siirtymä)
 - nopeusanturi, jonka ulostulon voi integroida siirtymäksi.
 - kosketukseton anturi, jonka ulostulo on suoraan verrannollinen suhteelliseen siirtymään koneen pyörivien ja paikallaan pysyvien osien välillä.
- [21, s. 20 - 21.]

Tässä työssä käytetään kiihtyvyyssanturia (kuva 18). Kiihtyvyyssanturi kuuluu seismisiin laitteisiin. Anturi tuottaa mittauskohteen mekaaniseen värähtelykiihtyvyyteen verrannollisen ulostulosignaalin. Kiihtyvyyssanturi kiinnitetään yleensä paikallaan pysyvään rakenteeseen koneessa. Käytettävän kiihtyvyyssanturin lineaarisen alueen tulisi kattaa koko mielenkiinnon kohteena oleva taajuusalue,

ja antureita onkin saatavilla useilla resonanssitaajuuksilla, tyypillisesti 1 kHz:stä ylöspäin. Yleisesti kunnonvalvonnassa käytettävien kiihtyvyyssantureiden taajuusalue on 0,1 Hz - 30 kHz ja massa 10 - 200 g. Kiihtyvyyssantureille ominaista on laaja dynaaminen alue ($1 - 10^6$) ja leveä taajuusalue. Niitä suositellaan käytettäväksi laitteissa, joissa on pieni kiinnitysalue, korkeissa ympäristölämpötiloissa ja voimakkaissa magneettikentissä. [21, s. 21 - 22.]

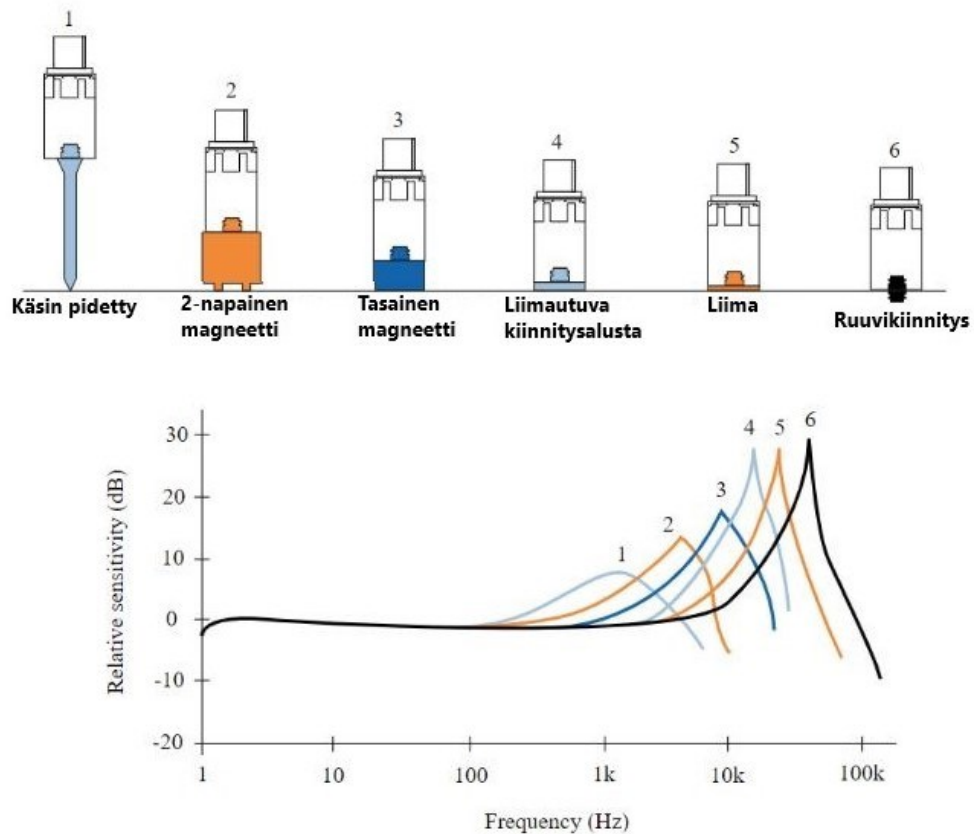


Kuva 18. Kiihtyvyyssanturi, jonka taajuusalue on 0,5 Hz - 10 kHz ja herkkyys 1 mV/ms² - 100 mV/ms² [23].

Koska mastossa olevat vierintälaakerit pyörivät suhteellisen hitaalla nopeudella (n. 20 - 45 rpm) on niistä tulevan herätteen taajuus sekä amplitudi alhainen. Tästä syystä myös em. kosketukseton anturi olisi hyvä vaihtoehto mittauksiin, mutta tässä sovelluksessa anturin haastava sijoittaminen laakerille käänsi valinnan kiihtyvyyssanturiin.

Riippuen systeemistä ja sovelluksesta anturin kiinnityksellä on merkittävä rooli saaduissa tuloksissa. Toisissa sovelluksissa voi riittää, että anturia on pidetty käsin paikallaan mittauksessa. Toisissa taas on välttämätöntä käyttää kiinteää asennusta anturille, millä saadaan paras siirtyvyys systeemin värähtelystä anturille. Anturit voidaan liittää kohteeseen kiinteästi esimerkiksi ruuvaamalla, jolloin korkeataajuisien signaalien häviöt jäävät pieniksi tai jopa olemattomiksi. Kiinteäksi asennukseksi lasketaan myös liimaus ja magneettikiinnitys, mutta näillä saattaa olla rajoituksia taajuuden, lämpötilan ja amplitudin suhteen sovelluksessa. Eri kiinnitysmenetelmiä on monia, ja oikea kiinnitystapa tulee aina valita

sovelluksen kriittisyyden ja odotettavien taajuuksien mukaan [21, s. 24.] Mittalaittevalmistaja Dewesoft havainnollistaa kiinnitystapojen eroavaisuuksia kuvassa 19.



Kuva 19. Eroavaisuudet taajuusalueella eri kiinnitystavoilla [24].

2.5 Mekaaninen kestävyystestaus

Valmistajien tuotteiden, joita käytetään paljon ja laaja-alaisesti, tulisi kestää ideaalitulanteessa monia vuosia ilman huolia hajoamisesta tai kriittisistä vaurioista. Tuotteiden mekaanisen kestävyys testaus on olennainen osa tuotteiden tuotekehitys vaihetta, jotta tuotteen ideaalisesta toiminnasta ja suorituskyvystä voidaan varmistua. Sovelletut fyysiset voimat ja rasitukset voivat tuoda esiin tuotteen heikkoudet ja estää hajoamiset jo aikaisessa vaiheessa tuotekehitystä. Mekaanista kestävyystestaus vaaditaan tällaisten tuotteiden tuotekehityksessä, jotta voidaan varmistaa niiden turvallisuus ja toiminta erilaisissa äärimmäisissä tilanteissa tuotteen elinkaaren aikana. [1.]

Kestotestin tyyppi riippuu pitkälti kyseessä olevasta tuotteesta. Myös esimerkiksi erilaisille ohjelmistoille suoritetaan kestoprojektteja, mutta tässä insinöörityössä keskitytään mekaaniseen kestoprojektukseen. Myös mekaanisessa kestoprojektuksessa testityyppejä voi olla monia erilaisia sekä tuotteille voidaan suorittaa enemmän kuin yksi kestoprojekttesti. Joidenkin tuotteiden kestoprojekttestaus on myös standardisoitua ja on näin ollen pakollista.

Potentiaalisia ominaisuuksia, joita voidaan mitata, tai vaurioita, joita mekaanisessa kestoprojekttestauksessa voi tulla esille, ovat

- liitosten kestävyys
- taivutuslujuus ja väsymys
- veto- ja iskulujuus
- joustavuus
- materiaalin lujuus
- toiminnallisuus
- mekaaninen kuluma
- yleinen kestävyys
- elinikä [1.]

3 Kestoprojekttesti ja mittaukset

Mitsubishi Logisnext Europe Oy (ent. Rocla Oy) valmistaa ja suunnittelee sähköisiä varastotrukkeja Järvenpäässä. Luonnollisesti suunniteltuja ja valmistettuja trukkeja sekä niiden komponentteja on myös testattava. MLE Oy:n tiloissa on erillinen tuotekehitysyksikkö, jossa on oma testaustiimi. Testitiimin vastuulla

on monien erilaisten standardien vaatimien sekä myös yrityksen omien vaatimusten mukaisten testien suorittaminen ja raportointi. Yhtenä osa-alueena testeissä on yrityksen omien vaatimusten mukaiset kestopelit (endurance test), jossa yksittäinen komponentti tai useista komponenteista koostuvaa yksikköä testataan pitkäkestoisesti. Nämä kestopelit ovat usein komponenteille erittäin ankaria, sillä ne yrittävät simuloida komponentille koko sen elinaikana tulevaa rasitusta. Näin voidaan varmistua, että jokainen MLE Oy:n suunnittelema ja valmistama komponentti toimii suunnitellusti koko sen odotetun eliniän ajan.

3.1 Kohteen esittely

Tämän työn tavoitteena on kehittää MLE Oy:n mekaanista kestopelista tutkimalla, voidaanko kestopelien yhteydessä hyödyntää kunnonvalvonnan värähtelymittauksia. Kohteena on yksi MLE Oy:n automatisoiduista kestopelireistä (kuva 20).



Kuva 20. MLE Oy:n mastotesteri.

3.1.1 Kohteen osat

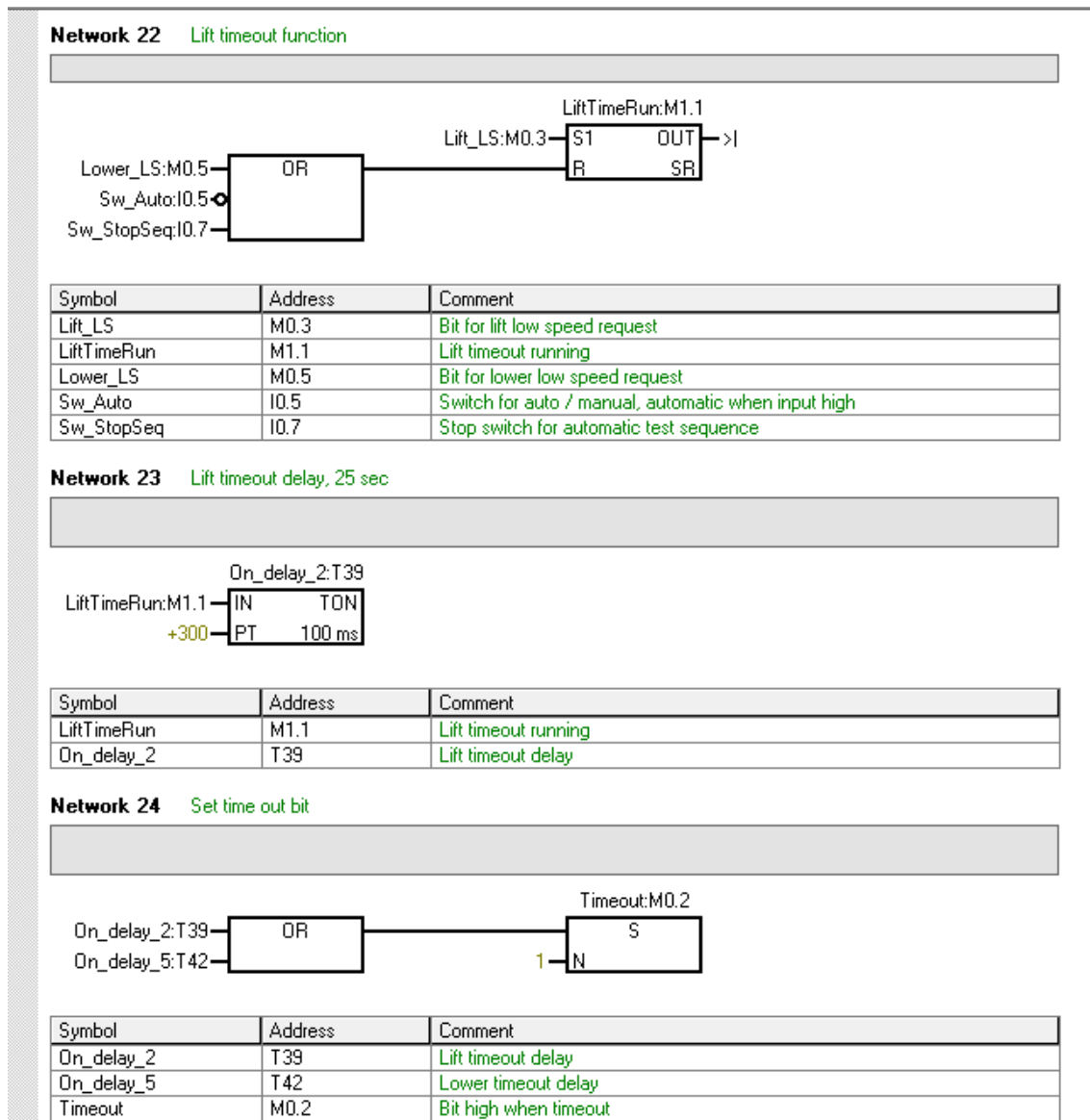
Mastotesteri on täysin automatisoitu, mutta sitä voidaan tarvittaessa ajaa myös manuaalisesti. Mastotesteri koostuu ”dummy”-trukin rungosta, itse mastosta, taakasta, logiikkakontrollerista, digitaalisista tehovahvistimista, pumppumoottorista, taajuusmuuttajasta, venttiililohkosta, siirtopumpusta ja testipedistä. Koko mastotesteriä ohjataan Siemensin ohjelmoitavalla logiikalla eli PLC:llä (kuva 21). PLC ohjaa maston liikkeitä valokennoilta tulevan tiedon avulla. Kun masto on tietyssä paikassa, esimerkiksi ala-asennossa kuten kuvassa, valokenno antaa tiedon tästä logiikkapiirille. Logiikkapiiri puolestaan tiedon perusteella ohjaa

tehovahvistimien avulla lohkoissa venttiileitä ja pumppumootoria. Järjestelmä ei ole erityisen monimutkainen, mutta kuten komponenttilistauksesta jo voi huomata, siihen kuuluu paljon eri osia.



Kuva 21. Mastotesterin sähkökaappi, kuvassa keskellä Siemensin logiikkaohjain ja ylimpänä vasemmalla Hydacin tehovahvistimet.

Logiikkaan on rakennettu myös turvaa vikojen varalta. Logiikka esimerkiksi laskee aikaa, joka mastolla kestää nostossa valokennojen avulla. Jos masto ei nouse tarpeeksi nopeasti, vikatila käynnistyy ja testeri pysähtyy (kuva 22). Tämä ei ole varsinaista kunnonvalvontaa, mutta on yleensä vihje siitä, että mastossa saattaa olla jotakin vikaa. Myös taajuusmuuttajassa on tilanvalvontatoiminnaisuus, jolla se valvoo itse pumppumoottorin taajuutta ja käyttämää virtaa.

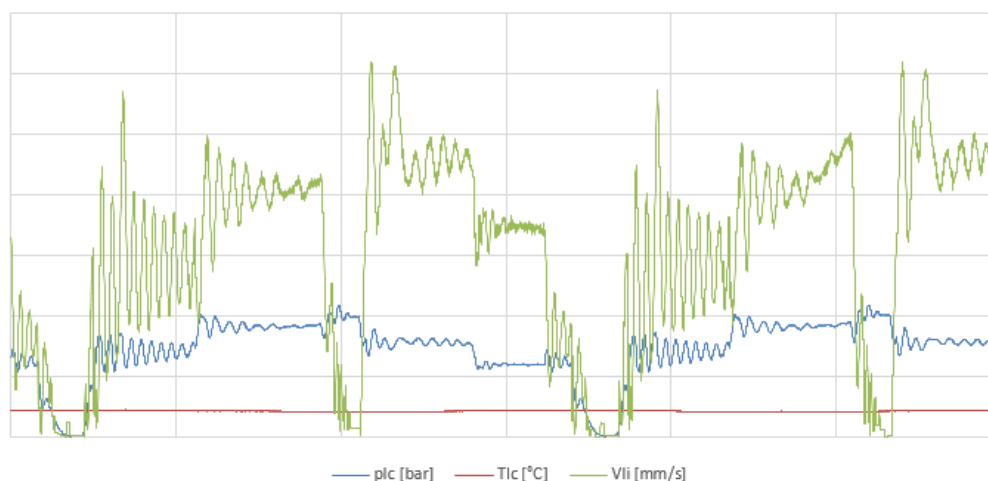


Kuva 22. Siemensin logiikkaan ohjelmoitu aikakatkaisu.

3.1.2 Testi

Varsinaiset testit, joita mastotestereillä useimmiten tehdään, ovat niin sanottuja kestotestejä, jolloin joko maston tai koneen rungon tai molempien pitkäkestoista kestävyyttä testataan. Esimerkkinä maston testauksessa syklejä ylös/alas maston maksimitaakalla voi tulla jopa 150 000. Tämä äärimmäinen rasitus simuloi lyhyessä ajassa koko maston oletetun eliniän aikana saamaa räsitystä. Testin aikana mastoa huolletaan tiettyjen syklien välein rasvaamalla esimerkiksi ketjut

ja laakerijohteet. Testistä ylläpidetään raporttia, johon kirjataan tapahtumat, syklit ja ajat sekä mittausten tulokset. Kunnonvalvontaa suoritetaan silmämääräisillä tarkistuksilla päivittäin sekä huoltojen yhteydessä mittaamalla ketjujen venymä. Silmämääräisessä tarkastuksessa havainnoidaan halkeamia ja murtumia, epänormaalia kulumaa ja lohkeilua, öljyvuotoja, löysiä pultteja tai mutteita, deformaatiota, ketjun kireyttä, ketjun murtumia tai ruostetta, epänormaalia kulumaa tai vaurioita letkuissa. Jos merkittäviä tai tarkkailtavia kohtia löytyy, ne valokuvataan vertailua varten. Erikseen määriteltujen syklien välein tehdään myös isompia mittauksia (kuva 23), mitataan esimerkiksi sylinteripaine, hydraulioiljyn lämpötila ja maston nopeus. Näiden testien tuloksista voidaan havainnoida muutoksia maston suorituskyvyssä, mutta varsinainen kunto jää tulkinanvaraiseksi. Tarkoituksena onkin selvittää, olisiko hyödyllistä lisätä kestopestiin myös kunnonvalvonnan värähtelymittauksia joko jaksollisilla mittauksilla tai jatkuvalla valvonnalla, joka olisi liitetty logiikkapiiriin.



Kuva 23. Paineen, lämpötilan ja mastonnopeuden mittaus.

3.2 Rasitukset

Mastotesterille kohdistuu useita kuormituksia testin aikana. Suurin ero normaaliin käyttöön on testerin jatkuva toiminta, ja tästä syystä komponentit käyvät lämpöisempinä kuin todellisessa käytössä, jossa masto lepää suoritusten välissä. Kuten todettu, on kestopesti äärimmäisen rankka mastolle samoin kuin rungolle.

Vierintälaakerit rasittuvat jatkuvasta liikkeestä, jolloin ne käyvät normaalia käyttöä lämpöisempinä, mikä voi johtaa ennenaikaiseen hajoamiseen. Myös mastossa olevat letkut ja ketjut ovat kovilla jatkuvan liikkeen tuottaman lämmön johdosta.

