

Jukka Saarimäki

UUSIEN DIESELMOOTTOREIDEN VÄ- RÄHTELYMITTAUKSEEN PERUSTUVA KUNNONVALVONTA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Syyskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Jukka Saarimäki: Uusien dieselmootoreiden värähtelymittaukseen perustuva kunnonvalvonta
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2019

Dieselmootorin toiminnalliset komponentit herättävät mekaanista värähtelyä moottorin käytössä. Jokainen komponentti värähtelee sille ominaisella taajuudella, joka vaihtelee moottorin pyörimisnopeuden mukaan. Värähtely johtuu moottorin rakenteessa tyypillisesti vaimentuen ja sen voimakkuus vaihtelee riippuen sijainnista.

Komponenttien herättämä värähtely on mitattavissa mistä tahansa pisteestä moottorista. Värähtelyn tyypillinen mittauskalusto koostuu värähtelymitta-anturista, analogidigitaalimuuntimesta, mittalaitteesta ja siihen yhdistetystä tietokoneesta. Mittaussignaali kulkeutuu johdinta pitkin muuntimelle ja mittalaitteelle käsiteltäväksi. Tietokoneella voidaan tarkastella ja käsitellä mittalaitteen mittaamaa signaalia.

Värähtelymittaukseen perustuvassa kunnonvalvonnassa seurataan erityisesti mitatun värähtelyn taajuussisältöä. Värähtelymittauksessa havaittava poikkeavuus normaaliin verrattuna voidaan yhdistää poikkeavuuden taajuuden mukaisesti värähtelyä herättävään komponenttiin. Havaittu poikkeavuus todennäköisesti tarkoittaa vikaa värähtelyä herättävässä komponentissa.

Sarjatuotannossa olevien dieselmootorien koekäytön aikaisten mittaustulosten tilastollisella tarkastelemisella pystytään määrittämään moottorin värähtelyn tyypillinen käyttäytyminen. Näin ollen saadaan määritettyä mittaustilaston mukaisesti hyväksyntäraajat moottorin värähtelylle. Moottorin värähtelymittaustuloksen ylittäessä tilastoon perustuvan hyväksyntärajan, voidaan moottori todeta vialliseksi.

Erilaiset vikatilanteet näkyvät mittaustuloksissa eri tavoilla, jolloin tarvitaan kokemusta erilaisista vikatilanteista johtopäätöksiä tekemiseksi. Tekoälyn mahdollinen yhdistäminen värähtelyn data-analytiikkaan tehostaa kunnonvalvontaprosessia edelleen.

Avainsanat: värähtelymittaus, kunnonvalvonta, dieselmootori, tilastolliset menetelmät, data-analyysi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Jukka Saarimäki: Condition monitoring of new diesel engines based on vibration measurement
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
September 2019

The functional components of the diesel engine generate mechanical vibration while the engine is running. Each component vibrates at a specific frequency that varies with engine speed. The vibration is typically damping due to the engine structure and its intensity varies depending on the location.

The vibration generated by the components can be measured at any point on the engine. Typical vibration measuring equipment consists of a vibration measuring transducer, an analog-to-digital converter, a measuring device and a computer connected to it. The measurement signal is passed along the conductor to the converter and the meter for processing. The computer displays and processes the signal measured by the measuring device.

Condition monitoring based on vibration measurement specifically monitors the frequency content of the measured vibration. The deviation observed from the vibration measurement relative to normal can be combined with the vibrating component according to the frequency of the deviation. The observed anomaly is likely to indicate a defect in the vibrating component.

By statistically examining the results of test runs of serially produced diesel engines, it is possible to determine the typical vibration behavior of the engine. According to the measurement statistics, the acceptance limits for the engine vibration can be determined. When the result of the vibration measurement of the engine exceeds the statistical acceptance limit, the engine may be identified as faulty.

Different fault situations are reflected in the measurements in different ways, which requires experience of different fault situations to draw conclusions. The possible integration of artificial intelligence with vibration data analytics will further enhance the condition monitoring process.

Keywords: vibration measurement, condition monitoring, diesel engine, statistical methods, data-analysis

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana konetekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa Tampereen yliopistossa. Diplomityön aihe muodostui AGCO Power Oy:ltä dieselmoottorien värähtelymittaukseen liittyvän laadunparannusprojektin yhteydessä. Tätä haasteellista diplomityötä tehdessäni olen oppinut paljon uutta dieselmoottoreista ja mekaanisesta värähtelystä sekä kunnonvalvonnan periaatteista.

Työn toteuttamisen mahdollistivat AGCO Powerilta ohjaajani Jussi Immonen ja ohjauksessa mukana olleet Velipekka Mellin, Antti Huttunen sekä käytännön järjestelyt mahdollistanut Petri Ruoho. Tampereen yliopistolta työn ohjauksessa ja tarkastamisessa mukana olivat dosentti Juha Miettinen ja professori Kari Koskinen. Kiitos erityisesti näille henkilöille ja muille diplomityön etenemisessä avustaneille.

Tampereella, 15.9.2019.

Jukka Saarimäki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	MEKAANINEN VÄRÄHTELY	3
2.1	Viskoosisesti vaimennettu värähtelymekanismi	3
2.2	Harmoninen pakkovärähtely	5
2.3	Värähtelyn herätteet dieselmootorissa	6
2.3.1	Pyörivän komponentin aiheuttama heräte	6
2.3.2	Palotapahtuman aiheuttama heräte	7
2.3.3	Paikalliset herätteet.....	9
2.3.4	Asennus- ja valmistusvirheen aiheuttamat herätteet	10
2.4	Komponentin taajuusvaste ja ominaistaajuus	11
2.5	Resonanssi ja sen vaikutus moottorissa	12
3.	POLTTOMOOTTORIN VÄRÄHTELYN MITTAAMINEN	14
3.1	Moottorin kunnonvalvonta värähtelymittauksilla	14
3.2	Mitattavat suureet	15
3.3	Mittausanturi	15
3.3.1	Anturityypit värähtelyn suureille.....	16
3.3.2	Pietsosähköisellä kiihtyvyyssanturilla mittaaminen.....	16
3.3.3	Kolmiakselinen kiihtyvyyssanturi.....	18
3.3.4	Kosketuksettomat anturit.....	18
3.4	Värähtelyn mittauslaitteisto	18
3.4.1	Tyypillisiä laitteistoja	20
3.4.2	Värähtelymittaukseen perustuva kunnonvalvontalaite.....	20
3.5	Mittaus tilanne tuotannon koekäytössä	22
4.	MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI.....	24
4.1	Aikataso	24
4.2	Taajuustaso.....	25

4.3	Kertalukuesitys	26
4.4	Kertalukulaskin	27
5.	POLTTOMOOTTORIN DIAGNOSTIIKKA	30
5.1	Mittaustulosten tilastollinen tarkastelu.....	30
5.2	Mittaustulosten virhelähteiden arviointi	31
5.2.1	Mittaustapahtuman virheet.....	31
5.2.2	Mittauskaluston virhelähteet.....	32
5.2.3	Moottorin ominaisuuksien aiheuttama hajonta	34
5.3	Mittaustulosten vertailukelpoisuus	35
5.3.1	Vesiputousesitys	36
5.3.2	Tilastolliset tunnusluvut.....	39
5.4	Poikkeavien moottoriyksilöiden tunnistaminen.....	41
5.4.1	Toleranssirajat ja laatuindeksit	41
5.4.2	Kurtoosi	44
5.4.3	Kontrollikaavio	45
5.4.4	Tilastollisen jakaumaan sovittaminen	49
5.5	CASE: Dieselmoottorin keinotekoiset vikatilanteet.....	52
5.5.1	Virheellinen imuventtiilin vällys.....	52
5.5.2	Poikkeavan ainemäärän ruiskutussuutin	54
5.5.3	Ajoituksen välihammaspyörän hammasvika.....	56
5.5.4	Virheellinen öljypumpun hammaspyörän vällys.....	60
5.5.5	Viallinen kampiakselin värinävaimennin	64
5.6	Tulevaisuuden kehitysmahdollisuudet	66
5.6.1	Kehittäminen tuotannossa.....	67
5.6.2	Muu kehittäminen.....	69
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	72
	LÄHTEET	77

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Yhden vapausasteen värähtelijä. (Adams 2010)</i>	<i>3</i>
Kuva 2.	<i>Vaimennuskertoimen vaikutus värähtelyyn. (Sinha 2010)</i>	<i>5</i>
Kuva 3.	<i>Staattinen epätasapainotilanne vasemmalla ja dynaaminen epätasapainotilanne oikealla. (Thomson 1989)</i>	<i>7</i>
Kuva 4.	<i>Nelitahtisen dieselmoottorin työkierto. (Tikkanen 2017)</i>	<i>8</i>
Kuva 5.	<i>Kampiakselin vääntömomentin suuruus kampiakselin pyörimiskulman mukaan. (Horvath, Egert 2015).....</i>	<i>9</i>
Kuva 6.	<i>Vierintälaakerien sysäystaajuuksien laskukaavat. (PSK5707 2011)</i>	<i>10</i>
Kuva 7.	<i>Taajuusvastefunktion lohkokaavio.....</i>	<i>11</i>
Kuva 8.	<i>Vaimennuskertoimen vaikutus vahvistuskertoimeen ja vaihekulman muutosnopeuteen. (Adams 2010)</i>	<i>12</i>
Kuva 9.	<i>Pietsosähköisen anturin toimintaperiaatteet järjestyksessä puristus, taivutus ja leikkaus. (PCB Piezotronics a)</i>	<i>17</i>
Kuva 10.	<i>Seismisen massan edestakaisen liikehdinnän muodostama sinisignaali. (PCB Piezotronics b)</i>	<i>17</i>
Kuva 11.	<i>Tyypillinen värähtelymittalaitteisto.....</i>	<i>19</i>
Kuva 12.	<i>Kunnonvalvontalaitteen yleinen toiminta.</i>	<i>21</i>
Kuva 13.	<i>Kiihtyvyyssanturin kiinnitysmekanismi tuotannon koekäytössä.</i>	<i>23</i>
Kuva 14.	<i>Kunnonvalvontalaitteen aikataason signaali.....</i>	<i>24</i>
Kuva 15.	<i>Aikataason signaalin muodostuminen taajuuskomponenteista. (Adams 2010)</i>	<i>25</i>
Kuva 16.	<i>Kertalukujen näkyminen kaltevina viivoina vesiputousesityksessä. (Mercer 2001)</i>	<i>27</i>
Kuva 17.	<i>Kertalukulaskimen rakenteen malli.....</i>	<i>28</i>
Kuva 18.	<i>Lasketut kertaluvut yhdistettyinä mittausdataan.</i>	<i>29</i>
Kuva 19.	<i>Resonanssialueen näkyminen mittaustuloksen kertalukuesityksessä.....</i>	<i>32</i>