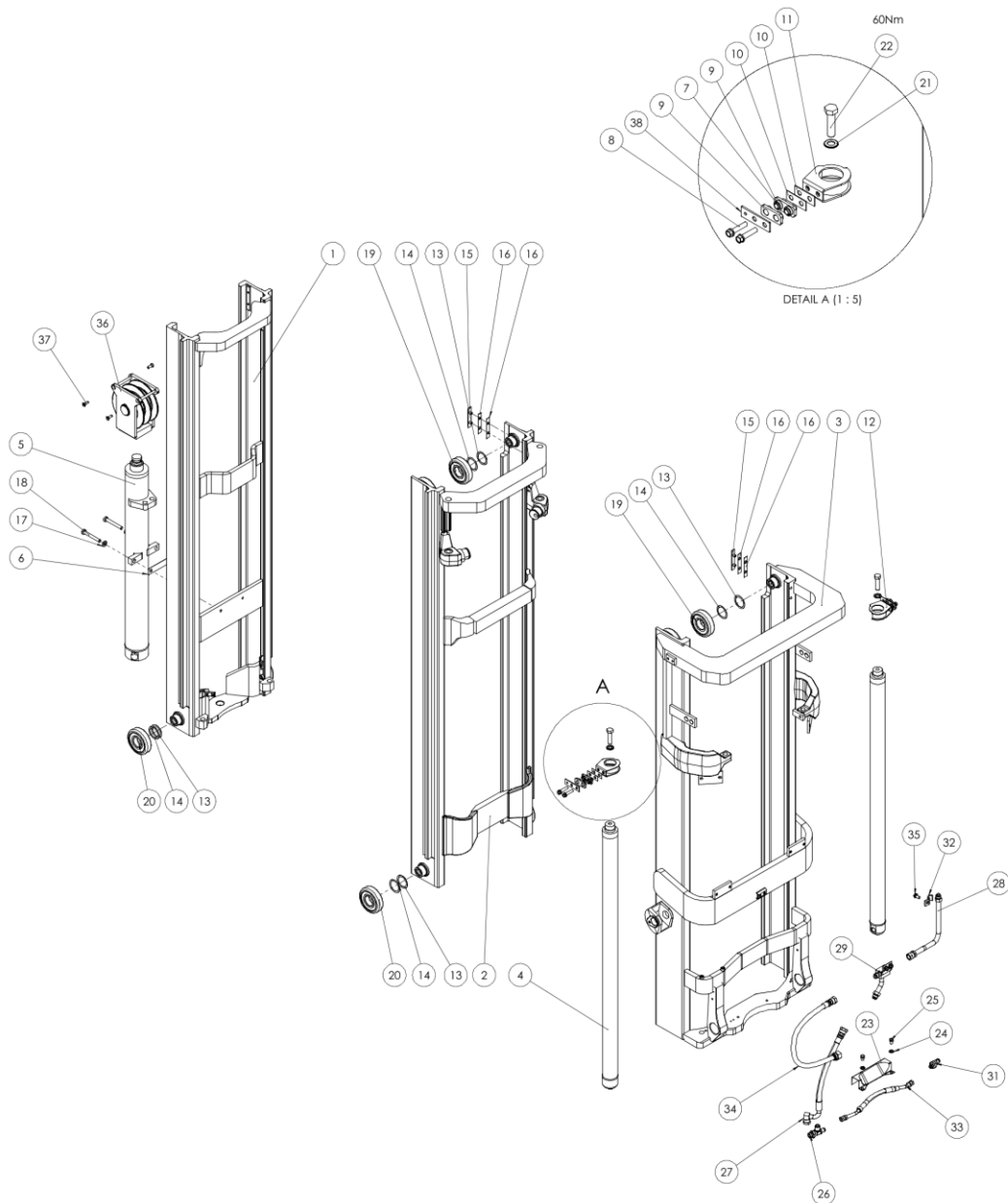
Oman kokemuksen mukaan mastojen testauksessa ei ole mitään yhtä aina hajoavaa osaa, jota olisi helppo tutkia. On helppo havainnoida, mihin rasitukset kohdistuvat, esimerkiksi laakerit, letkurullat, ketjut, sylintereiden tiivisteet yms., mutta näiden perusteella ei pysty sanomaan, mikä osa mastossa tulee hajoamaan, jos mikään.

Silmämääräisellä tarkistuksella on myös hyvin vaikea havainnoida sellaisten laakereiden tai muiden osien kuntoa, jotka eivät ole maston pinnalle kiinnitetyjä. Esimerkiksi maston johteessa kulkevan vierintälaakerin hajoamisesta saatava ensimmäinen vihje on vaikkapa tästä irronnut pölysuoja; tässä vaiheessa kuitenkin laakerin vierintäelementtien pidike on todellisuudessa jo täysin tuhoutunut. Kunnonvalvonnan värähtelymittauksilla voisi olla merkittävä rooli tiedon saannissa jo paljon ennen tällaista tapahtumaa.

3.3 Masto ja laakeri

3.3.1 Mitattava masto

Mittauksissa käytettävä masto (kuva 24) koostuu kolmesta "mastokepistä" eli rungosta, jotka on liitetty toisiinsa. Uloin runko (osa 3) on kiinni trukin rungossa, keskimäinen runko (osa 2) on kiinnitetty uloimpaan, ja sisin runko (osa 1) on kiinni keskimäisessä. Mastossa on kolme sylinteriä, yksi vapaanostosylinteri keskellä (osa 5) ja yksi pääsylinteri sivulla molemmalla puolella (osa 4). Maston kapasiteetti on 3500 kg ja nostokorkeus 5000 mm.

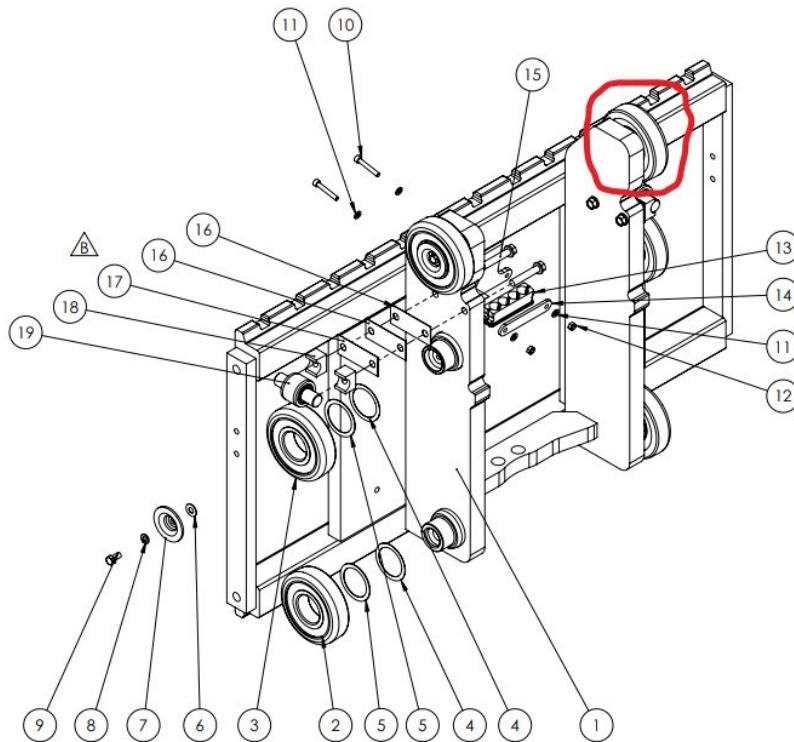


Kuva 24. Maston komponenttilista.

3.3.2 Mitattava laakeri

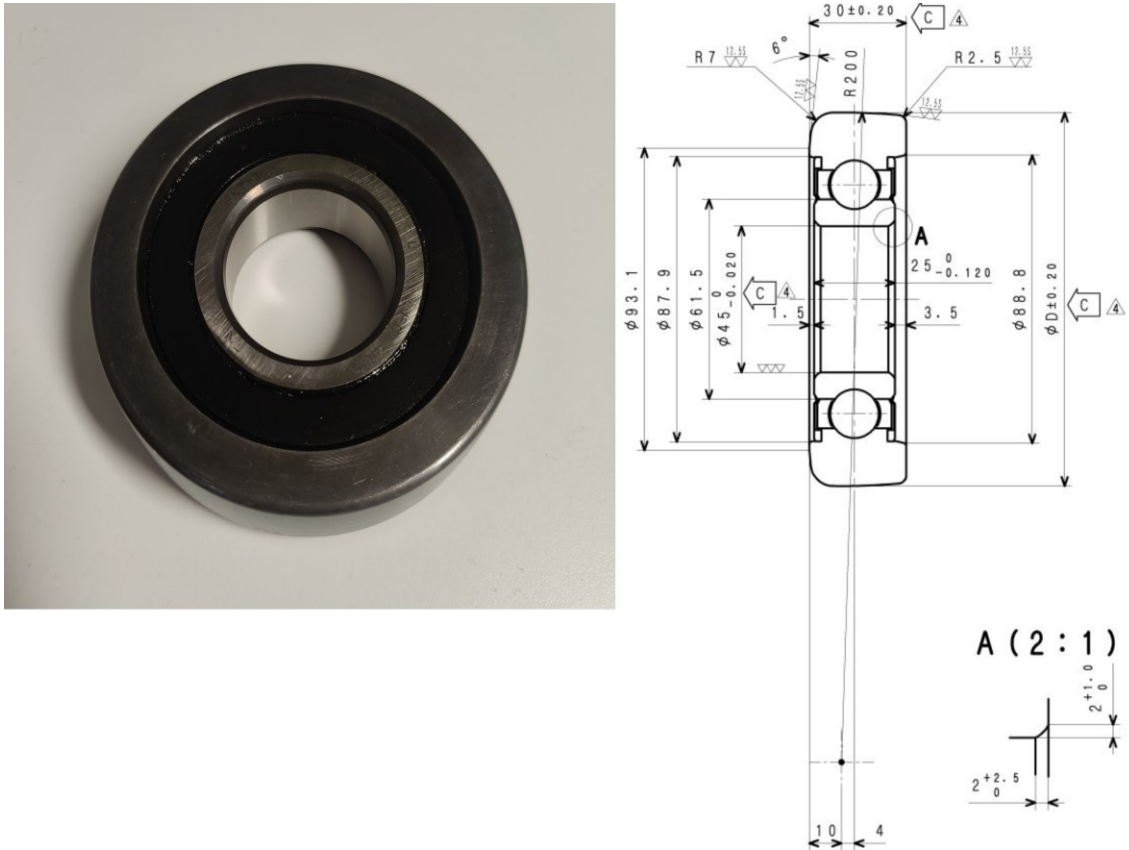
Työssä mitataan varsinaisesti koko maston värähtelyä, sillä systeemin rakenteesta johtuen yhden laakerin mittaaminen olisi mahdotonta. Tarkoituksena on kuitenkin yrittää saada yhden laakerin erilaiset vaurio-tilanteet näkyviin koko maston värähtelysignaalissa. Tarkkailtavaksi laakeriksi työssä on valittu nostokelkan ylin laakeri oikealta (kuvassa 25 oikealla ylhäällä). Laakeri tuli valituksi, sillä se ottaa vastaan suuren rasituksen, kun mastolla nostetaan taakkaa, ja se

on suhteellisen nopeasti vaihdettavissa uuteen, jolloin eri lailla vaurioituneita laakereita voidaan mitata monia.



Kuva 25. Mitattava laakeri.

Laakeri on kuulalaakeri (kuva 26), jonka halkaisija on 116 mm; toleranssi laakerille 0,2 mm. Kuulalaakereita on kehällä 8. Kuulan halkaisija on 17,462 mm ja sisäkehien välinen halkaisija 73 mm. Näitä tietoja käytettiin hyödyksi mittauksissa, varsinkin laskettaessa laakerin eri komponenttien taajuuksia.



Kuva 26. Kuulalaakeri (osa 20).

3.4 Mittalaitteisto

Datan keräämiseen käytetään DEWESoftin DEWESoft X -ohjelmistoa, jolla voi tallentaa dataa, prosessoida dataa sekä visualisoida sitä. Ohjelmassa on monia lisenssejä eri testauksen tarpeisiin; värinämittauksia varten löytyy mm. FFT-analysis, Order Tracking, Orbit analysis, Rotor balancer ja torsional vibration -moduulit. Datan keräysjärjestelmänä toimii DEWESoft SIRIUSi-8xSTG+ DAQ (Data Acquisition System). Maston nopeutta mitataan siriukseen yhdistetyllä Pepperl+Fuchsin enkooderilla, joka laskee virvelin pyörimisestä nopeutta mm/s. Virveli on kiinnitetty maston kelkkaan (kuva 25). Värähtelyn mittaamiseen käytetään saksalaisen MMF:n valmistamaa kiihtyvyyssanturia, joka voi mitata 60 g:n kiihtyvyyksiä 0,2 - 10 000 Hz:n taajuusalueella. Kiihtyvyyssanturi kiinnitetään maston runkoon tasaisella magneetilla.

3.5 Mittaussuunnitelma

Mittauksiin käytetään mastotesteriä ja liikuteltavaa värähtelymittauslaitteistoa. Mastosta mitataan referenssiarvot useasta eri kohdasta ja useaan kertaan. Valittuun laakeriin tehdään eriasteisia vaurioita ja mittaukset suoritetaan uudelleen.

3.5.1 Mittauspisteiden valinta

PSK 5702 -standardin mukaan mittauspisteen valinta absoluuttisessa mittauksessa valitaan niin, että värähtelyn lähde ja kiihtyvyyssanturi sijaitsevat mahdollisimman lähellä toisiaan mekaanisesti. Korkeataajuinen värähtely menettää osan energiastaan rajapinnan kohdatessaan. Tästä syystä on mittauspiste valittava niin, että värähtelyn lähteen ja kiihtyvyyssanturin välille jää mahdollisimman vähän rajapintoja. [25, s. 1.]

Mittauspisteet tulee merkitä pysyvillä ja yksikäsitteisillä tunnistamismerkinnöillä. Mittauspiste on kiinnityspiste mitta-anturille, joka määrittelee myös mittaussuunnan. Mittauspisteiden paikat merkitään jollain selkeästi ja helposti havaittavalla pysyvällä tavalla. [25, s. 3.]

Koska mitattavassa systeemissä tässä tapauksessa on paljon liikkuvia osia ja mitattava laakeri sijaitsee maston nostokelkassa, on optimaalisen mittauspisteen valinta haastava. PSK 5702 -standardin mukaan pyörivistä massoista värähtely siirtyy laakerien kautta runkoon, joten mittauspisteet tulisi valita laakerointikohdista. Kyseisessä systeemissä tämä ei ole kuitenkaan täysin hyödynnettävissä, sillä maston nostokelkka liikkuu lineaarisesti ylös ja alas -suuntaan eikä pyöri ja maston nostokelkka liikkuu maston johteiden välissä, jolloin kiihtyvyyssanturia ei voida asentaa suoraan laakerille. Kompromissina laakerin värähtelyä yritetään mitata sisimmästä mastorungosta, jonka johteessa laakeri pyörii, jolloin laakerin ulkokehän vaurion pitäisi näkyä värähtelynä myös ulkorungossa.

Lisäksi suoritetaan mittauksia eri puolilta maston ulointa runkoa kokonaisvärähtelyn havainnointia varten. Kuvassa 27 valitut mittauspisteet.

3.5.2 Anturin valinta

PSK 5703 -standardin mukaan on anturityyppejä valittaessa otettava huomioon sekä koneen rakenne, että komponenttien todennäköiset viat ja niiden värähtelyn taajuusalue. Yleisimpiä anturityyppejä kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa ovat kiihtyvyyden- ja siirtymäanturi sekä iskusysäysanturi. [26, s. 1.]

Anturin herkkyys tulee olla mitattavaan värähtelytasoon sopiva ja lineaarinen valvottavalla taajuusalueella. Absoluuttisen värähtelyn mittauksiin laajalla taajuusalueella käytetään kiihtyvyydenturina. Anturin valinnassa tärkeintä on ympäristöolosuhteet sekä amplitudi- ja taajuusalue. [26, s. 2.]

Anturin amplitudialue ei saa ylittyä. Jos värähtely on voimakkaampaa kuin anturin amplitudialue, on käytettävä joko mekaanista suodatinta anturin ja kiinnityspinnan välissä tai vähemmän herkkää anturia. [26, s. 2.]

Taajuusalueen on katettava kaikki valvottavat taajuudet. Jos yhdellä anturilla ei saada mitattua sekä matalia että korkeita taajuuksia, on käytettävä useampia antureita eri ominaisuuksilla. [26, s. 2.]

Mittauksiin valitun anturin herkkyys on n. 100 mV/g ja amplitudialue on ± 50 g. [27].

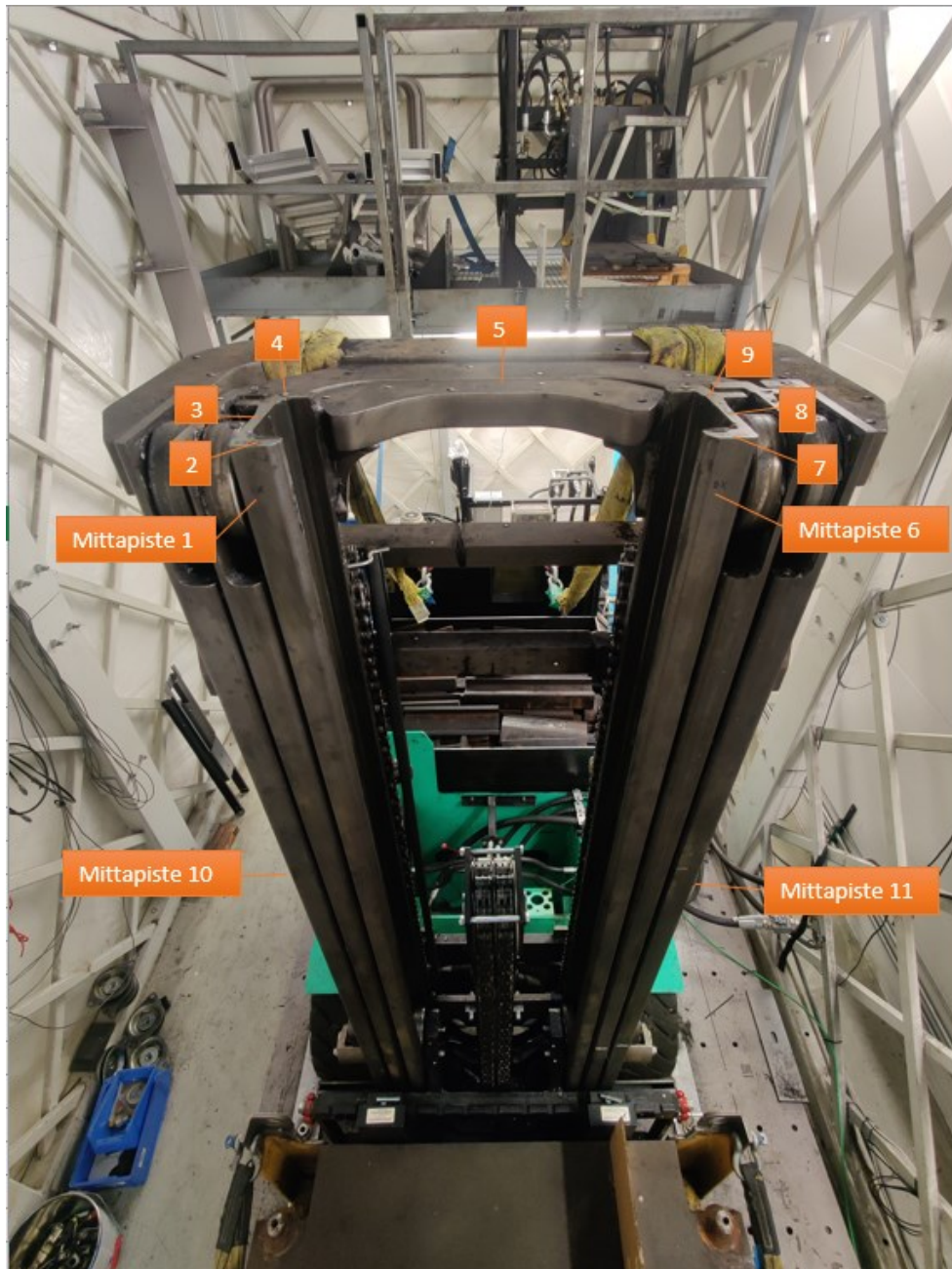
Taajuusalue on 0,2 - 10 000 Hz [27]. Anturin herkkyys ja taajuusalueen pitäisi riittää tässä sovelluksessa. Anturin kiinnitys tapahtuu magneettikiinnityksellä.

3.5.3 Mittausasetukset

Näytteenottotaajuudeksi Dewesoftista valittiin 20 000 Hz, jolloin näytteitä pitäisi olla kaksinkertaisesti anturin taajuusalueeseen vertailtuna. FFT-analyysi modulissa asetukseksi valittiin amplitudin huipusta huippuun -formaatti, taajuusalueen energian keskiarvotus, ikkunatyypiksi Hanning ja resoluutioksi 1,22 Hz.