Kuva 20.	<i>Sähköhäiriön näkyminen hajonnan kasvamisena moottorikohtaisissa mittaustuloksissa.</i>	33
Kuva 21.	<i>Amplitudin jakaantuminen ja poikkeaminen.....</i>	34
Kuva 22.	<i>Vesiputousesitys 6-sylinterisen moottorimallin mittaustuloksista.</i>	36
Kuva 23.	<i>Vesiputousesitys kahden erilaisen moottorityypin mittaustuloksista.</i>	38
Kuva 24.	<i>Kunnonvalvontalaitteen muodostama toleranssiraja sinisenä viivana ja mittaustulos punaisena viivana.....</i>	42
Kuva 25.	<i>Mittaustuloksen poikkeamakuvaaja toleranssirajoihin nähden.....</i>	43
Kuva 26.	<i>Laatuindekseihin perustuva tilastollinen analyysi.</i>	44
Kuva 27.	<i>Kurtoosi arvojen muodostuminen aikatazon signaalista. (Reilhofer 2016)</i>	45
Kuva 28.	<i>Kontrollikaavio moottorin paineilmakompressorin pyörimistaajuuden kertaluvulta</i>	46
Kuva 29.	<i>Kertaluvun 0,5 yhdistetty kontrollikaavio.....</i>	47
Kuva 30.	<i>Kertaluvun 1,0 yhdistetty kontrollikaavio.....</i>	48
Kuva 31.	<i>Kertaluvun 3,0 yhdistetty kontrollikaavio.....</i>	49
Kuva 32.	<i>Kuusisylinterisen moottorityypin kertaluvun 4,5 amplitudiarvojen histogrammi.</i>	50
Kuva 33.	<i>Kuusisylinterisen moottorityypin kertaluvun 3 amplitudiarvojen histogrammi.</i>	51
Kuva 34.	<i>Säädetty imuventtiili ja vaihdettu ruiskutusputki.....</i>	52
Kuva 35.	<i>Suuren imuventtiilivällysmittauksen spektri verrattuna normaaleihin.</i>	54
Kuva 36.	<i>Välihammaspyörään tehty kolhu.</i>	56
Kuva 37.	<i>Normaalin käymättömän moottorin aikatazon signaali.....</i>	57
Kuva 38.	<i>Käymättömän moottorin aikatazon signaali viallisella välihammaspyörällä.</i>	58
Kuva 39.	<i>Normaalin käymättömän moottorin kurtoosi.</i>	58
Kuva 40.	<i>Käymättömän moottorin kurtoosi viallisella välihammaspyörällä.</i>	59
Kuva 41.	<i>Käymättömän moottorin mittaustuloksen spektri punaisella ja toleranssiraja sinisellä.</i>	60

Kuva 42.	<i>Säädetty öljypumpun hammaspyörän vällys.</i>	61
Kuva 43.	<i>Käymättömän moottorin aikatazon signaali öljypumpun hammaspyörän virheellisellä vällyksellä.</i>	62
Kuva 44.	<i>Käymättömän moottorin kurtoosi öljypumpun hammaspyörän virheellisellä vällyksellä.</i>	62
Kuva 45.	<i>Käymättömän moottorin kertalukuesitys öljypumpun hammaspyörän virheellisellä vällyksellä.</i>	63
Kuva 46.	<i>Vaihdettu värinävaimennin.</i>	65
Kuva 47.	<i>Normaalin moottorin mittaustulos punaisella ja viallisella värinävaimentimella mustalla.</i>	66

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Alkuperäinen anturin kiinnitin.</i>	<i>40</i>
<i>Taulukko 2. Uudistettu anturin kiinnitin.</i>	<i>40</i>
<i>Taulukko 3. Laatuindeksien laskentaesimerkki.....</i>	<i>43</i>
<i>Taulukko 4. Kertaluvun 0,5 amplitudiarvot erilaisilla imuventtiilivälyksillä.</i>	<i>53</i>
<i>Taulukko 5. Maksimiväännön kuormitustilanteen amplitudiarvot.</i>	<i>55</i>
<i>Taulukko 6. 0,5 kertaluvun amplitudiarvot kahdella kuormitustasolla.</i>	<i>55</i>
<i>Taulukko 7. Öljypumpun hammaspyörän virheellisen välyksen amplitudiarvot.</i>	<i>63</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Symbolit

a	kiihtyvyys
c	vaimennuskerroin
c_k	kriittinen vaimennuskerroin
d	laakerin vierintäelimen halkaisija
D	laakerin toimintahalkaisija
e	neperin luku
F	ulkoinen voima
F_0	herätteen amplitudi
f_p	laakerin pidikkeen sysäystaajuus
f_r	laakerin rullan/kuulan sysäystaajuus
f_s	laakerin sisäkehän sysäystaajuus
f_u	laakerin ulkokehän sysäystaajuus
k	jousivakio
m	massa
N	laakerin vierintäelinten lukumäärä
n	laakerin sisä- ja ulkokehän välinen pyörimisnopeus
t	aika
\bar{u}_{st}	staattinen siirtymävaste
V	vahvistuskerroin
v	nopeus
x	siirtymä
X	poikkeama tasapainotilasta
\dot{x}	nopeus
\ddot{x}	kiihtyvyys
X_0	maksimipoikkeama tasapainotilasta
β	laakerin kuormituksen toimintakulma
ζ	suhteellinen vaimennuskerroin
λ	karakteristinen juuri
φ_F	herätteen vaihekulma
Ω	herätteen kulmataajuus
ω	ominaiskulmataajuus