3.6 Mittausten toteutus

Mittaukset toteutettiin MLE Oy:n mastotesterillä usean eri päivän aikana. Mastotesteriä ajettiin manuaalisesti vapaanostosylinterin iskunpituuden verran eli noin 2000 mm:n korkeuteen. Jokaisesta mittapisteestä, jokaisella laakerilla ajettiin kolme sykliä mahdollisten mittavirheiden tai häiriöiden minimoimiseksi. Mittapisteitä mastossa on yhteensä 11 (kuva 27) eli mittauksia per laakeri saatiin 33. Mittapisteet 1 - 9 olivat kaikki johteessa, jossa tarkkailtava laakeri liikkuu, mittapisteet 1 - 4 ovat vaurioituneen laakerin puolella, mittapiste 5 keskellä mastokeppiä, ja mittapisteet 6 - 9 ovat mitattavan laakerin vastapäisessä johteessa. Lisäksi mittapisteet 10 ja 11 ovat maston ulommaisissa johteissa. Eri mittapisteitä on useita, jotta voitaisiin saada myös tietoa eri mittauspaikkojen eroille eri laakerivaurioilla jatkoa varten.



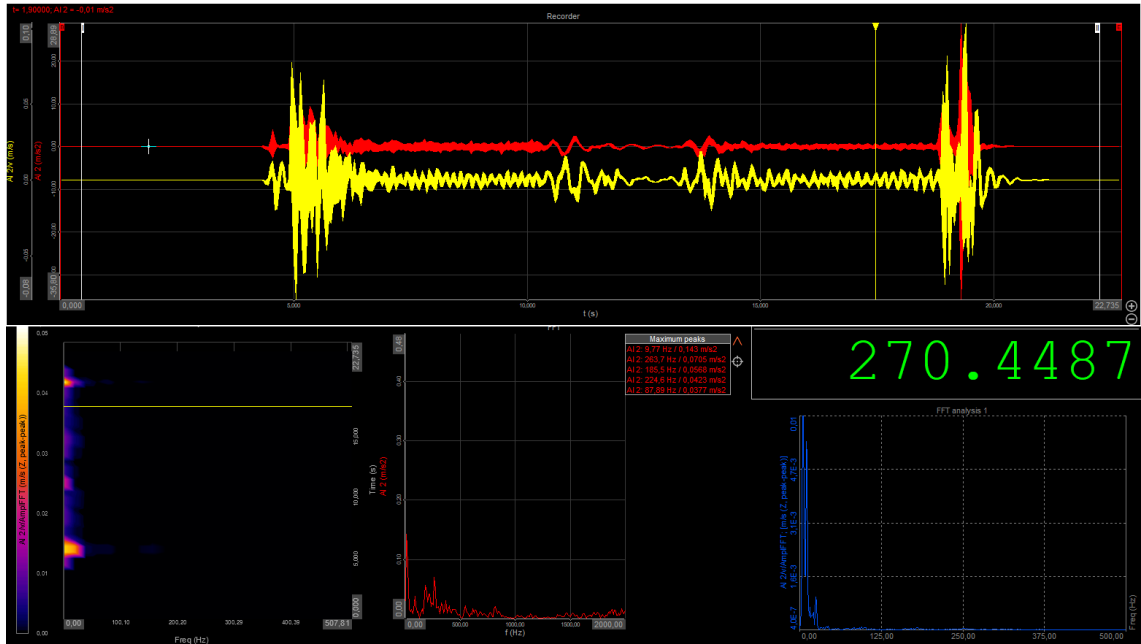
Kuva 27. Mittauspisteet mastossa.

3.6.1 Referenssimittaukset

Referenssimittaukset suoritettiin hieman kuluneella mutta ehjällä laakerilla, jolloin laakeri oli varmuudella jo asettunut johteeseen oikein. Koska mittauksia suoritettiin yhteensä noin 200, kaikkia niitä olisi mahdotonta esittää tässä. Esit-

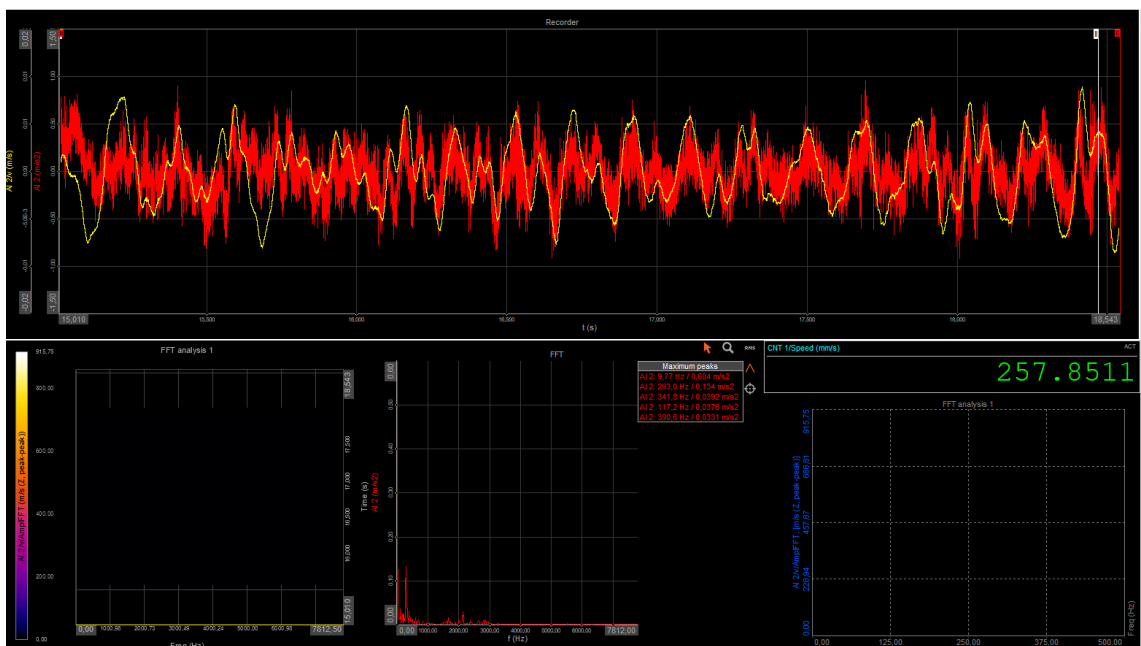
telenkin vain referenssimittauksista muutamien pisteiden mittaukset ja vaurioituneiden laakereiden kohdalla vain niiden mittauspisteiden mittaukset, joista on selkeitten nähtävissä muutoksia.

Mittauspisteessä 1 anturi on sijoitettu kohtisuoraan maston johdetta vasten, johdeen yläpäässä. Mittapisteessä 1 mitataan Z-akselin suuntaista kiihtyvyyttä. Näin sijoitettuna anturin tulisi havaita ulkokehän pitkittäisvärähtely selkeimmin. Kuvassa 28 on esitetty mittausnäkyvä Dewesoft X -ohjelmasta. Ylhäällä on kuvattu värähtelyn amplitudi aikatasoa vasten, punaisella kiihtyvyyden amplitudi ja keltaisella nopeus. Vasemmalla alanurkassa on esitetty värähtelyn taajuus aikatasossa FFT-analyysillä. Keskellä on värähtelyn amplitudi taajuustasossa ja oikealla maston senhetkinen nopeus sekä preview FFT-analyysistä. Kuten aikatasossa kuvatusa nopeus- ja kiihtyvyyssignaalista voi huomata, ovat maston värähtelyt erittäin suuria tietyillä hetkillä, esimerkiksi aivan noston alussa, kun haarukat ottavat taakan kyytiin sekä laskettaessa taakka maahan mittauksen lopulla. Voidaan myös huomata värähtelyn tason olevan hieman suurempi noston aikana kuin laskun. Tämä johtuu todennäköisesti pumppumoottorin säätöpöjristä, joka kontrolloi noston nopeutta saaden liikkeestä epälineaarista sen tehdessä työtä ylöspäin. Oleellisinta mittausten vertailun osalta ovat vain amplitudi aikatasossa sekä spektrin vertailu taajuustasossa, joten vain näitä tullaan esittämään tulevissa mittauksissa. Muut esitetyt mittaussignaalit ovat hyödyllisiä liiveseurannassa.



Kuva 28. Maston referenssimittaus mittauspaiakasta 1, Dewesoft X -ohjelmalla esitettyinä.

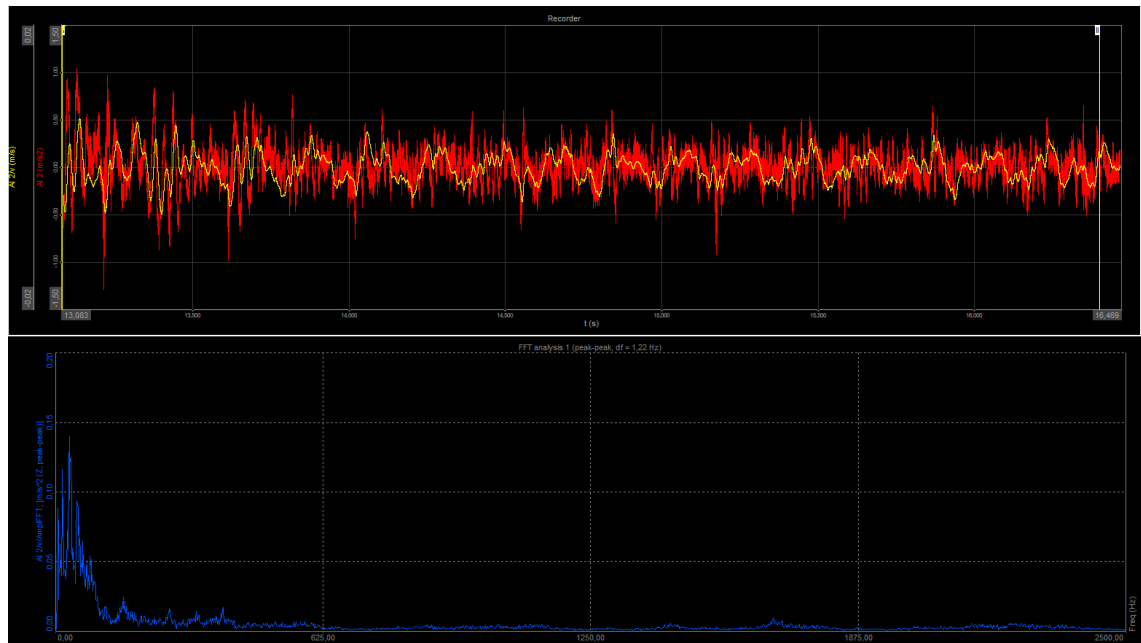
Mittausten analysoinnissa pyritään keskittymään laskun aikana tapahtuvaan värähtelyyn, sen ollessa tasaisinta ajanhetkillä 15 s - 18,5 s (kuva 29).



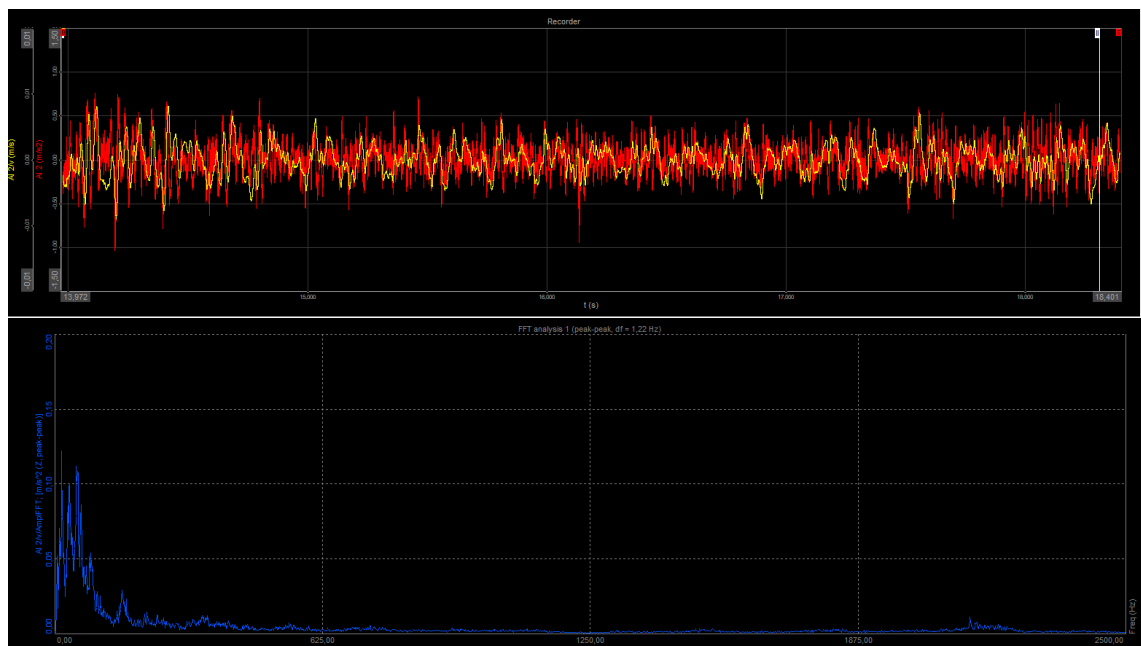
Kuva 29. Mittausdata ajanhetkillä 15 s - 18,5 s.

Mittauspisteet 2, 3 ja 4 ovat pystysuorassa maston johteessa, jolloin epälineaarinen liike vaikuttaa värähtelyarvoihin, mutta myös koko johteen oma värähtely

saadaan näin näkyville. Mittauspisteet mittaavat kiihtyvyyttä y-akselin suuntaisesti. Kuvissa 30 ja 31 esitetty mittauspisteiden 2 ja 4 data. Kuvissa ylhäällä punaisella kiihtyvyyden ja keltaisella nopeuden amplitudi aikatasossa. Alhaalla sinisellä kiihtyvyyden signaali taajuustasossa.

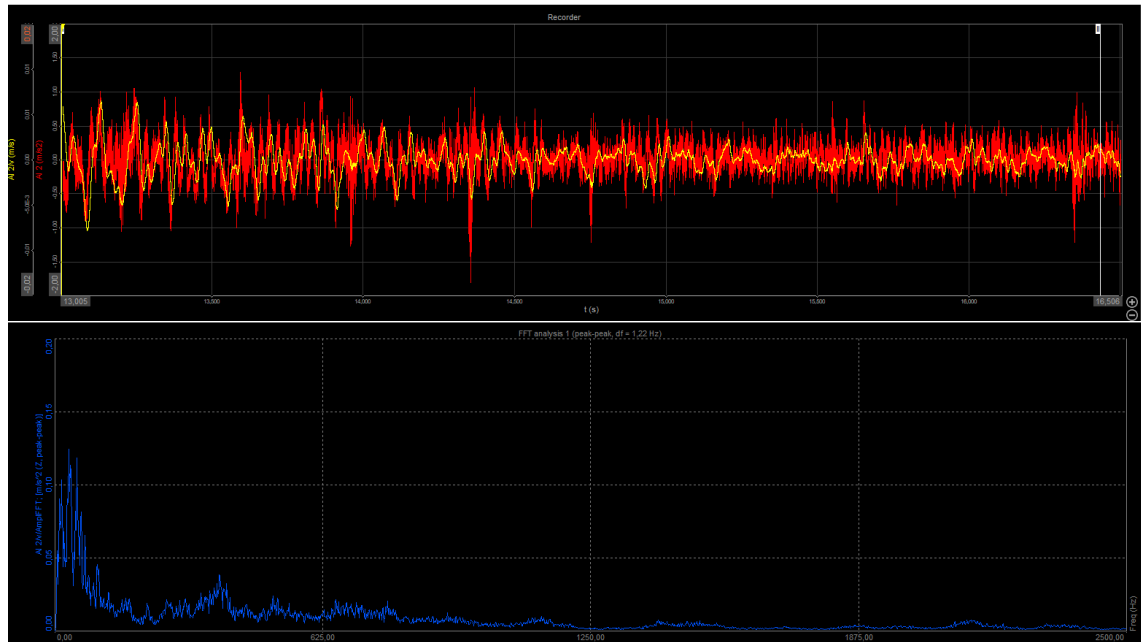


Kuva 30. Mittauspiste 2.



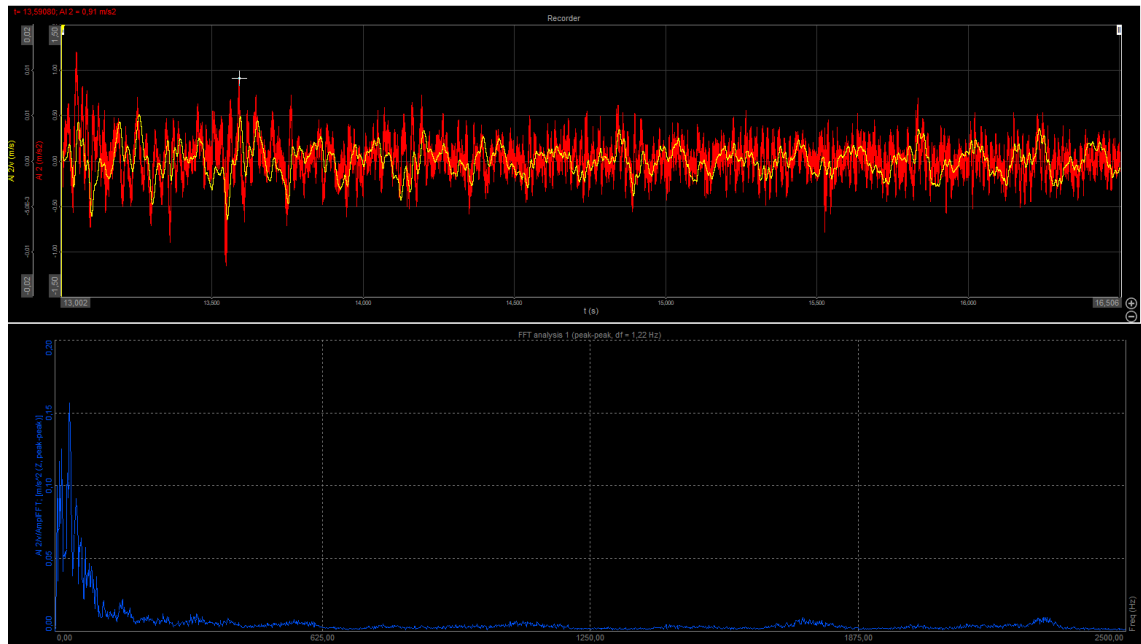
Kuva 31. Mittauspiste 4.

Mittauspiste 5 on maston keskellä maston keskipalkkia pystysuoraan, ja mittaa y-akselin suuntaista kiihtyvyyttä samoin kuin mittauspisteet 2, 3, 4, 6, 7 ja 8. Mittauspisteen data on esitetty kuvassa 32.



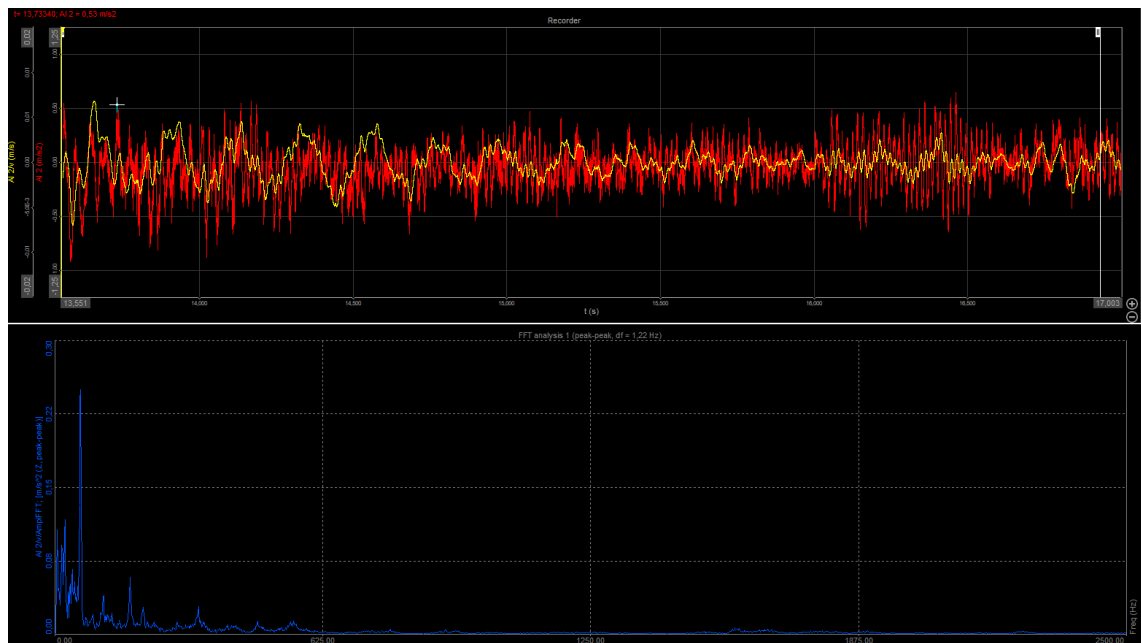
Kuva 32. Mittauspisteen 5 data.