1. JOHDANTO

Pyörivät koneet aiheuttavat toimiessaan mekaanista värähtelyä, jonka mittaaminen on mahdollista erilaisilla värähtelymitta-antureilla. Koneen toiminnalliset osat herättävät värähtelyä niille ominaisella taajuudella, jolloin mitatun värähtelyn taajuussisältöä tutkimalla on mahdollista tehdä päätelmiä näiden osien värähtelystä. Värähtelymittaukseen perustuvassa kunnonvalvonnassa on tarkoituksena havaita toiminnan aikaisia vikatilanteita värähtelyn voimakkuuden muutoksia tutkimalla. Nykyaikaisilla värähtelymittalaitteistoilla kunnonvalvonta on tehokasta ja tarkkaa.

Uusien dieselmoottorien koekäytön aikaisella kunnonvalvonnalla pyritään havaitsemaan mahdollisia valmistus- ja kokoonapanovirheistä johtuvia vikatilanteita. Vikatilanteiden havaitsemisen lisäksi voidaan paikallistaa viallinen tai vialliset moottorin komponentit. Kunnonvalvonnan tavoitteena on välttää valmistusvirheellisten moottorien asiakkaalle toimitaminen tuotannosta ja samalla tehostetaan valmistusvirheellisten moottoriyksilöiden korjausprosessia. Tällä toimintatavalla saadaan parannettua laatua ja sen kautta asiakastytyväisyyttä sekä välttyään ylimääräisiltä kustannuksilta.

Työn kohdeyrityksenä on Nokian Linnavuoressa toimiva AGCO Power Oy. AGCO Power valmistaa maatalouskoneissa käytettäviä dieselmoottoreita ja on osa maatalouskoneita valmistavaa AGCO konsernia. AGCO Power on konsernin ainoa moottorivalmistaja ja on sen vuoksi hyvin tärkeä osa globaalisti toimivaa konsernia. Suomessa AGCO konserniin kuuluu myös traktorivalmistaja Valtra.

Tässä diplomityössä esitellään mekaanisen värähtelyn ja värähtelyn mittaamisen perusteoria. Kerrotaan kohdeyrityksen tuotannon koekäytössä olevasta värähtelymittalaitteistosta ja mittaustapahtumasta. Esiteltäviin teorioihin perustuen kerrotaan mittaustulosten tilastollisista analysointitavoista, jotka toimivat työkaluina viallisten moottoriyksilöiden löytämisessä. Mittaustulosten analysointiin liittyen myös viallisen moottoriyksilön diagnoosin muodostumisen etenemistä esitellään.

Käsiteltävä värähtelymittausdata on kohdeyrityksen dieselmoottorien koekäytön aikaisista värähtelymittauksista. Mittaukset on tehty työssä esiteltävällä kunnonvalvontalaitteella ja esiteltävällä mittaustavalla. Työssä käsitellään pääasiassa kuusisynteristen

moottorien värähtelymittausdataa ja tutkitaan erityistarkasteluna keinotekoisien vikatilanteiden mittausdataa. Tarkasteltavassa mittausdatassa pääpaino kohdistuu datan osiin, joilla viat todennäköisimmin ovat havaittavissa.

Työn tavoitteena on luoda toimintamallin perusta värähtelymittaustulosten tarkastelulle, antaa käsitys moottorien värähtelymittausdatan perusluonteesta ja osoittaa vikatilanteiden löytämisen mahdollisuus värähtelymittauksen avulla. Lisäksi työ antaa lukijalle ymmärryksen värähtelymittaukseen perustuvasta kunnonvalvonnasta. Työ luo myös pohjaa aiheeseen liittyvän tutkimuksen jatkamiseksi, etenkin data-analytiikkaan ja tekoälyyn liittyen. Värähtelymittaukseen liittyvä kunnonvalvonta on aihealueena laaja ja sisältää paljon asiantuntijuutta vaativia sääntöjä. Tässä työssä esitellään keskeisimmät kunnonvalvontaan liittyvät diagnostiikkasääntöjen periaatteet.

2. MEKAANINEN VÄRÄHTELY

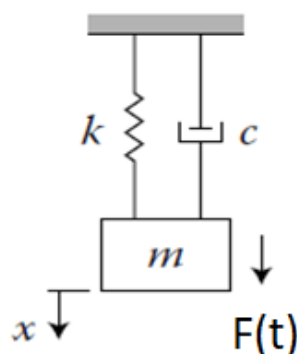
Mekaanisella värähtelyllä tarkoitetaan kappaleen tai systeemin jaksollista toistuvaa liikettä tasapainoaseman ympärillä (Salmi 2003). Mekaaninen värähtely perustuu Newtonin toisen lain liikeyhtälöön, jonka pohjalta on mahdollista selittää kaikki värähtelyn ilmiöt. Käytännön monimutkaisetkin värähtelymekanismit perustuvat tähän yksinkertaiseen liikeyhtälöön, jota on mahdollista soveltaa myös polttomoottorin värähtelyn mallintamiseen. (Adams 2010)