Kuvassa 33 esitetään mittauspisteen 7 data. Mittauspiste 7 sijaitsee maston keskipalkissa mitattavaa laakeria vastapäätä eli niin sanotusti ehjän laakerin puolella.



Kuva 33. Mittauspisteen 7 data.

Mittauspiste 10 sijaitsee maston uloimmassa rungossa kohtisuoraan maston johdetta ja mittaa x-akselin suuntaista kiihtyvyyttä. Kuvassa 34 esitetty mittauspisteen data.



Kuva 34. Mittauspisteen 10 data.

Referenssimittauksia tehtiin kaiken kaikkiaan 11:stä eri mittapisteestä 33 kertaa. Kaikkien mittausten ja mittapisteiden tuloksia ei esitelty tässä suuren datamäärän vuoksi. Luvussa 4 näitä vertaillaan tarkemmin vaurioituneiden laakereiden mittauksiin.

3.6.2 Vaurioituneiden laakereiden mittaukset

Vierintälaakeriin aiheutettiin erilaisia vaurioita, joita laakerissa voisi syntyä. Vauriot ovat ylikorostettuja, jotta häiriöt olisivat helpommin havaittavissa värähtelymittauksista. Todellisuudessa laakerivauriot ovat huomattavasti ”hienovaraisempia”, ja tässä esitetyt vauriot ovat jo erittäin pitkällä vian kehittymisessä. Laakerit numeroitiin 1 - 6 vaurioiden mukaan ja jatkossa niihin viitataan laakerin numerolla. Laakerivaurioita tehtiin yhteensä kuusi erilaista. Neljä eritasoista ulkokehälle kulmahiomakoneella tuotettua vauriota (trukin mastossa yleisin paikka, johon vaurio ilmestyy) on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Ulkokehien laakerivauriot. Vasemmalta oikealle lievimmästä vauriosta suurimpaan: ehjä käytetty laakeri, laakeri 1 (lievin vaurio), laakeri 2, laakeri 3 ja laakeri 4 (suurin).

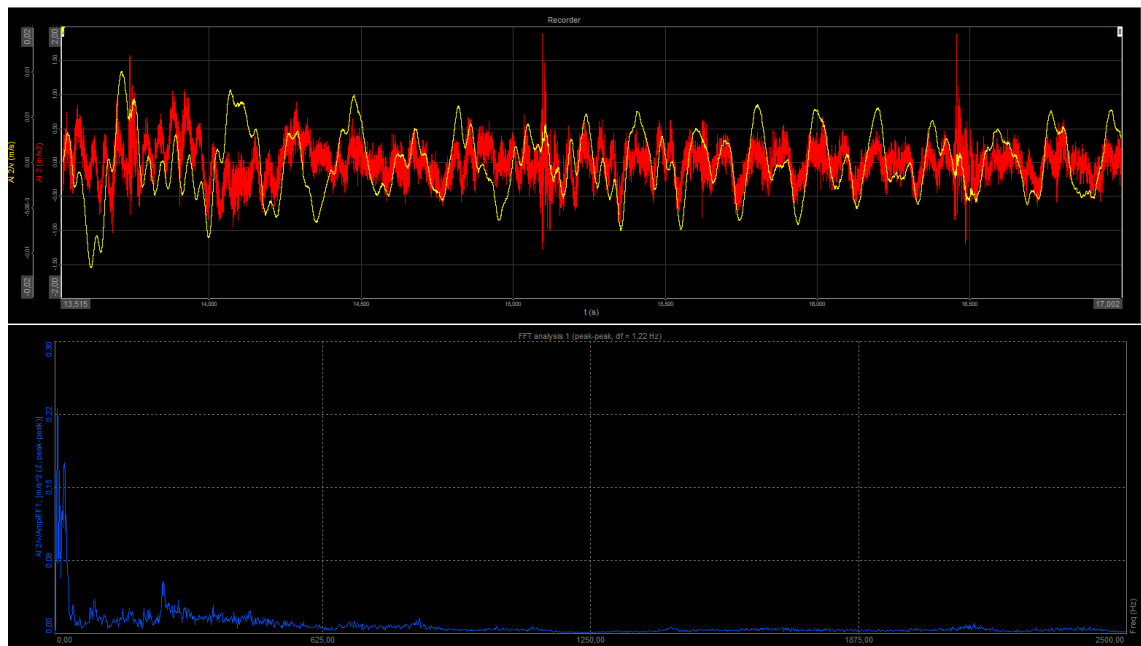
Yhdessä laakerissa vaurioitettiin yhtä vierintäkuulaa leikkaamalla Dremelillä siihen viiltoja (kuva 36) ja yhteen laakeriin asetettiin hiekkaa sisälle (kuva 36).



Kuva 36. Vierintäkuulan vaurio oikealla (laakeri 5) sekä hiekoitettu laakeri vasemmalla (laakeri 6).

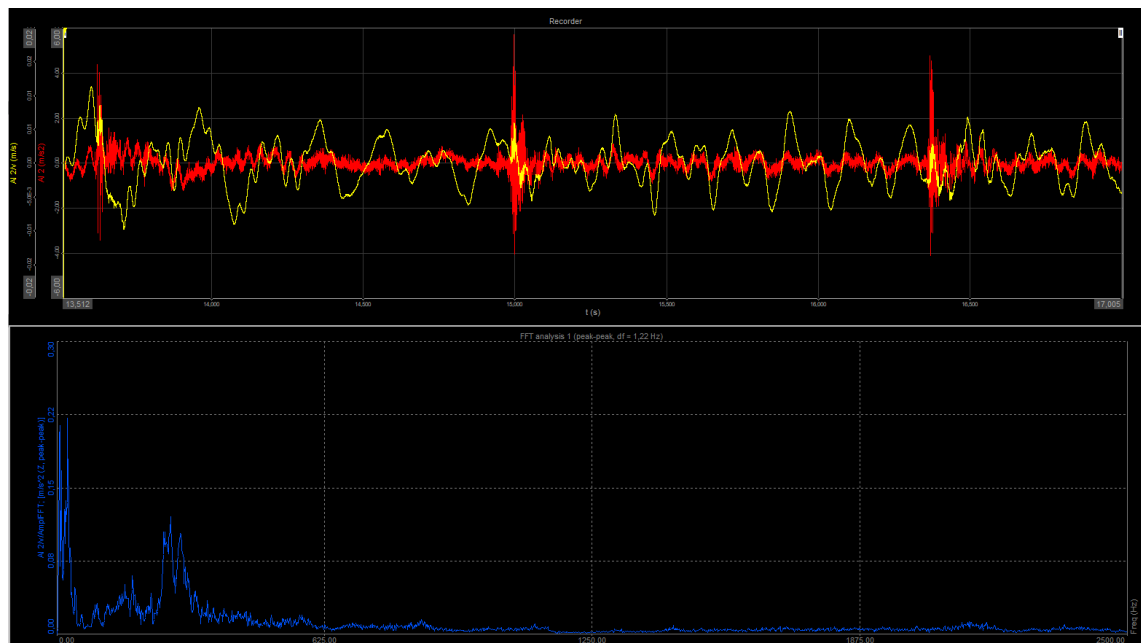
Kaikkien laakerivaurioiden mittaukset suoritettiin samoista mittauspisteistä kuin referenssiläakerinkin. Jokaiselle laakerille suoritettiin mittaukset 11:sta mittapistestä, kustakin kolme kertaa. Poikkeuksena laakerivaurio 4, joka oli niin suuri, että laakeri ei suostunut pyörimään johteessa ollenkaan. Mittauksia kertyi yhteensä 165. Kaikkia tuloksia ei esitetä tässä työssä, mutta ne ovat maston värähtelymittausten jatkon kannalta silti hyödyllisiä sekä toivat lisää kokemusta värähtelymittauksista työn tekijälle. Seuraavaksi esitettynä jokaisesta laakerista yksi mittaus kuvissa 37 - 41. Kuvissa ylhäällä punaisella kiihtyvyyys ja keltaisella nopeussignaali aikatasossa sekä alhaalla sinisellä kiihtyvyyssignaali taajuustasossa.

Laakeri 1 (lievin)



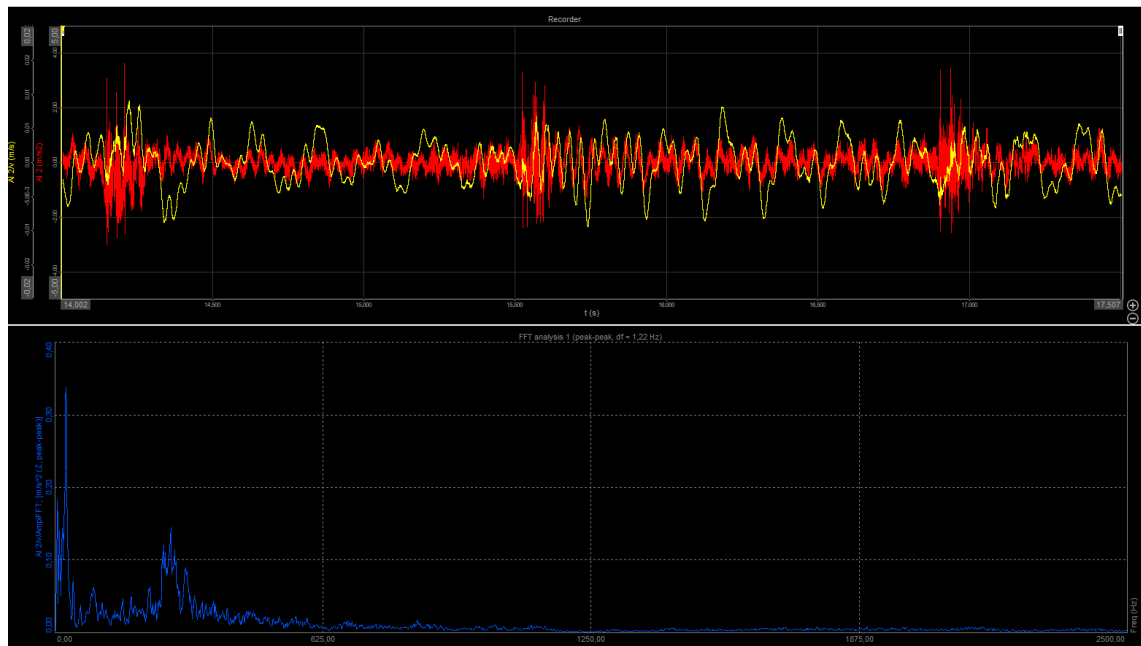
Kuva 37. Laakerin 1 mittausdata mittapisteestä 1.

Laakeri 2



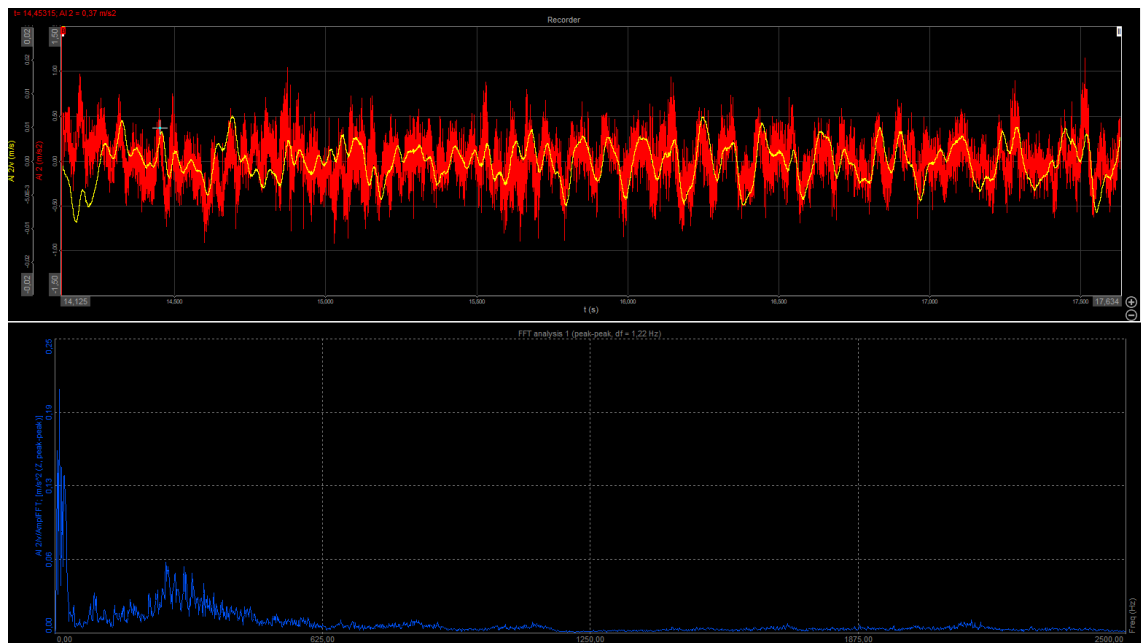
Kuva 38. Laakerin 2 mittausdata mittapisteestä 2.

Laakeri 3



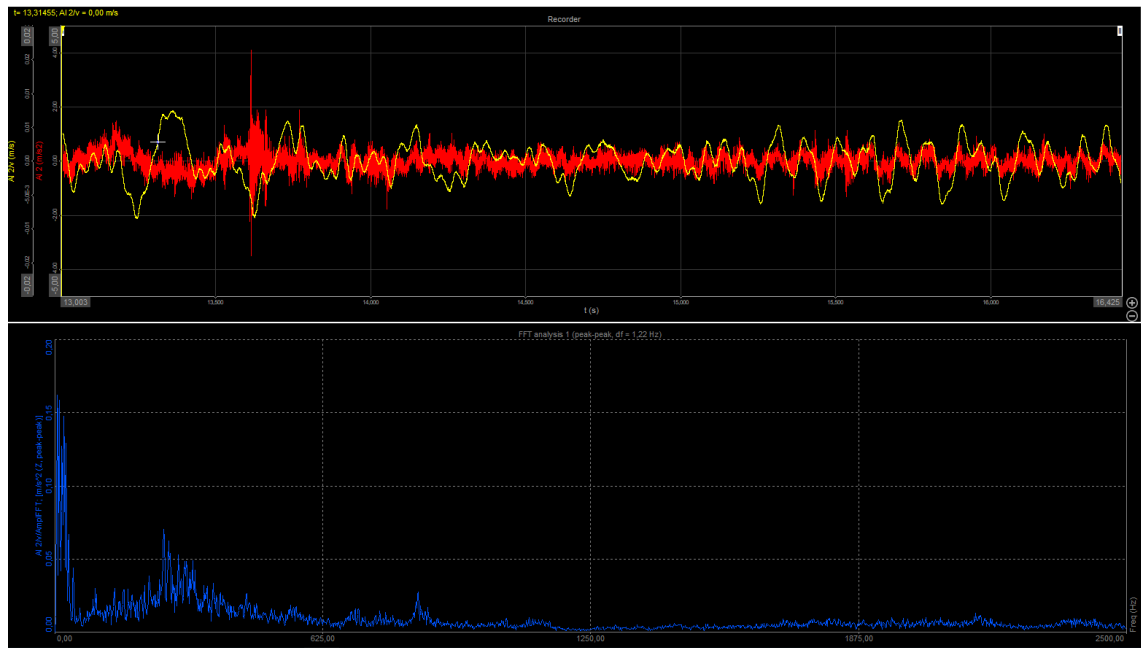
Kuva 39. Laakerin 3 mittausdata mittapisteestä 1.

Laakeri 5



Kuva 40. Laakerin 5 mittausdata mittapisteestä 1.

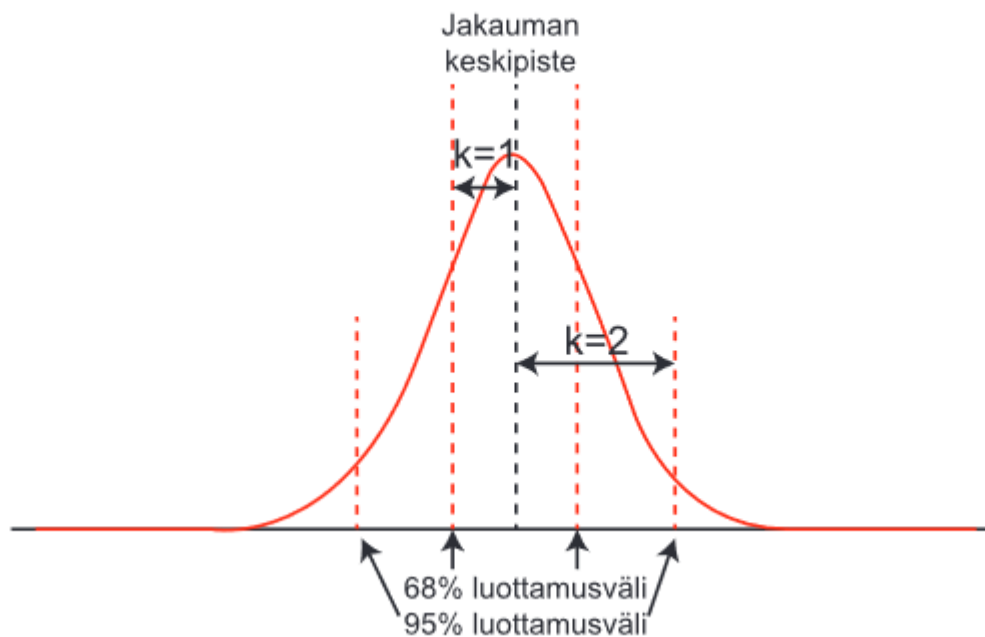
Laakeri 6



Kuva 41. Laakerin 6 mittausdata mittapisteestä 1.

3.6.3 Mittausepävarmuus

Jotta mittaustuloksista voidaan tehdä johtopäätöksiä, on mittauksiin liittyvä epävarmuus tiedettävä. Mittausepävarmuus kuvaa mittaustuloksessa suureen arvojen oletettua vaihtelua. Epävarmuuden laskemisessa on tunnettava epävarmuuskomponenttien jakaumat, joista yleisin on normaalijakauma (kuva 60). Normaalijakaumassa jakauman keskikohta x on todennäköisin ja todennäköisyys pienenee keskikohdasta etäännyttäessä. Komponentin jakauman ollessa tuntematon se oletetaan normaalijakautuneeksi. Toistetuilla mittauksilla jakauma noudattaa yleensä normaalijakaumaa. [28, s. 37.]



Kuva 60. Normaalijakauma [28, s. 37].

Toinen yleinen jakauma on tasajakauma. Esimerkkinä mittaustuloksesta voidaan tietää sen sijaitsevan varmuudella välillä $x \pm a$. Standardiepävarmuudeksi kutsutaan epävarmuuskomponentteja, joita käsitellään yksinkertaisten hajontojen tasolla, joiden todennäköisyys on 68 %. [28, s. 38.]

Mittausepävarmuuksien määrittystavat voidaan jakaa tyypin A ja tyypin B määrittäisiin. Tyypin A epävarmuus voidaan määrittää tilastollisin menetelmin, kun taas tyypin B epävarmuutta ei voida määrittää tilastollisin menetelmin. Tyypin A epävarmuudella mittauksia toistettaessa N kertaa on mittaustulos N :n mittauksien keskiarvo. Epävarmuutena voidaan käyttää mittausten keskiarvon keskihajontaa. Tyypin B epävarmuus saadaan siis usein kalibrointitodistuksesta, aiemmasta mittauskokemuksesta, laitteen spesifikaatioista tai arvioimalla. Tyypin B epävarmuutta ei saa pienennettyä toistamalla mittauksia. [28, s. 38.]

Huomionarvoisia ovat myös erilaiset ympäristötekijät, kuten lämpötila, kosteus ja ilmanpaine. Epävarmuuksia aiheutuu myös käytettävistä mittalaitteista sekä mittauksen suorittajasta ja itse mittauskohteesta.

Toistettavissa mittauksissa voidaan käyttää tilastollisia menetelmiä tyypin A epävarmuusanalyysillä. Mittaustulos lasketaan toistettujen havaintojen keskiarvona:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (17)$$

jossa \bar{x} on mittaustulos, N mittausten lukumäärä ja x_i toistettujen havaintojen keskiarvo.

Tulosten keskihajonta lasketaan kaavalla 29:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

joka kuvaa oletettavaa hajontaa ja epävarmuutta yksittäisellä havaintopisteellä. Keskiarvon keskihajonta kuvaa parhaiten keskiarvona saadun tuloksen epävarmuutta:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{N} \quad (19)$$

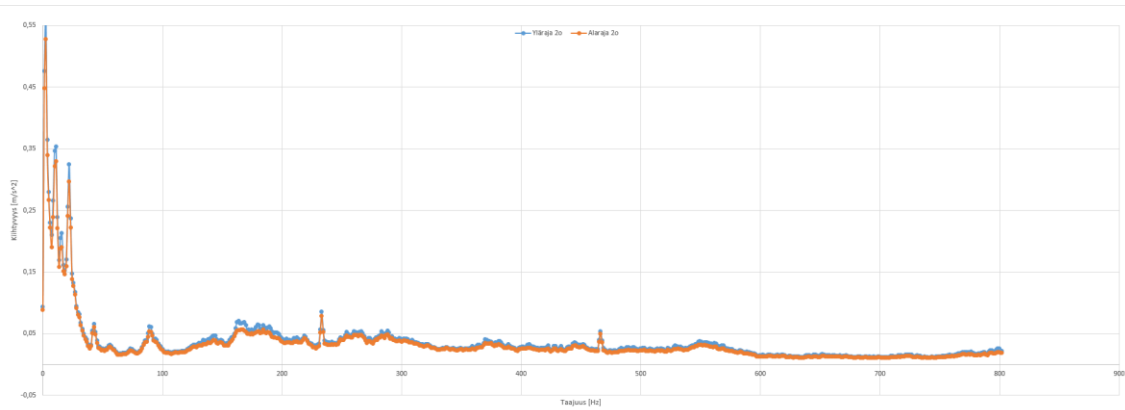
Keskiarvona saadun mittaustuloksen epävarmuus pienenee suhteessa toistokertojen N neliöjuureen. [28, s. 46.]

Tyypin A ja tyypin B epävarmuudet yhdistämällä voidaan laskea estimaatti tuloksesta, esimerkiksi mittausten keskiarvon ja kalibrointitodistuksen mukaan:

$$\bar{D} = \bar{x} + \Delta \bar{x}_{korj} \quad (20)$$

jossa \bar{x} on mittaustulosten keskiarvo ja $\Delta \bar{x}_{korj}$ on kalibrointitodistuksesta saatu arvo. Varsinainen mittaustulos D epävarmuustekijöineen saadaan summamalla estimaatti \bar{D} ja laajennettu epävarmuus $U(\bar{D})$. [29, s. 19 - 23.]

Esimerkiksi mittauspaikan 1 keskiarvoon lisätty epävarmuus keskiarvon keskihajonnalla kuvassa 61.



Kuva 61. Mittauspaikan 1 keskiarvoon lisätty epävarmuus. Yläraja sinisellä ja alaraja oranssilla.

Mittauspaikasta 1 mitatun kiihtyvyyden signaalin ollessa näiden raja-arvojen sisällä on mittaustulos 95-prosenttisesti luotettava.

4 Tulokset ja analysointi

Tässä luvussa vertaillaan vaurioituneiden laakereiden mittausdataa referenssimittauksiin ja analysoidaan tuloksia. Ensimmäistä kehävaurioitettua laakeria vertaillaan useammasta eri mittapistestä ja tutkitaan, missä mittapistessä vaurio on selkeimmin nähtävillä. Seuraavissa kehävauriollisissa laakereissa tarkastellaan vain sitä mittapistettä, josta vaurio ilmenee selvimmin.

PSK 5707 -standardissa käsitellään laakerikomponenttien vikoja sekä vianmäärittystä. Standardin mukaan vierintälaakerin komponenttien sysäystaajuudet voidaan laskea seuraavien kaavojen mukaan:

Ulkokehän sysäystaajuus

$$f_u = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) n \quad (21)$$

Sisäkehän sysäystaajuus

$$f_s = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\beta \right) n \quad (22)$$

Kuulan sysäystaajuus

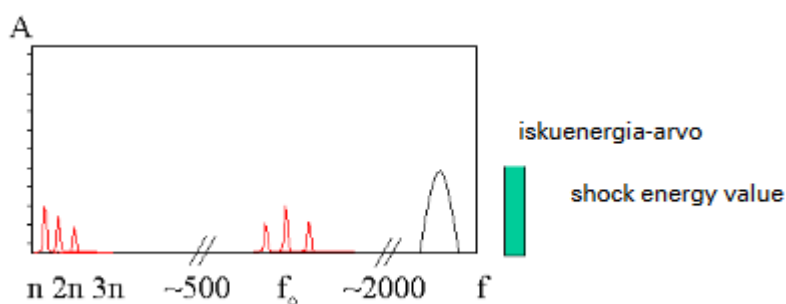
$$f_r = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos\beta \right)^2 \right) n \quad (23)$$

Pidikkeen sysäystaajuus

$$f_p = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\beta \right) n \quad (24)$$

N on vierintäelementtien lukumäärä, d on vierintäelementin halkaisija, D on halkaisija sisä- ja ulkokehän keskipisteestä, β on kontaktikulma vierintäkehän sisäpinnalla ja n on laakerin nopeus rpm:nä. Ulkokehän pyöriessä sisäkehää nopeammin muutetaan kaavan 20 miinusmerkki plusmerkiksi. [30, s. 15.]

Vierintäpinnan paikallinen vaurio aiheuttaa tyypillisesti kasvaneita iskuenergia-arvoja sekä kolme tai neljä huippua taajuusalueella, joka vastaa laakerin osien ominaistaajuutta, tyypillisesti 500 - 2000 Hz (kuva 42). [30, s. 15.]



Kuva 42. Yksittäiset laakerivauriot [30, s. 15].

Luvussa 3 tutustuttiin mitattavaan laakeriin ja sen mittoihin. Mitattavan laakerin säde on 58 mm, jolloin sen kehä on

$$2\pi * 0,058m = 0,3644m \quad (25)$$

Maston nopeus on laskun aikana keskimäärin 270 mm/s tai 0,27 m/s, ja yhteen laakerin täyteen pyörähdykseen kuluva aika on siis

$$\frac{s}{v} = t \Rightarrow \frac{0,3644m}{0,27m/s} = 1,35s \quad (26)$$

Laakerin kierrostaajuus eli kierrosnopeus on tasaisella pyörimisliikkeellä pyörähdysajan käänteisluku:

$$1,35s^{-1} = 0,741 \frac{r}{s} \Rightarrow 44,444rpm \quad (27)$$

Syötetään nyt lasketut tiedot sekä laakerin datalehdessä saadut tiedot yhtälöihin 21, 22, 23 ja 24, jolloin saadaan tietoa mahdollisista laakerin sysäystaajuuksista:

Ulkokehän sysäystaajuus

$$f_u = \frac{8}{2} \left(1 - \frac{17,462mm}{73mm} \cos(4) \right) * 44,444rpm = 135,355Hz \quad (28)$$

Sisäkehän sysäystaajuus

$$f_s = \frac{8}{2} \left(1 + \frac{17,462mm}{73mm} \cos(4) \right) * 44,444rpm = 220,197Hz \quad (29)$$

Kuulan sysäystaajuus

$$f_r = \frac{73mm}{2*17,462mm} \left(1 - \left(\frac{17,462mm}{73mm} \cos(4) \right)^2 \right) * 44,444rpm = 87,609Hz \quad (30)$$

Pidikkeen sysäystaajuus

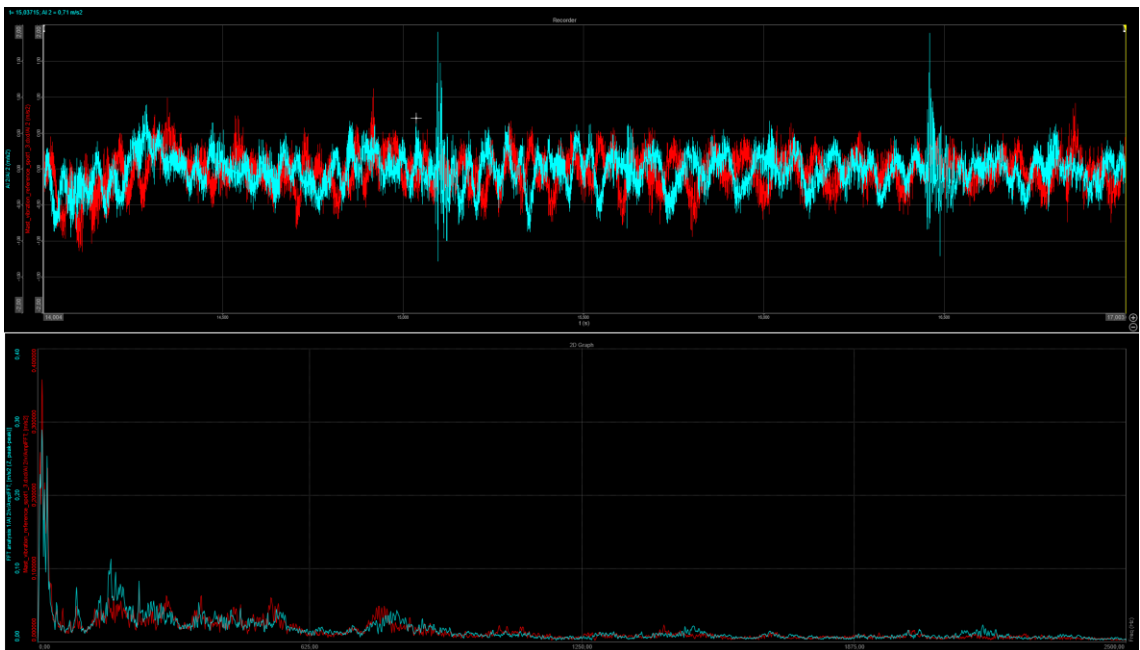
$$f_p = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{17,462mm}{73mm} \cos(4) \right) * 44,444rpm = 27,525Hz \quad (31)$$

Laskennallisista sysäystaajuuksista on hyötyä mittaustulosten analysoinnissa, kun etsitään värähtelyä edellä esitettyjen taajuuksien ja niiden monikertojen alueilta.

4.1 Mittausten vertailu

4.1.1 Laakeri 1

Laakerin yksi vauriot olivat lievimmät, vain pieni n. 1 - 1,5 mm:n syvyinen viilto ulkokehällä. Ensimmäisenä vertaillaan kiihtyvyyssignaalia aikatasossa ajanhetkellä 14 s - 17 s (kuvassa 42 ylhäällä) sekä taajuustasossa (kuvassa 42 alhaalla). Aikatasossa y-akselin maksimiarvot ovat välillä -2 m/s^2 - 2 m/s^2 , taajuustasossa y-akselilla 0,4 m/s ja x-akselilla 2500 Hz:iin asti.

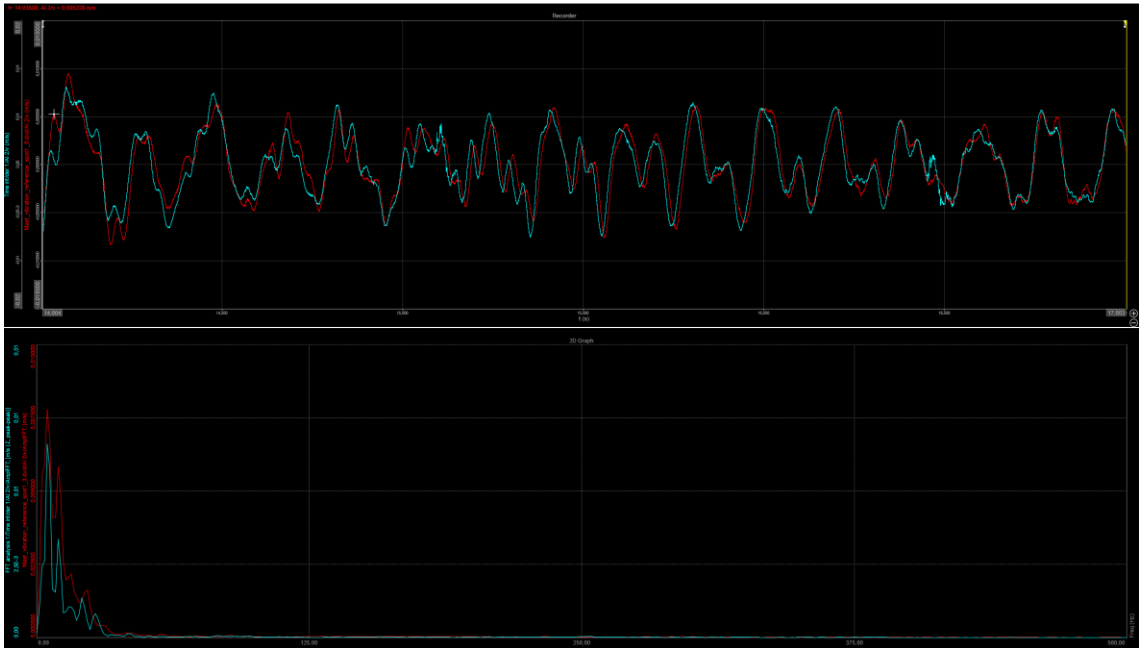


Kuva 42. Laakerin 1 vertailu ehjään laakeriin kiihtyvyyssignaalin aika- ja taajuustasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Aikatasossa on nähtävissä noin $-1,3 \text{ m/s}^2$ - $1,9 \text{ m/s}^2$:n amplitudipiikit ajanhetkillä 15,1 s ja 16,5 s laakerivaurion osuessa johteeseen. Taajuustasossa on nähtävissä suurimmat huiput 0 - 25 Hz:n alueella, jossa suurin huippu on kaikissa mittauksissa 9,77 Hz n. $0,44 \text{ m/s}^2$:n kiihtyvyydellä, jonka puolikerran 4,88 Hz:n

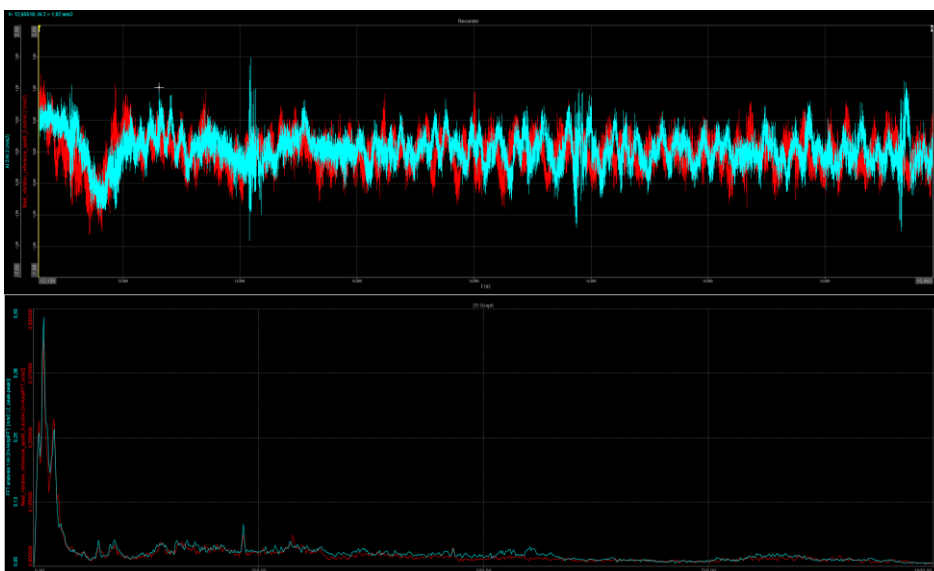
kohdalla näkyy myös huippu $0,22 \text{ m/s}^2$. Yksi mielenkiintoinen taajuus on 23 Hz:n tienoilla, jolle näyttäisi löytyvän myös kaksi monikertaa, 46 Hz:n ja 92 Hz:n taajuudelta. Laakerin ulkokehän sysäystaajuuden lähetyillä, n. 131 Hz:n ja 138 Hz:n taajuudella, on nähtävissä hieman kasvaneet värähtelytasot; tosin myös referenssimittauksessa tällä alueella on matalampia huippuja. Huomattavasti kasvaneita värähtelyarvoja on myös etenkin 164 Hz:n alueella, mutta tämä ei vastaa yhtäkään laskennallista sysäystaajuutta. Myös 233 Hz:n alueella näkyy selvä amplitudipiikki, ja tämän toinen monikerta 466 Hz:n taajuudella on myös nähtävissä. Joillakin taajuuksilla referenssimittauksen värähtelytasot ovat jopa suurempia kuin vaurioituneen laakerin mittauksissa. Tämä johtunee maston kokonaistason värähtelyn laajuudesta sekä toleranssien ”väljyydestä”; toisinaan yksikään nosto ja mittaus eivät tuota täsmälleen samaa tulosta. Taajuustasosta on kuitenkin nähtävissä, että suurimmat värähtelyt tapahtuvat matalilla taajuuksilla n. 0 - 1250 Hz:n alueella. Yleisesti ottaen laakeriviat ilmenevät suurilla yli 2 kHz:n taajuuksilla. Maston laakereiden hitaan pyörimisnopeuden huomioon ottaen voidaan olettaa, että tällainen ohjearvo ei päde yksiselitteisesti kyseisessä systeemissä vaan onkin tarkoitettu enemminkin suuremmilla nopeuksilla pyöriville laakereille, esimerkiksi pumppumoottorissa.

Nopeussignaalia tarkastellessa on aikatasossa havaittavissa ylimääräinen hieman rikkonainen amplitudipiikki samoilla ajanhetkillä kuin kiihtyvyyssignaalissakin (kuva 43). Laakerivaurion aiheuttamat herätteet ovat kuitenkin vain marginaalisesti suurempia kuin referenssimittauksessa. Taajuustasossa näitä herätteitä ei ole havaittavissa. Nopeuden taajuustasossa referenssimittauksen värähtely vaikuttaa matalilla taajuuksilla suuremmalta kuin vaurioituneen laakerin, mutta tätäkin voidaan pitää vain mittausepä tarkkuutena.



Kuva 43. Nopeussignaali aika- ja taajuustasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Mittauspisteestä 6 (kuva 44) eli maston toiselta puolelta tehdyssä mittauksessa on edelleen näkyvissä laakerivaurion aiheuttama heräte aikatasossa. Taajuustason vertailu paljastaa kokonaisvärähtelyn olevan kuitenkin lähestulkoon identtistä ehjän ja lievästi vaurioituneen laakerin välillä.