2.1 Viskoosisesti vaimennettu värähtelymekanismi

Kaikissa käytännön mekaanisissa laitteissa, kuten polttomoottorissa, tapahtuu aina värähtelyn vaimenemista. Vaimeneminen voi olla viskoosia kitkaa, coulombista kitkaa tai rakenteellista vaimennusta. (Salmi 2003) Yksinkertaisimman eli yhden vapausasteen vaimennetun värähtelymekanismin toimintaa voidaan kuvata seuraavan yhtälön avulla:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t), \quad (1)$$

missä massa on m , kiihtyvyys \ddot{x} , vaimennuskerroin c , nopeus \dot{x} , jousivakio k , siirtymä x ja ajasta riippuva ulkoinen voima $F(t)$. Vaimennuksesta johtuva komponentti $c\dot{x}$ ja jousesta johtuva komponentti kx pyrkivät estämään ulkoisen voiman $F(t)$ vaikutusta massan liikehdintään tasapainotilastaan. Seuraava kuva 1 havainnollistaa yhden vapausasteen vaimennettua värähtelymekanismia.



Kuva 1. Yhden vapausasteen värähtelijä. (Adams 2010)

Värähtelijän ominaisuuksien tunnistamisen kannalta tärkeä tilanne on silloin, kun ei ole ulkoista vaikuttavaa voimaa, jolloin yhtälö (1) tulee seuraavaan muotoon

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0. \quad (2)$$

Olettaen, että c ja k ovat positiivisia arvoja, niin yhtälön (2) karakteristiselle muodolle

$$\lambda^2 + \frac{c}{m}\lambda + \frac{k}{m} = 0 \quad (3)$$

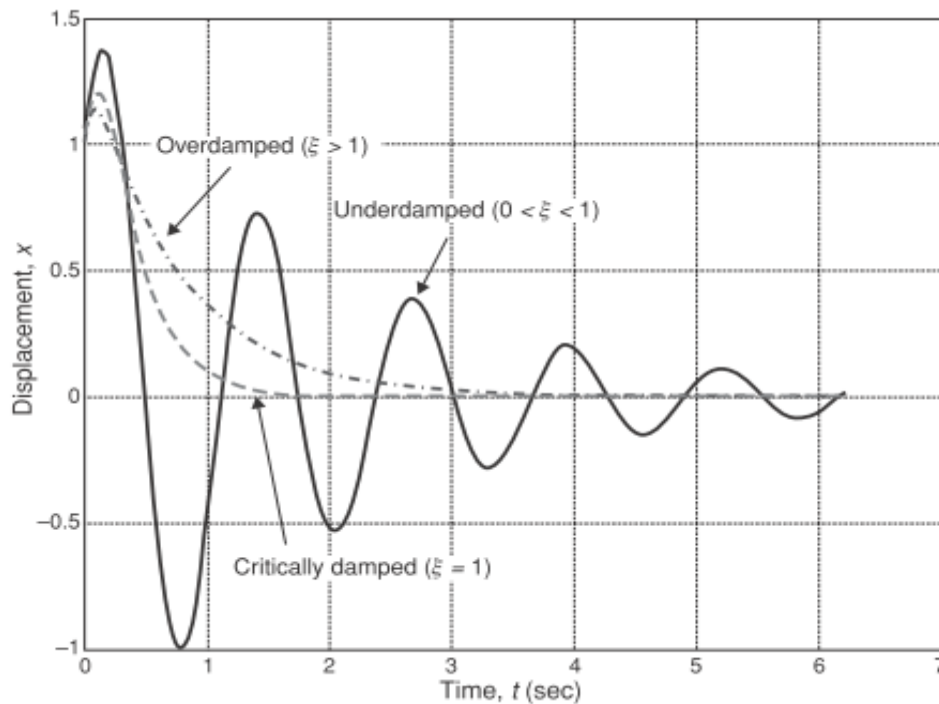
ratkaisua haettaessa on mahdollista määrittää värähtelyn vaimennukselle kolme oleellista tapausta, joita ovat: alikriittinen, kriittinen ja ylikriittinen vaimennus. (Adams 2010)

Näiden kolmen tapauksen kuvaamiseksi käytetään merkintää

$$\zeta = \frac{c}{c_k}, \quad (4)$$

missä suhteellinen vaimennuskerroin on ζ ja kriittinen vaimennuskerroin c_k , joka on vaimennuskertoimen arvo, kun karakteristisen yhtälön (3) diskriminantti on nolla. Vaimennus on ylikriittinen, kun $\zeta > 1$, kriittinen, kun $\zeta = 1$ ja alikriittinen, kun $\zeta < 1$.

Alikriittisesti vaimennettu värähtelijä jatkaa värähtelyä tasapainoaseman ympärillä, kuitenkin jatkuvasti lähestyen sitä. Kriittisesti vaimennetussa tapauksessa värähtelijä lähestyy asymptoottisesti nopeimmin tasapainoasemaansa, ohittaen sen korkeintaan kerran. Ylikriittisesti vaimennettu värähtelijä lähestyy asymptoottisesti tasapainoasemaansa ilman värähtelyä, kuitenkin aina hitaammin kuin kriittisesti vaimennetussa tapauksessa. (Salmi 2003) Kuva 2 esittää vaimennustilanteiden vaikutuksen värähtelyn edetessä yhden vapausasteen tilanteessa ja harmonisessa värähtelyssä.



Kuva 2. Vaimennuskertoimen vaikutus värähtelyyn. (Sinha 2010)

Todelliset koneenosat kuuluvat lähes aina alikriittisesti vaimennettuun tapaukseen pienillä vaimennuskertoimen arvoilla, jolloin osan värähtely on mahdollista. Lisäksi useissa tapauksissa vaimennus on hyvin pientä eli lähempänä nollaa kuin ykköstä.

Edellä on käsitelty vain yksinkertaista yhden vapausasteen värähtelyä, mutta todellisten kokonaisuuksien riittävän tarkassa tarkastelussa saatetaan tarvita jopa 100 vapausastetta tai enemmän. Tällöin käsitellään aiempiin yhden vapausasteen yhtälöihin perustuvia matriisimuotoisia yhtälöitä. Käsiteltävien matriisien koko kasvaa sen mukaan mitä enemmän systeemissä on vapausasteita ja sen myötä muun muassa laskenta vaatii tietokoneelta enemmän laskentatehoa. (Adams 2010)

2.2 Harmoninen pakkovärähtely

Värähtelymekaniikassa ulkoista voimaa $F(t)$ kutsutaan herätteeksi (excitation) ja kiihtyvyyttä \ddot{x} , nopeutta \dot{x} sekä siirtymää x vasteeksi (response). Polttomoottorin yhteydessä tärkeä erityistapaus on harmoninen heräte, jolloin ulkoinen voima saa muodon

$$F(t) = F_0 \sin(\Omega t + \varphi_F), \quad (5)$$

missä herätteen amplitudi on F_0 , herätteen kulmataajuus Ω , aika t ja herätteen vaihekulma φ_F , joka tyypillisesti asetetaan nolaksi yhden vapausasteen tilanteessa.

Harmonisen voiman vaikuttaessa amplitudinsa suuruisena stattsisesti vaimentamattomaan värähtelijään, tulisi siirtymävasteeksi \bar{u}_{st} , jolloin suureiden yhteydeksi muodostuu

$$F_0 = k\bar{u}_{st}. \quad (6)$$

Todellisuudessa kuitenkin pysyvien värähtelyjen siirtymävasteeksi $u(t)$ (steady state response) merkitään vahvistuskertoimen V avulla

$$u(t) = V\bar{u}_{st} \sin(\Omega t), \quad (7)$$

missä vahvistuskerroin V vaimentamattomassa ja vaimennetussa tapauksessa

$$V = \frac{1}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2}, \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\zeta\Omega}{\omega}\right)^2}}, \quad (9)$$

missä ω on systeemin vapaan värähtelyn ominaiskulmataajuus. Vahvistuskertoimien lausekkeista (8) ja (9) nähdään, että systeemin vaimennus pienentää vahvistusta jo pienilläkin vaimennuskertoimen arvoilla. (Salmi 2003)

2.3 Värähtelyn herätteet dieselmoottorissa

Dieselmoottorissa on useita toiminnan aikaisia värähtelyn herätteitä, jotka voidaan jakotella pyörivien komponenttien massavoimien herätteisiin, palotapahtumien kaasuvoimien herätteisiin ja muihin komponenttien paikallisiin herätteisiin. Kaikki herätteet vaikuttavat niille ominaisilla taajuuksilla, mutta mikäli herätteet toimivat samoilla taajuuksilla, niiden vaikutus summautuu. (Tienhaara 2004)

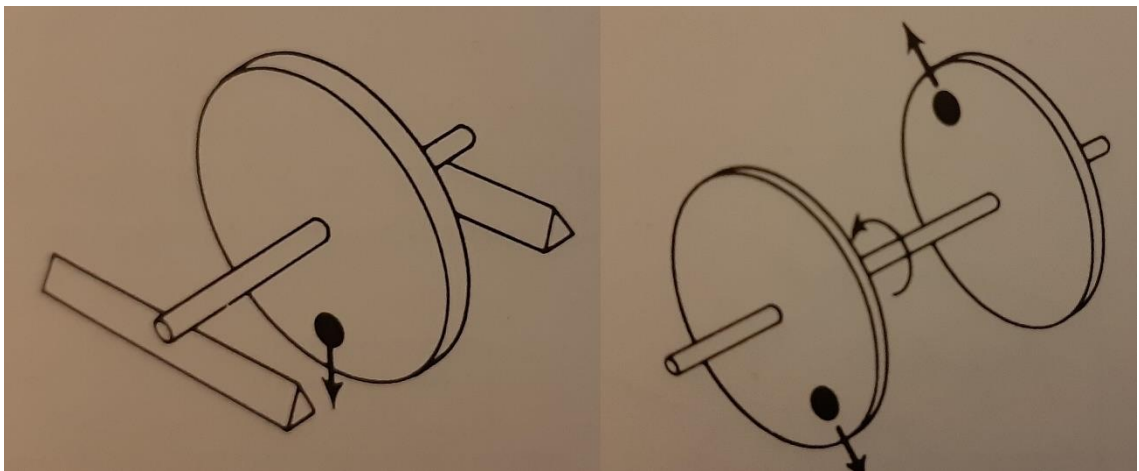
2.3.1 Pyörivän komponentin aiheuttama heräte

Moottorissa tyypillinen värähtelyn heräte on pyörivien komponenttien epätasapaino. Komponentin pyörimisakselin suhteen epätasapainossa oleva massa pyörii akselin ympärillä tietyllä etäisyydellä e aiheuttaen harmonisen herätteen. Tässä tapauksessa yhtälön (5) herätteen amplitudi F_0 saa muodon

$$F_0 = me\Omega^2, \quad (10)$$

missä epätasapainossa oleva massa on m ja pyörivän komponentin kulmataajuus Ω .