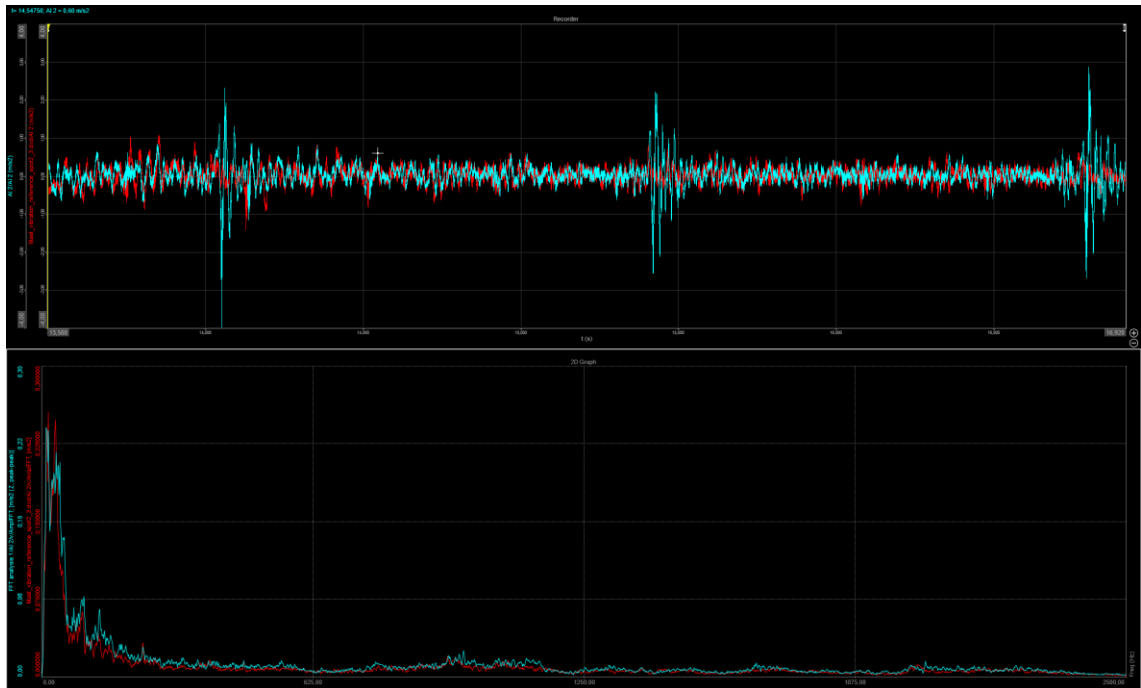


Kuva 44. Mittauspisteen 6 kiihtyvyyssignaali aika- ja taajuustasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

4.1.2 Laakeri 2

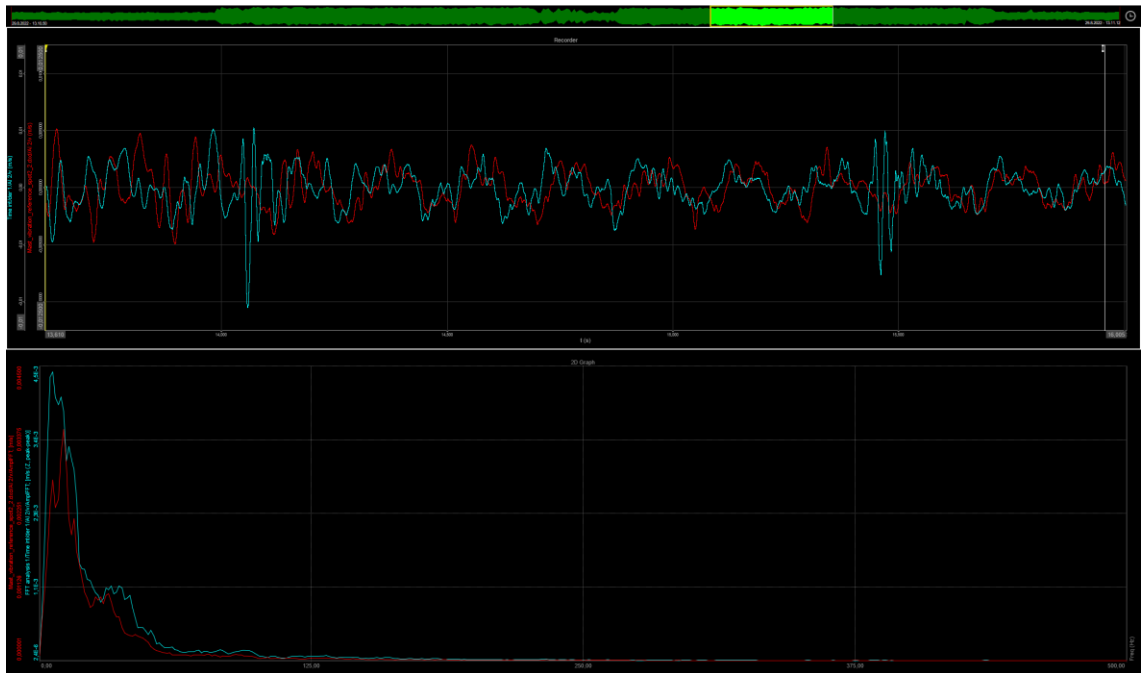
Laakerissa kaksi oli suuri n. 2,5 mm syvä ja 4 mm leveä viilto ulkokehän ulkopinnalla. Näin suuri vaurio tuskin olisi todellisuudessa mahdollinen, mutta sen toivottiin auttavan simuloimaan tässä työssä selkeämmin nähtäviä eroja ehjään laakeriin. Ensimmäisenä vertaillaan kiihtyvyyssignaalia aikatasossa ajanhetkellä 13,5 s-17 s (kuvassa 45 ylhäällä) sekä taajuustasossa (kuvassa 45 alhaalla). Aikatasossa y-akselin maksimiarvot ovat välillä -4 m/s^2 - 4 m/s^2 , taajuustasossa y-akselilla 0,4 m/s ja x-akselilla 1250 Hz:iin asti.

Aikatason kiihtyvyyssignaalissa on taas selkeästi nähtävissä vaurion aiheuttama heräte johteessa, tällä kertaa voimakkaampana maksimikiihtyvyyden ollessa jopa -4 m/s^2 . Taajuustason tarkastelusta on havaittavissa hieman pienempiä amplitudeja kuin ensimmäisen laakerin mittauksessa johtuen kiihtyvyyssanturin sijoittamisesta erisuuntaisesti tässä mittauksessa. Taajuustasossa suurimmat värähtelyt sijoittuvat taas spektrin alkupäähän alueelle 0 - 60 Hz. Tälläkin kertaa suurin huippu on 9,77Hz:n taajuudella, mutta toinen huippu löytyy 15,87 Hz:n taajuudelta, jonka todennäköiset monikerrat näkyvät 3 2Hz:n ja 63 Hz:n taajuudella.



Kuva 45. Laakeri 2 kiihtyvyyden aika- ja taajuustasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

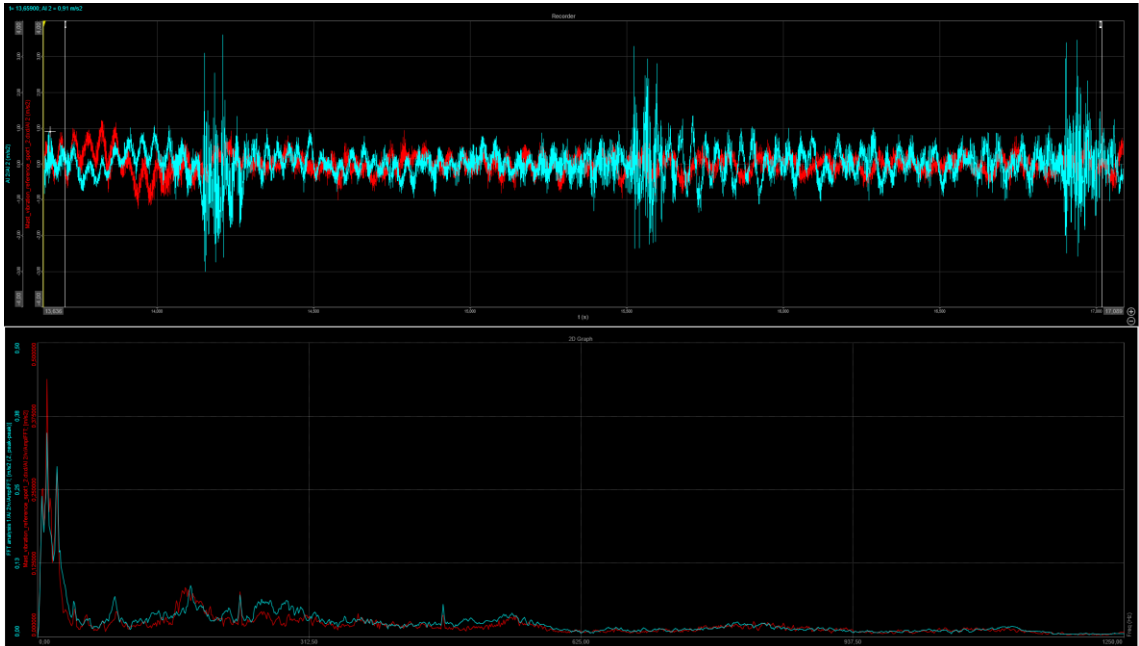
Nyt tarkastellessa laakerin 2 nopeussignaalia myös siinä oli havaittavissa vaurion aiheuttamat herätteet aikatasossa ajanhetkillä 14 s ja 15 s (kuva 46). Taajuustason tarkastelussa erot olivat lähinnä nopeuden voimakkuudessa, mutta kaikki amplitudipiikit olivat samoilla taajuuksilla kuin referenssimittauksessakin paitsi yksi pieni piikki 41,5 Hz:n taajuudella.



Kuva 46. Laakerin 2 nopeussignaalin vertailu aika- ja taajuustasossa referenssimittaukseen. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

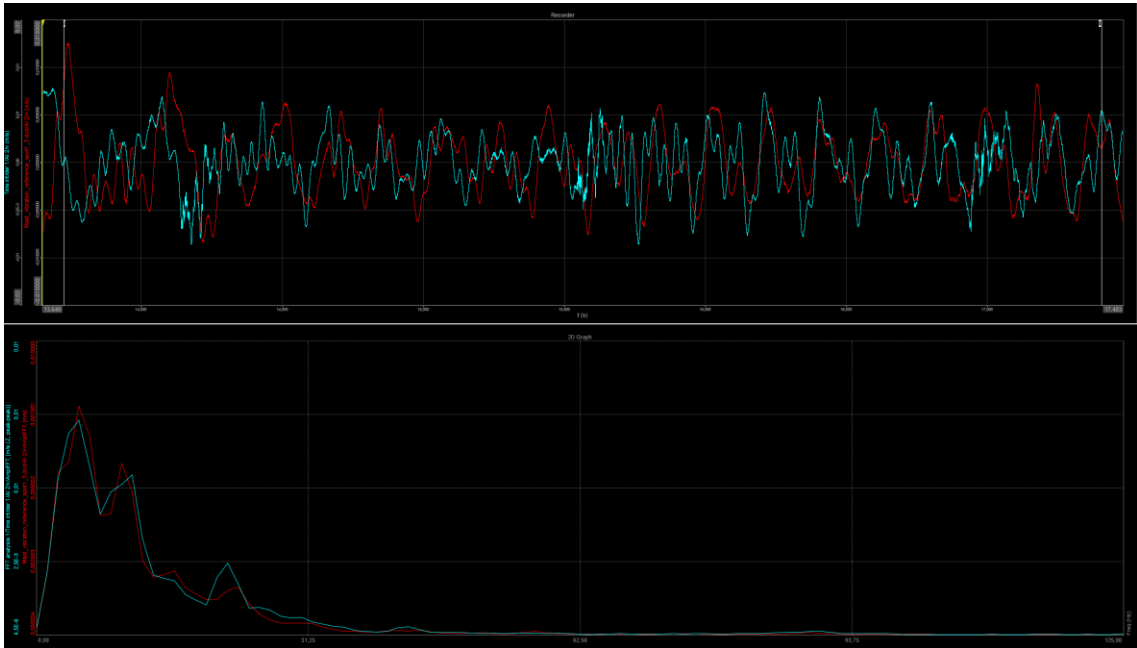
4.1.3 Laakeri 3

Laakerin 3 ulkokehän ulkopinnassa oli kolme n. 2,5 mm - 3,5 mm syvää viiltoa poikittaissuunnassa. Laakeria tarkasteltiin ensin kiihtyvyyssuureen osalta aika- ja taajuustasossa laskun aikana ajanhetkellä 13,5 s - 17 s. Aikatasossa näkyvät jokaisen laakerin kierroksen aikana kolme amplitudipiikkiä, mikä on odotettavissa kolmelta vierekkäiseltä vauriolta ulkokehällä (kuvan 47 yläspektri). Taajuustason tarkastelussa ei edelleenkään näy mainittavia muutoksia referenssiarvoihin verrattuna (kuva 47 alaspektri). Nopeat vaurion herätteet häviävät maston kokonaisvärähtelyihin tehokkaasti taajuustason keskiarvovertailussa.



Kuva 47. Laakerin 3 kiihtyvyyssignaali aika- ja taajuustasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Nopeussignaalin aikatasoa tarkastellessa on huomattavissa suurempi määrä amplitudipiikkejä kuin referenssiarvossa. Taajuustason tarkastelussa on havaittavissa kasvanutta värähtelyä 21,97 Hz:n taajuudella ja sen välittömässä läheisyydessä. Muutoin taajuustaso on lähestulkoon identtinen referenssimittauksen kanssa. Nopeussignaalin aika- ja taajuustason spektrit nähtävissä kuvassa 48.



Kuva 48. Laakerin kolme nopeussignaalin vertailu referenssiin aika- ja taajuustasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

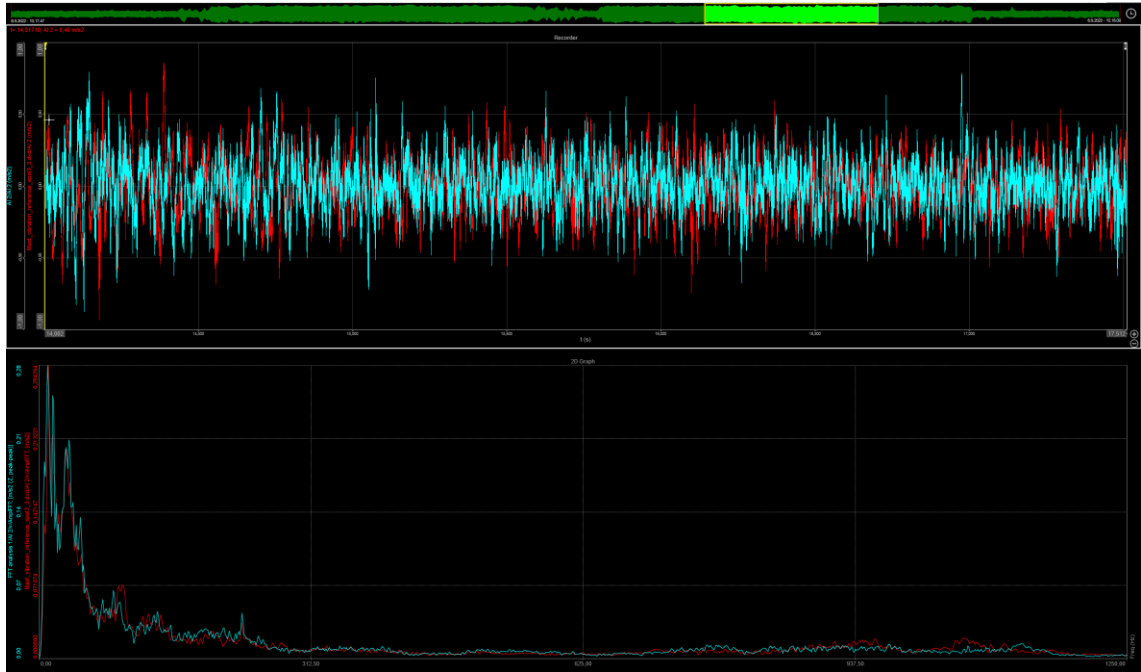
4.1.4 Laakeri 4

Laakeriin 4 tehtiin suuri tasainen kuluma kulmahiomakoneella. Tällainen vaurio voisi syntyä esimerkiksi, jos laakeri syystä tai toisesta lopettaisi pyörimisen ja liikkuisi väkisin johdetta vasten. Tehty vaurio osoittautui kuitenkin liian suureksi, eikä laakeri pyörinyt suuren 3500 kg:n taakan kanssa johteessa ollenkaan. Tästä syystä laakerista ei ole mittaustuloksia.

4.1.5 Laakeri 5

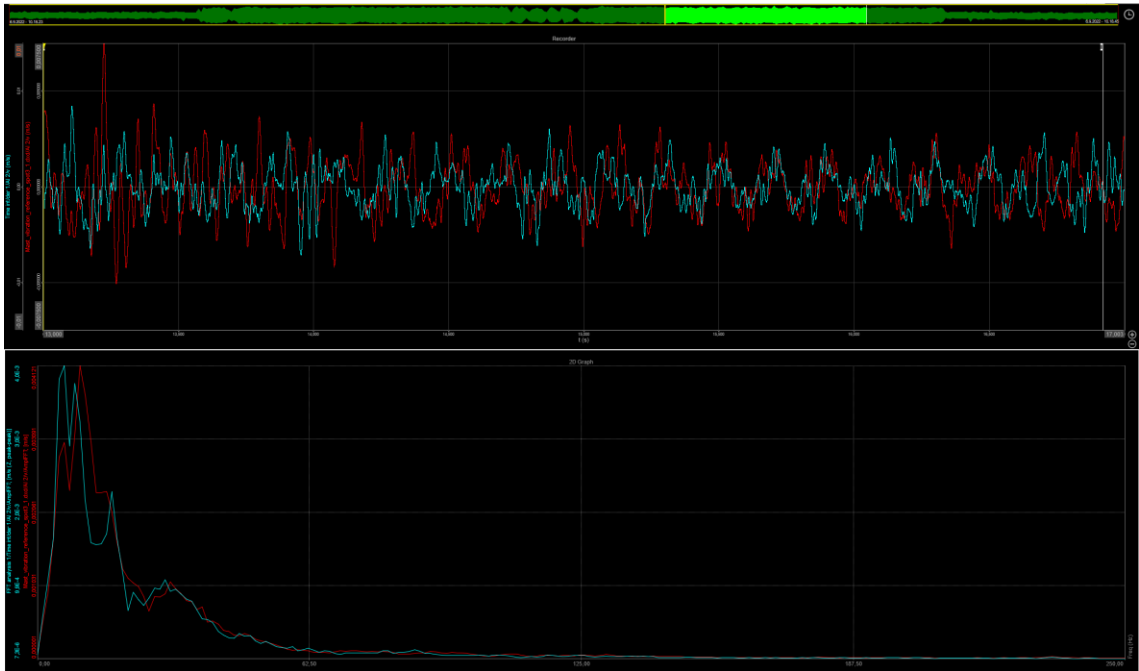
Laakerin 5 yhteen vierintäelementtiin (kuulaan) tehtiin viiltoja Dremelillä. Kuulan aiheuttaman sysäystaajuuden tulisi laskennallisesti olla n. 85 - 90 Hz:n alueella. Vertaillen kiihtyvyyssignaalia taajuustasossa referenssimittaukseen löytyy vaurioituneen laakerin signaalista hieman korkeampi piikki 85 Hz:n kohdalta, mutta referenssiarvossa piikki on 90 Hz:n kohdalla. Tätä ei voi yksiselitteisesti pitää kuulalaakerin aiheuttaman värähtelynä, vaan kyseessä voi olla myös ma-

talamman taajuuden herätteen harmonia, jonka hienoinen siirtymä johtuu mitausvirheestä (kiihtyvyyssanturin hieman eri sijainti). Aikatasossa on nähtävissä muutamia hieman referenssiarvoja suurempia piikkejä satunnaisesti.



Kuva 49. Laakerin 5 kiihtyvyyssignaalin vertailu aika- ja taajuustasossa referenssimittaukseen. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

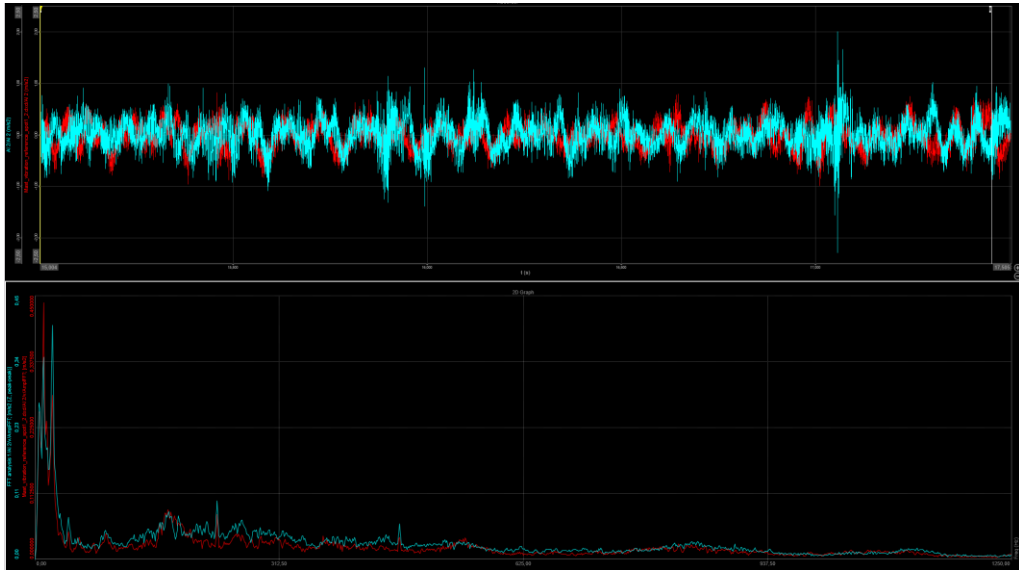
Nopeussignaalin tarkastelussa aika- ja taajuustasossa ei näy merkittäviä eroja referenssisignaaliin verrattuna (kuva 50).