Epätasapainoa on olemassa staattista ja dynaamista. Staattisen epätasapainon tilanteessa epätasapainottava massa sijaitsee vain yhdellä tasolla ja on havaittavissa komponentista ilman pyörittämistä. Dynaamisessa epätasapaino tilanteessa komponentti saattaa olla staattisesti tasapainossa, jolloin komponenttia on pyöritettävä epätasapainon havaitsemiseksi. Lisäksi epätasapainossa olevat massat sijaitsevat useammalla kuin yhdellä tasolla, jolloin resultantiksi muodostuu voiman lisäksi tärisyttävä momentti, joka pyrkii tärisyttämään laakereillaan olevaa akselia. Kuva 3 havainnollistaa näiden epätasapainotilanteiden eroa, jossa dynaaminen epätasapaino on esitetty staattisesti pyörimisakselin suhteen tasapainoisesta tilanteesta, vaikka molemmat voivat esiintyä samanaikaisesti.

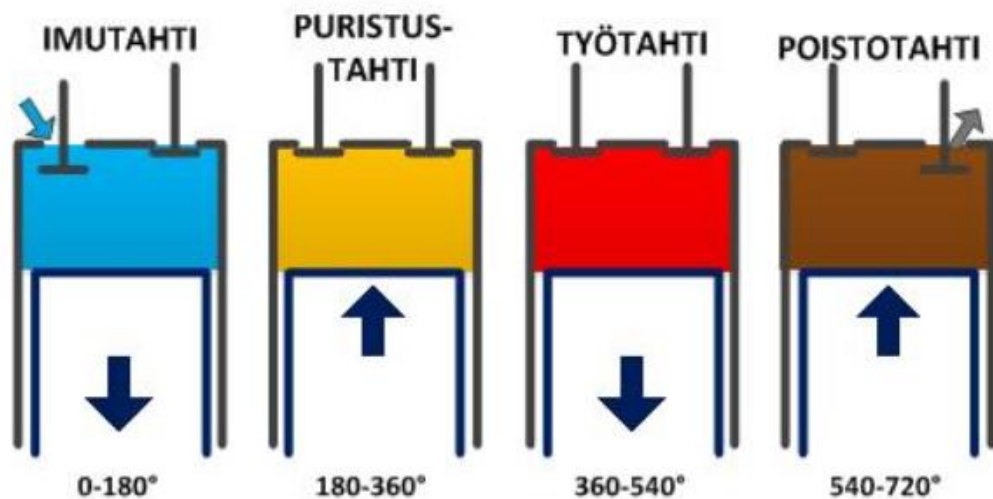


Kuva 3. Staattinen epätasapainotilanne vasemmalla ja dynaaminen epätasapainotilanne oikealla. (Thomson 1989)

Dieselmoottorin komponenteista erityisesti kampiakselin voidaan ajatella koostuvan peräkkäisistä epätasapainoisista levyistä, jolloin muodostuu dynaaminen epätasapainotilanne. Ilmiöt vaikuttavat kaikissa moottorin pyörivissä komponenteissa, kun ne eivät ole tyypillisesti täydellisesti tasapainossa eli aiheuttavat tällöin harmonisen herätteen pyörimistaajuudellaan. Muita pyörimistaajuudellaan herätteitä aiheuttavia komponentteja ovat muun muassa nokka-akseli ja hihnapyörät. (Thomson 1989)

2.3.2 Palotapahtuman aiheuttama heräte

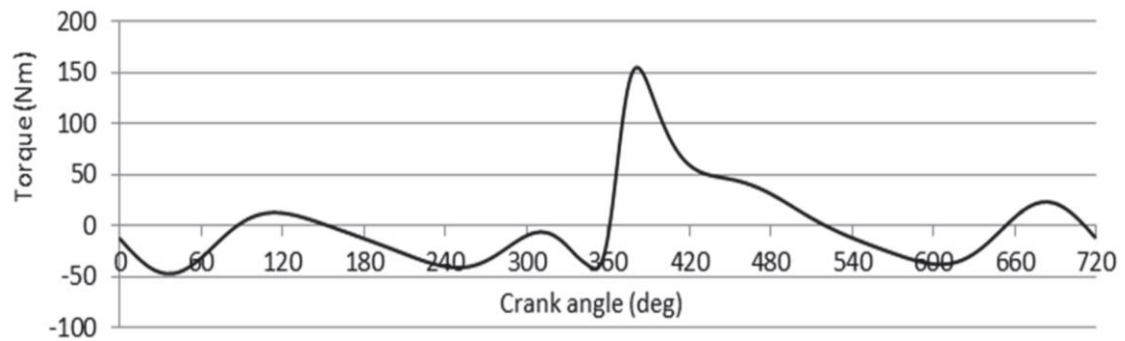
Nelitahtisen dieselmoottorin työkierrossa oleva palotapahtuma, aiheuttaa kaasuvoimista johtuvan voimakkaan värähtelyn herätteen. Kuvassa 4 on esitettyä dieselmoottorin työkierto kampiakselin kiertokulman avulla.