Kuva 50. Laakerin 5 nopeussignaalin vertailu aika- ja taajuustasossa referenssimittaukseen. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

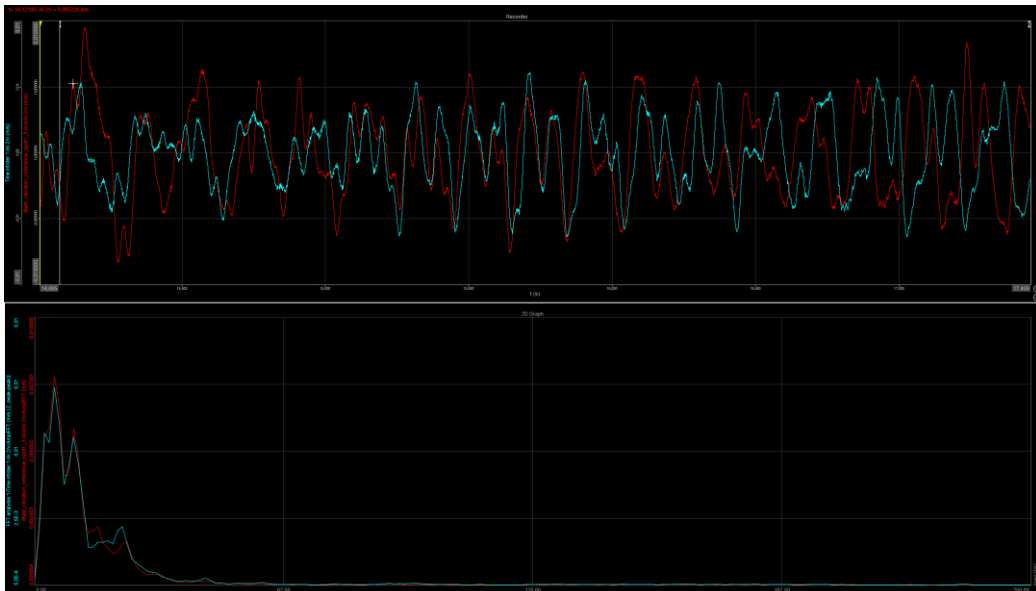
4.1.6 Laakeri 6

Laakerissa 6 simuloitiin epäpuhtauksien aiheuttamaa värähtelyä. Epäpuhtauksina oli hienoa hiekkaa ($0,3 - 1 \text{ mm}^2$), jota asetettiin laakerin pölysuojan alle. Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa vaurioita mihin vain laakerin osista, joten tiettyä tutkittavaa taajuutta ei ole. Ensin vertailtiin taas kiihtyvyyssignaalia aika- ja taajuustasossa (kuva 51). Aikatasossa on nähtävissä yleisesti värähtelytason suurta kasvua amplitudeja ollessa useita sekä yksi suuri piikki n. 17,05 sekunnin kohdalla. Taajuustasossa erot ovat maltillisempia. 22 Hz:n kohdalla kiihtyvyys on hieman suurempi kuin referenssiarvoilla ja myös tämän toisella harmonisella taajuudella. Yleisesti ottaen amplitudien kasvua on 200 Hz:n - 500 Hz:n taajuudella.



Kuva 51. Laakerin 6 kiihtyvyyssignaalin vertailu aika- ja taajuustasossa referenssimittaukseen. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Nopeussignaalin aikatasovertailussa on havaittavissa useampia eri amplitudeja mutta niiden huippujen olevan pienempiä kuin referenssimittauksessa. Lisääntyneet amplitudit kertovat värähtelytason kasvusta yleistasolla laakerissa epäpuhauksien osuessa vierintäkehille ja vierintäelementteihin. Taajuustason tarkastelussa ei ole merkittäviä eroja referenssimittaukseen.



Kuva 52. Laakerin 6 nopeussignaalin vertailu aika- ja taajuustasossa referenssimittaukseen. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

4.2 Tulosten analysointi

Laakerit 1, 2 ja 3

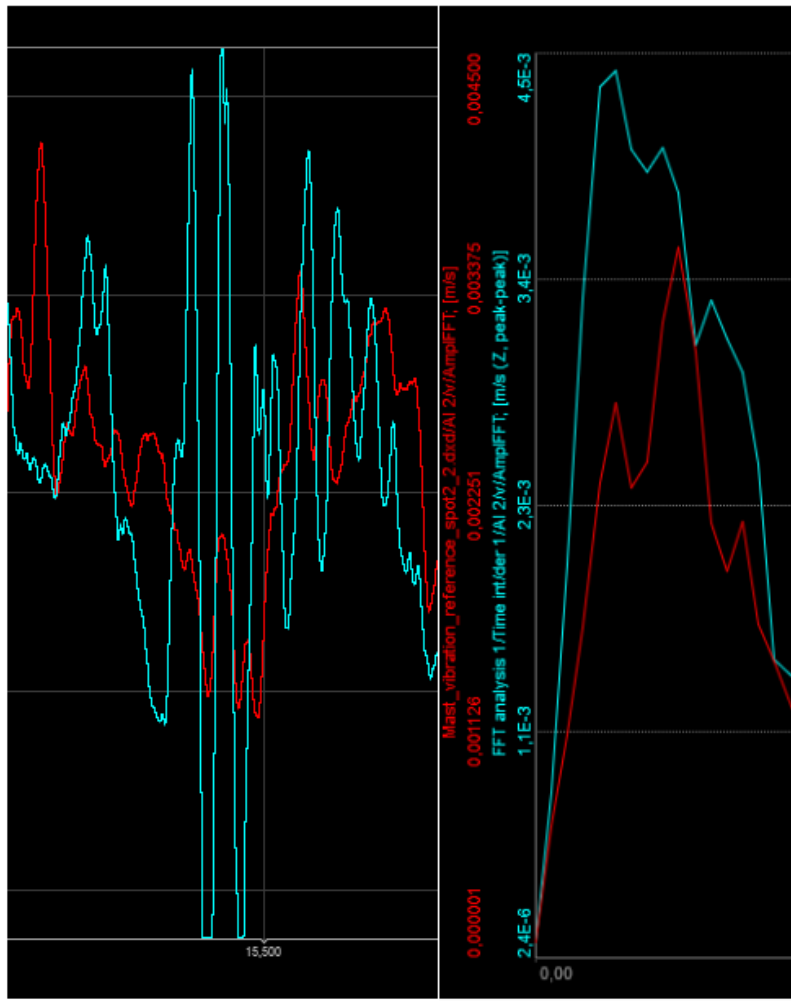
Laakereissa 1,2 ja 3 vauriot olivat ulkokehällä lievästä vauriosta suureen. Vanhempien kollegoiden mukaan useimmat vauriot maston laakereissa syntyvät juuri ulkokehälle. Syitä voivat olla esimerkiksi virhe materiaalissa, ulkoiset epäpuhtaudet maston johteessa tai laakerin voitelun pettäminen, jolloin laakerin ulkopinnan ja johteen välille syntyy metallikosketus. Laakerin materiaali on yleisesti ottaen kovempaa kuin maston johteen, jolloin uudessa mastossa laakereiden hakiessa paikkaansa johteessa laakeri usein irrottaa johteesta metallia. Tämä metallisilppu voi pakkaantuessa vaurioittaa myös laakerin ulkokehää.

Lievimmän laakerivaurion kohdalla (laakeri 1) oli heti havaittavissa amplitudipiikit aikatasossa vaurioituneen kohdan osuessa johteeseen jokaisella laakerin kierroksella. Syy, miksi amplitudi piikkejä ei ole kahta jokaista laakerin kierrosta kohden, on maston kelkan suunnittelu siten, että haarukoilla ollessa taakkaa kelkan yläpäähän laakerit nojaavat johteen etuosaan ja kelkan alapäähän laakerit johteen takaosaan. Toleranssit kelkan suunnittelussa ovat siis niin suuret, että kelkka ikään kuin kelluu ilman taakkaa johteen välissä. Taajuustason tarkastelussa voidaan havaita hieman kasvaneita värähtelyarvoja, mutta vertailtaessa useampia mittauksia toisiinsa näitä ei voida suoraan pitää laakerista johtuvana värähtelyn kasvuna vaan johtuvan pikemminkin yksittäisistä muutoksista mittauksen aikana. Laakeri pyörähtää akselinsa ympäri johteessa vain neljä kertaa maston laskun aikana, ja näistä pyörähdyksistä aiheutuvat värähdykset näkyvät selkeästi aikataason kiihtyvyyssignaalin. Kuitenkin taajuustasosta näitä herätteitä on hankala löytää, sillä taajuustason kiihtyvyyssignaali lasketaan keskiarvotettuna koko mittauksesta, jolloin ne hukkuvat maston suureen ominaisvärähtelyyn.

Yleensä tapauksissa, joissa pyörintänopeudet ovat hitaita, on suositeltavissa käyttää kiihtyvyyssignaalin sijaan nopeussignaalia. Kunnonvalvonnassa ei ole varsinaista määritelmää sille mikä tämä hidas pyörintänopeus on, mutta omien

havaintojeni ja lukuisista lähteistä tutkimani materiaalin perusteella hidas pyörintänopeus on jossain 500 rpm - 1000rpm:n tienoilla. Kyseisessä mastossa nopeimmin pyörivien laakereiden suurimmat kierrosnopeudet ovat 44 rpm (mitattava laakeri). Tämä antaa hieman osviittaa siihen, että nopeussignaalisissa erot pienivät huomattavasti ja kiihtyvyyssignaalilla aikatasossa aiemmin nähty amplitudihiikki on vaikeampi havaita.

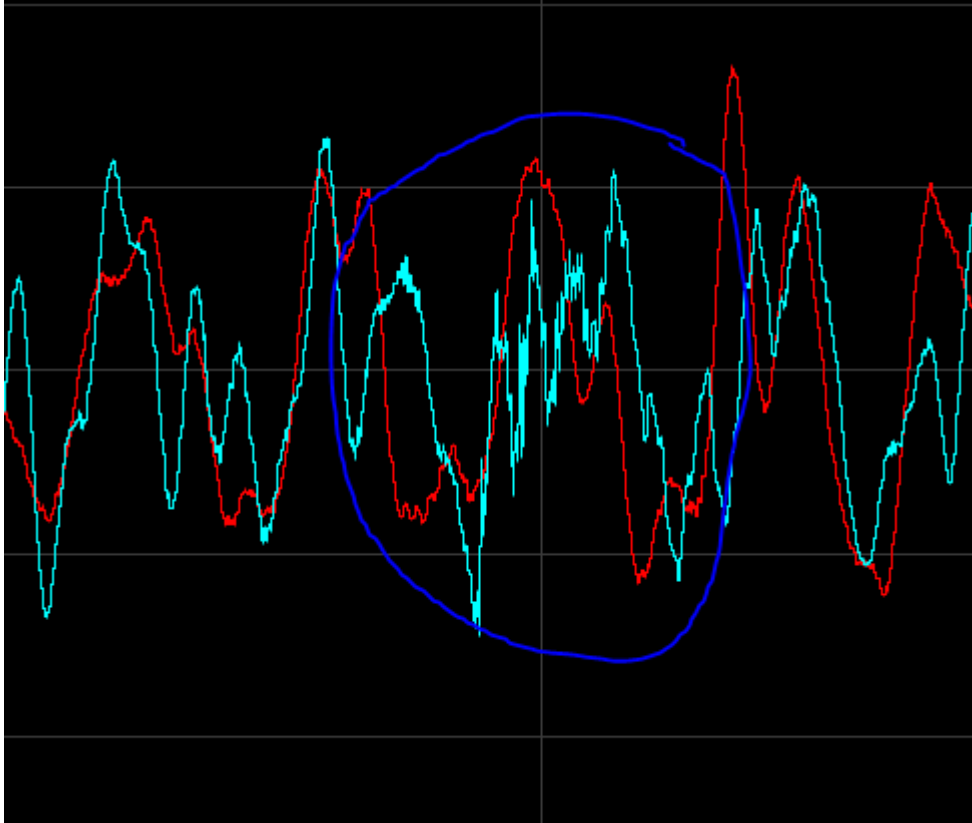
Keskisuuren laakerivaurion (laakeri 2) kohdalla on nähtävissä samat amplitudihiikit aikatasossa kuin ensimmäiselläkin laakerilla, tällä kertaa huippuarvojen hieman kasvaessa. Tulos oli odotettavissa, sillä myös vaurio oli suurempi. Tällä kertaa kuitenkin myös nopeussignaalin aikatasossa oli havaittavissa laakerivaurion aiheuttamat amplitudit. Myös taajuustasossa on havaittavissa värähtelyn kasvua. Kyseisessä analyysissä käytettiin eri mittapistettä, jonka suuntana oli y-akselin värähtely, kuin laakerin yksi kohdalla, mikä saattaa omalla osallaan selittää myös nopeussignaalisissa havaittavaa vaihtelua. Laakerivaurion aiheuttamat amplitudihuiput ovat nopeussignaalisissa n. $-0,0045 \text{ m/s}$ - $0,0045 \text{ m/s}$, ja vertaamalla tätä taajuustasoon on samoja nopeuksia havaittavissa sekä $4,88 \text{ Hz}$:n että $6,1 \text{ Hz}$:n taajuudella (kuva 52). Tällä perusteella laakerin ulkokehän aiheuttaman vaurion voisi olettaa näkyvän tällä hyvin matalalla taajuusalueella. On kuitenkin otettava huomioon, että kaikissa mittauksissa, sekä ehjällä laakerilla että vaurioituneella laakerilla, taajuustason huiput sijoittuvat aina tälle samalle alueelle. Myös koska taajuustasossa FFT-analyysi laskee keskiarvon koko mittauksen värähtelystä, ei voi aukottomasti todeta, että juuri tällä kyseisellä taajuusalueella näkyisi laakerivaurio eikä maston jokin muu ominaisvärähtelyn taso.



Kuva 52. Amplitudihuiput aikatasossa verrattuna taajuustasoon, aikataso vasemmalla ja taajuustaso oikealla. Referenssiarvo punaisella ja mittausrvo vaaleansinisellä.

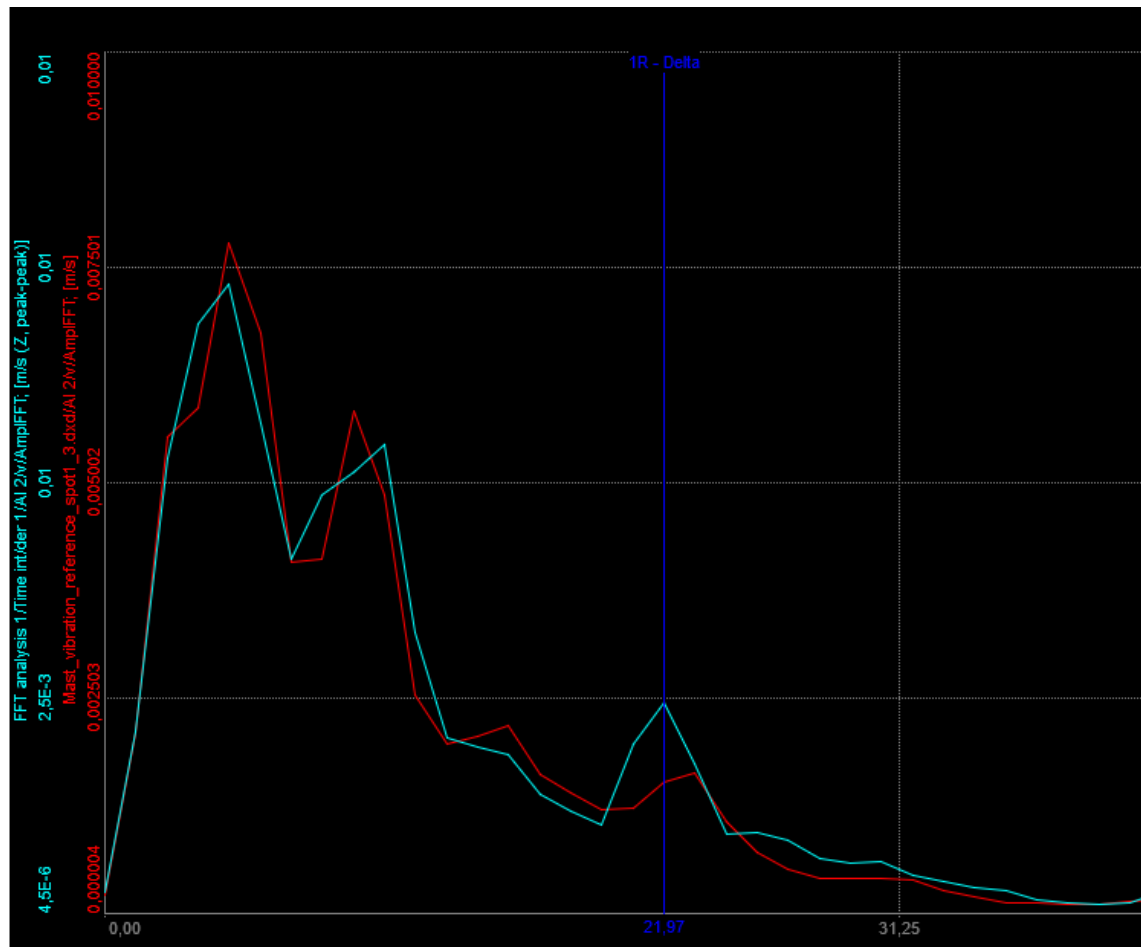
Suurimman ulkokehän vaurion mittauksissa (laakeri 3), kiihtyvyyssignaalin aikatasossa oli havaittavissa jokaisella laakerin kierroksella kolme suurta amplitudihuippua (kolme vierekkäistä viiltoa laakerin ulkokehällä). Kuitenkaan taajuustason analyysin vertailussa referenssiarvoihin ei näkynyt suuria amplitudimuutoksia matalilla taajuusalueilla. Ensimmäinen isompi huippu referenssiarvoihin verrattuna on 89,11 Hz:n kohdalla ja seuraavat muutokset 250Hz:n - 300Hz:n taajuudella. Erot ovat kuitenkin niin marginaalisia, että pidän niitä vain mittauserätarkkuutena enkä vauriosta johtuvana värähtelynä. Nopeussignaalin aikatasossa näkyy samoilla ajanhetkillä kuin kiihtyvyyssignaalin useita amplitu-

deja niiden huippujen jäädessä kuitenkin matalammalle kuin referenssimittauksessa. Aikatasosta on kuitenkin havaittavissa laakerin pyörähdykset rikkonaisempina nopeussignaalin amplitudeina kuin referenssissä (kuva 53).



Kuva 53. Laakerivaurion herätteet nopeussignaalin aikatasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

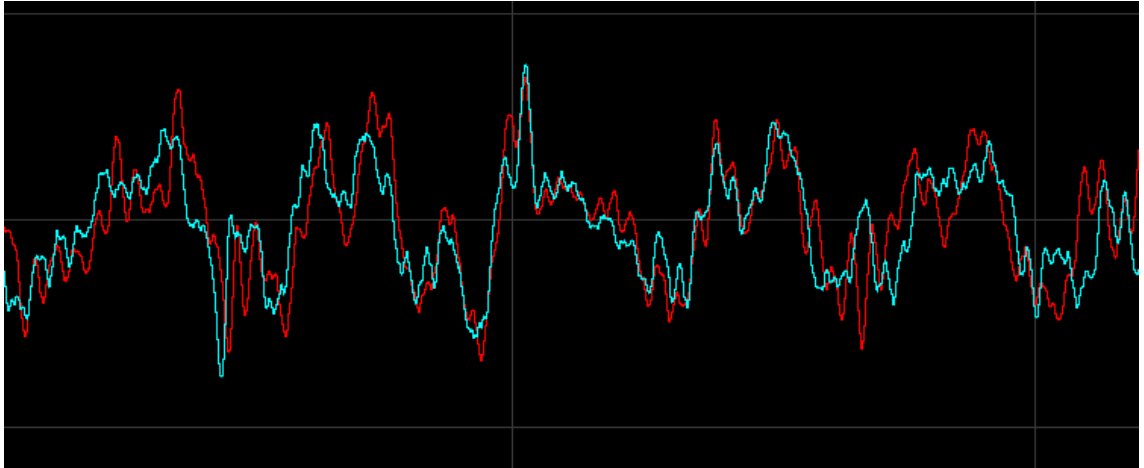
Taajuustasossa (kuva 54) ainoa havaittava ero on 21,97 Hz:n alueella nopeudella 0,0025 m/s, jolle myös ylläolevassa kuvassa 53 korostettu laakerivaurion aiheuttamat herätteet osuvat. Tämän perusteella ulkokehän laakerivaurio taas esiintyisi taajuudella 21,97 Hz, mikä ei täsmää aiemmin mitatun laakerin 2 värähtelytasoon.



Kuva 54. Nopeussignaalin taajuustasossa näkyvä 0,0025 m/s:n amplitudipiikki 21,97 Hz:n taajuudella. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Laakeri 5

Laakerissa 5 vaurioita oli aiheutettu yhteen laakerin vierintäelementeistä eli vierintäkuulaan. Vierintäkuulan vaurion aiheuttamat herätteet vaikuttavat olevan liian pieniä aiheuttaakseen selkeästi havaittavia muutoksia värähtelytasossa, todennäköisesti siitä syystä, että laakerin pyörintänopeus on liian hidas. Nopeussignaalin aikatasossa tehtävässä vertailussa referenssimittaukseen on tulokset lähes identtisiä (kuva 55).

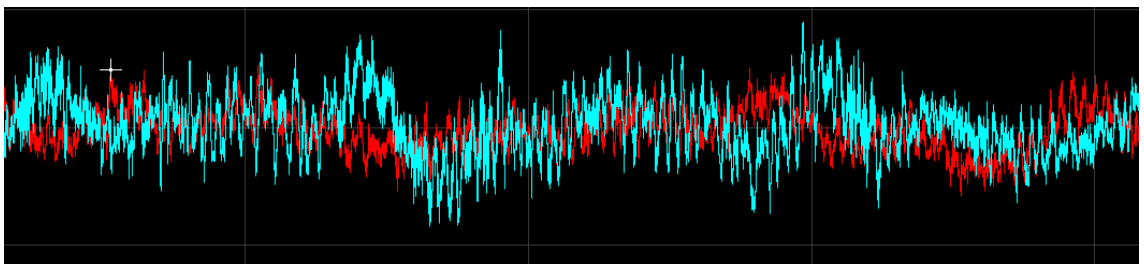


Kuva 55. Nopeussignaalin vertailu referenssimittauksen aikatasossa. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Nopeussignaalin vertailussa referenssiin taajuustasossa on nähtävissä hieman kasvanutta värähtelyä 18Hz - 32 Hz:n taajuusalueella, mutta ero on varsin marginaalinen, n. 0,0005 m/s.

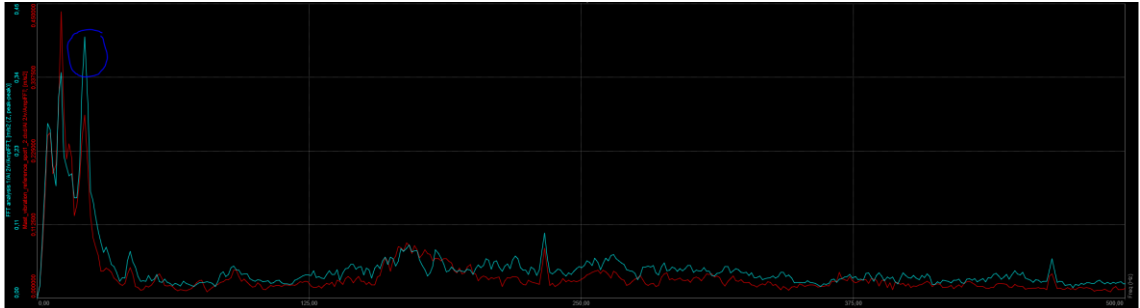
Laakeri 6

Laakerin 6 vauriona oli epäpuhtaus laakerin sisällä. Hiekan kulkiessa laakerin vierintäkehillä ja kuulien sekä pidikkeen välissä voisi helposti olettaa värähtelykokonaistason kasvua käytännössä koko taajuusalueella eikä niinkään yksittäisillä taajuuksilla. Kiihtyvyyssignaalin aikatasossa onkin havaittavissa paljon amplitudivaihteluja referenssimittaukseen verrattuna (kuva 56).



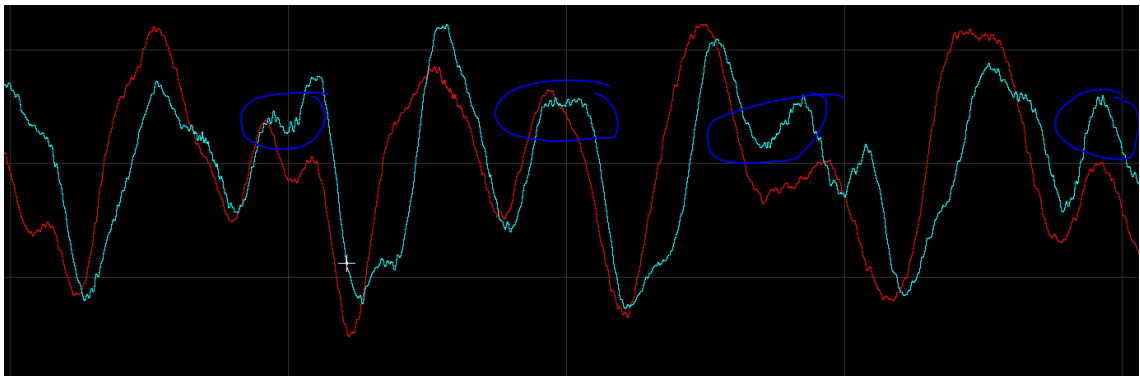
Kuva 56. Amplitudivaihtelua kiihtyvyyssignaalin referenssimittaukseen verrattuna. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Kiihtyvyyssignaalin taajuustasossa on havaittavissa kokonaisvärähtelytason kasvua melkein koko taajuusalueella 0 - 500 Hz sekä erityisesti 21,97 Hz:n taajuuden kasvanut värähtely (korostettu sinisellä kuvassa 57).



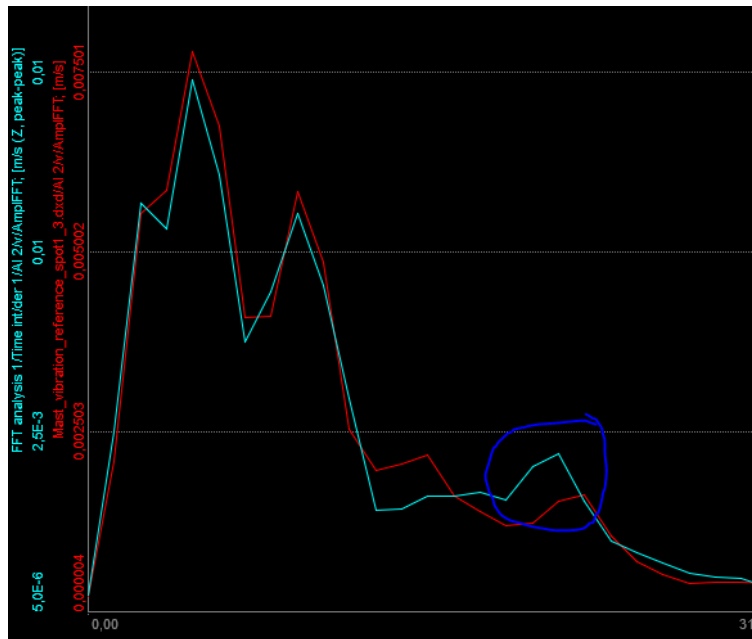
Kuva 57. Kiihtyvyyssignaali taajuustasossa. Kasvanut piikki 21,97 Hz:n taajuudella. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Nopeuden aikatasossa on nähtävissä pientä amplitudin repeilyä 0,002 m/s - 0,0025 m/s:n nopeudella (kuvassa 58 korostettuna sinisellä).



Kuva 58. Nopeussignaalin aikatasossa amplitudin rikkonaisuutta. Referenssiarvo punaisella ja mittausarvo vaaleansinisellä.

Taajuustasossa tämä on nähtävissä hieman kohonneena värähtelynä 21,97 Hz:n taajuudella (kuva 59).



Kuva 59. Nopeussignaalin taajuustasossa kohonnut 21,97 Hz:n amplitudi. Referenssiarvo punaisella ja mittausero vaaleansinisellä.

4.3 Yhteenveto

Ulkokehän ulkopinnan simuloitut laakerivauriot ovat suhteellisen helposti havaittavissa jo kiihtyvyyssignaalin aikatasosta. On vaikea sanoa, kuinka hyvin todellisuutta kuvaavia vauriot ovat, mutta on selvää, että laakerivaurio yksi on näistä todennäköisin. Nopeussignaalin tarkastelusta voi tehdä myös samat havainnot kuin kiihtyvyyssignaaleista hieman maltillisimmilla muutoksilla. Toisaalta taajuustason vertailussa on kiihtyvyyssignaaliilta huomattavasti vaikeampia hahmottaa värähtelytason eroja kuin nopeuden taajuustasosta. Onkin hyödyllistä analysoida aina molemmat tulokset ja näiden ristivertailulla on helpompi päästä vaurion jäljille.

Kuten aiemmin mainittiin, värähtelymittauksia kunnonvalvonnassa ei ole varsinaisesti tarkoitettu kyseessä olevan systeemin kunnonvalvontaan. Työn tehtä-

vänä oli kuitenkin selvittää, olisiko värähtelymittauksia ja kunnonvalvonnan teoria sovellettavissa myös tällaiseen systeemiin, jotta kestopitestissä olevan maston kuntoa voitaisiin tarkkailla hieman ”tieteellisemmin”. Värähtelytiloissa on havaittavissa selkeitä muutoksia myös tällaisessa systeemissä, mutta teorian tarkkuus ja kunnonvalvonnassa annettujen ohjeiden sovellettavuus systeemiin on hieman hakuammuntaa. Yleisesti ottaen jo pelkästään laakereiden hidas pyörimisnopeus sekä varsinkin mastossa tapahtuva jatkuva liike eri suuntiin yhdistettyinä suuriin voimiin tekevät mittauksista erittäin haasteellisia. Teoriaa ja yleisiä käytännöllisiä kunnonvalvonnan standardeja onkin pidettävä tällaisissa mittauksissa vain suuntaa antavina ohjearvoina eikä niinkään kiveen hakattuina sääntöinä.

Jotta maston laakerikomponenttien värähtelystä saatava taajuustason data olisi tarkempaa, tulisi mittaukset todennäköisesti suorittaa hyvin pienellä maston liikealueella erittäin lyhyinä n. 1 - 2 s:n pituisina mittauksina. Näiden mittausten tuloksia keskiarvottamalla ja vertailemalla keskenään voitaisiin päästä tarkempiin tuloksiin laakereiden ominaisvärähtelyn taajuuksista eikä maston kokonaisvärähtely välttämättä sotkisi tuloksia niin paljon.

5 Johtopäätökset

5.1 Työn analysointi

Työn aihe tuli tilaajalta MLE Oy:ltä. Yrityksen tuotekehityksessä on tavoitteena ennen kaikkea uusien ja parempien tuotteiden suunnittelu ja kehitys mutta myös itse tuotekehityksen kehittäminen. Tällaiseen kehityksen kehittämiseen kuuluu oleellisesti testausmenetelmien tutkiminen ja parantaminen mahdollisuuksien mukaan. Koska maston kestopestauksen kunnonvalvonta on tähän mennessä toiminut enimmäkseen havaittajan tekemien näkö- ja kuulohavaintojen perusteella, oli tässä hyvä tilaisuus tutkia muita tapoja kunnonvalvontaan.

Työssä käytiin ensin varsin perusteellisesti lävitse laakereiden sekä värähtelyn teoriaa. On ensiarvoisen tärkeää ymmärtää tutkittavan kohteen ominaisuudet

teoreettisella tasolla ennen käytännön tekemistä, jotta voisi ymmärtää syy-seuraussuhteita.

Varsinainen työn aihe ja toteutus olivat erittäin mielenkiintoisia ja toivottavasti pääsen jatkossakin työskentelemään värähtelyn parissa. Haasteita aiheutti erityisesti se, että vastaavanlaisia systeemeitä ei ole juuri testattu värähtelyanalysoinnilla, joten tietoa oli sovellettava omien kykyjen mukaan parhaaksi katsomallaan tavalla. Tällaisen pioneerityön tekeminen on kuitenkin ehkä se palkitsevin.

5.2 Loppupäätelmät

Työn tavoitteena oli vastata kysymykseen, voiko kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käyttää hyödyksi kertomaan kestotestissä olevan maston laakereiden kunnosta. Vastaukseni kysymykseen on, että voi käyttää, ainakin osittain. Värähtelytilan valvonta antaa yleiskuvaa maston värähtelystä ja sen muutoksista testin aikana. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset on alun perin tarkoitettu hieman erilaisille systeemeille kuin trukin masto, esimerkiksi pyöriville sähkömoottoreille. Kunnonvalvonnan standardit ja ohjeistukset eivät näin ollen yksiselitteisesti sovi tällaiselle systeemille. Standardeista ja ohjeistuksista on kuitenkin suurta hyötyä, vaikka niitä ei voida suoraan soveltaa. Ne antavat ohjeita mm. erilaisista valvontamenetelmistä ja mittapisteiden valinnasta.

Tätä opinnäytetyötä ja siinä tehtyjä testejä ei voi pitää lopullisena vastauksena kysymykseen, vaan suosittelinkin jatkotutkimuksia. Lisäisin seuraavan mastotestin huolto-ohjelmaan värähtelymittaukset. Värähtelymittaukset voitaisiin suorittaa aikataulutetulla valvonnalla jokaisen huollon yhteydessä, jolloin maston värähtelyn kehitystä ja muutoksia voisi seurata testin edetessä. Tämä yhdistettynä havaintojen tekemisiin näkö- ja kuulohavaintoihin voisi antaa lisää tietoa värähtelyspektrien muutoksista.

Värähtelytilanvalvonnan voisi myös automatisoida. Maston kokonaisvärähtelyt kuitenkin vaihtuvat syklistä sykliin ja suuriakin amplitudivaihteluita voi esiintyä

nostojen välillä. Tästä syystä automaattisen värähtelytilanvalvonta olisi säädettävä mittaamaan tiettyä hetkeä työsyklistä, kun maston liike on lineaarisinta, toisin sanoen ylimääräisiä herätteitä pitäisi olla mahdollisimman vähän. Tällainen hetki voisi esimerkiksi olla tässäkin työssä käytetty laskun vaihe, jolloin paine sylintereissä on pienimillään eikä vaiheiden vaihdosta synny iskuherätteitä. Logiikkapiirin olisi ohjelmoitava ajastuksella mittaus tähän hetkeen.

Anturiksi suosittelisin valitsemaan kolmiaksaalisen kiihtyvyyssanturin, jotta yhdellä anturilla saadaan mitattua kaikki suunnat. Kiihtyvyyssanturin herkkyys tulisi olla tarkka, sillä maston liikkuvat komponentit ovat hitaita. Taajuusalueeksi riittää 0 - 10 000 Hz. Automatisointia varten systeemi tarvitsee signaalinmuuntimen logiikkapiirille, esimerkiksi CTC:n valmistama SC310-signaalinmuuntimen, jolla kiihtyvyyssanturilta tulevan signaalin voi ohjata logiikkaan lineaarisena suureena. Logiikkaohjelmistossa voisi säätää esimerkiksi hälytystasot signaalille ja ajastimen mittaushetkille.

Lähteet

- 1 Mechanical Endurance Testing. Verkkoaineisto. Qualitytest.net. <<https://qualitytest.net/testing-services/mechanical-endurance/>>. Luettu 10.6.2022.
- 2 Harris, Tedric A. & Kotzalas, Michael N. 2007. Rolling Bearing Analysis: Essential Concepts of Bearing Technology. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis cop.
- 3 SKF-laakerien asennus ja huolto. Verkkoaineisto. Taitotalo. <<https://www.taitotalo.fi/koulutus/mekaaninen-kunnossapito/928/skf-laakerien-asennus-ja-huolto>>. Luettu 14.6.
- 4 Bearing parts. Verkkoaineisto. ISB Sport. <<https://www.isbsport.com/ebearing-parts/>>. Luettu 14.6.
- 5 SKF 6313-ZZ, Single row deep groove ball bearing. Verkkoaineisto. i4 Mart. <<https://www.i4mart.com/skf-6313-zz-single-row-deep-groove-ball-bearing-sgh>>. Luettu 15.6.
- 6 SKF Double row deep groove ball bearing Steel Open 4301 ATN9. Verkkoaineisto. Eriks. <<https://shop.eriks.be/en/bearings-ball-bearings-deep-groove-ball-bearings/double-row-deep-groove-ball-bearing-steel-open-4301-atn9-23757238/>>. Luettu 15.6.
- 7 Cylindrical roller bearings. Verkkoaineisto. Schaeffler. <https://www.schaeffler.fi/fi/products-and-solutions/industrial/product-portfolio/rolling_and_plain_bearings/cylindrical_roller_bearings/index.jsp>. Luettu 15.6.
- 8 Needle roller bearings. Verkkoaineisto. Schaeffler. <https://www.schaeffler.fi/fi/products-and-solutions/industrial/product-portfolio/rolling_and_plain_bearings/needle_roller_bearings/index.jsp>. Luettu 15.6.
- 9 Rolling Bearing Damage: Recognition of damage and bearing inspection. 2008. Schweinfurt: Schaeffler cop.
- 10 Bearing damage and failure analysis. 2017. SKF Group.

- 11 Inman, Daniel J. 2008. Engineering Vibration. Upper Saddle River, NJ: Pearson, Prentice Hall.
- 12 Mäkelä, Lauri. Aaltoliike, osa 1. Verkkoaineisto. Peda.net. <<https://peda.net/siikalatva/siikalatvan-lukio/oppiaineet/fysiikka/fy82/om/aaltoliike-osa-1>>. Luettu 16.6.2022.
- 13 Crawford, Arthur R. 1992. The Simplified Handbook of Vibration Analysis Volume 1: Introduction to Vibration Analysis Fundamentals. Knoxville, TN: Computational Systems, Inc.
- 14 Machine Dynamics. Verkkoaineisto. Lappeenranta University of Technology. <Course: BK70A0501 Machine Dynamics - Full digi / 100% verkossa 31.8.2020-13.12.2020, Topic: Topic 1 (lut.fi)>. Luettu 2.9.2022.
- 15 Sinusoidal Motion Calculator. Verkkoaineisto. Spaceagecontrol. <<https://www.spaceagecontrol.com>>. Luettu 6.7.2022.
- 16 Suvanto, Kari & Laajalehto, Kari. 2015. Tekniikan fysiikka 2. Helsinki: Edita.
- 17 Forced vibrations of damped single degree of freedom systems: Damped spring mass system. Verkkoaineisto. Engineering at Alberta. <<https://engcourses-uofa.ca/books/vibrations-and-sound/forced-vibrations-of-damped-single-degree-of-freedom-systems/damped-spring-mass-system/>>. Luettu 6.7.2022.
- 18 Nogueira, Nuno 2007. Dependence of the system on the value of the damping ratio ζ . Verkkoaineisto. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Harmoninen_v%C3%A4r%C3%A4hte-lij%C3%A4#/media/Tiedosto:Damping.svg>. Luettu 7.7.2022.
- 19 Geek3 2015. Steady-state variaton of amplitude with relative frequency and damping of a driven simple harmonic oscillator. Verkkoaineisto. <https://en.wikipedia.org/wiki/Resonance#/media/File:Mplwp_resonance_zeta_envelope.svg>. Luettu 7.7.2022.
- 20 Gjelstrup, Soren Linnet 2021. FFT Analysis (Fast Fourier Transform): The Ultimate Guide to Frequency Analysis. Verkkoaineisto. <<https://dewesoft.com/daq/guide-to-fft-analysis>>. Luettu 27.6.2022.

- 21 SFS-ISO 13373-1. Koneiden kunnonvalvonta ja diagnostiikka. Värähtelytilan valvonta. 2016. Helsinki: Suomen standardisointiliitto.
- 22 Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. 2019. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 23 J14100 Acceleration sensor. Verkkoaineisto. Abcgeluid. <<https://geluid.eu/gb/basic-accelerosensors/j14100-acceleration-sensor>>. Luettu 18.7.2022.
- 24 Vibration Measurements. Verkkoaineisto. Dewesoft. <<https://training.dewesoft.com/online/course/vibration-measurement#choosing-the-mounting-position-for-the-accelerometer>>. Luettu 18.7.2022.
- 25 PSK 5702. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 26 PSK 5703. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 27 Universal-Beschleunigungsaufnehmer General Purpose Accelerometers. MMF. Verkkoaineisto. <<https://www.mip.fi/images/docs/fi/1-7-1.pdf>>. Luettu 21.7.2022.
- 28 Hiltunen, E.; Linko, L.; Hemminki, S.; Hägg, M.; Järvenpää, E.; Saarinen, P.; Simonen, S. & Kärhä, P. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Espoo: Metrologian Neuvottelukunta. Saatavilla <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>>.
- 29 Kiviluoma, Panu. 2019. Kone- ja rakennustekniikan laboratorio-työt. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1069307/mod_resource/content/11/KON-C3004_Mittausepavarmuus_ja_raportointi_2019.pdf>. Luettu 6.10.2022.
- 30 PSK 5707. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.