Kuva 4. Nelitahtisen dieselmoottorin työkierto. (Tikkanen 2017)

Työtahdin alussa tapahtuva polttoaineen palaminen aiheuttaa kaasun äkillisestä laajenemisesta johtuvan iskun sylinteriin. Isku toimii värähtelyn herätteenä, jonka taajuuksi muodostuu puolet kampiakselin pyörimistaajuudesta, kun palotapahtumia sylinterissä on yksi kampiakselin kahden kierroksen aikana. Useasynterisessä moottorissa palotapahtuman aiheuttamia herätteitä esiintyy taajuuksilla pyörimistaajuuden puolikkaan välein, mutta kuitenkin palotaajuus on aina sylinterien lukumäärän puolikas kerrottuna kampiakselin pyörimistaajuudella. (Tikkanen 2017)

Kaasuvoiman suuruuden vaihtelevuus kampiakselin pyörimiskulman muuttuessa aiheuttaa kampikoneistoon jatkuvaa väännön muuttumista. Väännön jatkuva muuttuminen aiheuttaa näin ollen kampikoneistoon vääntövärähtelyä, joka erityisesti rasittaa ajan kuluessa muun muassa laakereita ja koneistoon liitettöjä komponentteja sekä lisäksi aiheuttaa ylimääräistä meluhaittaa. Kuva 5 havainnollistaa kaasuvoimasta johtuvan kampiakselin vääntömomentin muuttumista kampiakselin pyörimiskulman suhteen.



Kuva 5. *Kampiakselin vääntömomentin suuruus kampiakselin pyörimiskulman mukaan. (Horvath, Egert 2015)*

Suurin väännön muutos tapahtuu palotapahtuman ympärillä, mikä edelleen vaikuttaa eniten kampiakseliin kohdistuvien voimien muutokseen. Monisynterisessä moottorissa eri vaiheessa olevien sylintereiden kaasuvoimien aiheuttamat tangentiaalivoimat osittain kumoavat toistensa vaikutuksen, jolloin näillä voimilla ei ole vaikutusta kokonaisvääntöön. Kokonaisuudessaan kampikoneiston värähtelyyn vaikuttavat, muuttuvat voimat, muuttuva vääntö ja muuttuva taivutusmomentti. (Mollenhauer, Tschöke et al. 2010)

2.3.3 Paikalliset herätteet

Paikalliset herätteet syntyvät moottorin liittännäisten komponenttien muodoista, kuten hammaspyörien hampaista tai pumppujen siivistä. Herätteiden taajuus on riippuvainen komponentin pyörimisnopeuden lisäksi muotojen lukumäärästä tai virtauksista johtuvien herätteiden taajuudet puolestaan virtausten muutoksista. (Tienhaara 2004)

Hammaspyörät aiheuttavat herätteen pyörimistaajuutensa lisäksi hampaiden ryntötaajuudella, jonka taajuudeksi muodostuu hampaiden lukumäärä kertaa hammaspyörän pyörimistaajuus. Heräte syntyy hampaiden iskeytymisestä toisiaan vasten, jolloin jokainen hammas aiheuttaa herätteen hammaspyörän kierroksen aikana. Ryntötaajuus näkyy siis tyypillisesti pyörimistaajuuteen nähden huomattavasti korkeammalla taajuudella. Herätteen suuruus kertoo hammaspyörään kohdistuvasta kuormituksesta eli isommilla kuormituksilla voimakkaampi heräte. Heräte usein myös jakaantuu ryntötaajuuden molemmille puolille sivunauhoiksi, joiden suuruuden muutoksista suhteessa ryntötaajuuden herätteeseen on puolestaan mahdollista päätellä hammaspyörän vikatilanteista.

Moottoriin liitetyt pumput aiheuttavat myös pyörimistaajuutensa lisäksi herätteen tätä korkeammalla taajuudella. Herätteen taajuus riippuu muun muassa pumpun siipien tai sylinterien lukumäärästä. Näillä taajuuksilla esiintyvät herätteet muodostuvat esimerkiksi pumpun siipien toiminnasta pyörimisliikkeessä. Herätteiden voimakkuuden muutoksista

herätetaajuudella ja sen monikerroilla voidaan päätellä virtauksiin ja pumpun kuntoon liittyvistä ongelmista. Näitä herätteitä aiheuttavia tyypillisiä moottorin liittämissä komponentteja ovat vesipumppu, polttoaineen korkeapainepumppu, öljypumppu ja paineilma kompressori.

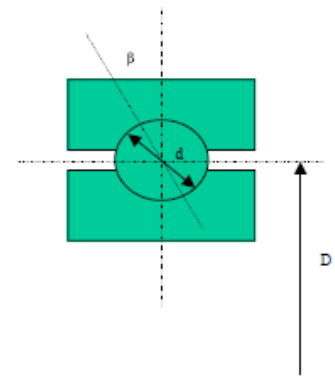
Kaikki moottorin ja siihen liitettyjen komponenttien vierintälaakerit muodostavat herätteitä laakerikomponenttien sysäystaajuuksilla. Laakerien sysäystaajuudet voidaan laskea tapauskohtaisesti kuvan 6 mukaisilla kaavoilla kaikille laakerikomponenteille.

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

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

$$(3) \text{ rulla/kuula} \quad f_r = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta\right)^2\right) n$$

$$(4) \text{ pidike} \quad f_p = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) n$$



Kuva 6. Vierintälaakerien sysäystaajuuksien laskukaavat. (PSK5707 2011)

Kuvan 6 kaavoissa sisä- ja ulkokehän välinen suhteellinen pyörimisnopeus on n , vierintäelinten lukumäärä N , vierintäelimen halkaisija d , laakerin toimintahalkaisija D ja kuorimituksen toimintakulma β . Kaavoista lasketuilla taajuuksilla herätteiden voimakkuus alkaa kasvamaan vikojen kehittyessä, jolloin yhteys mahdollisesti vialliseen laakerielimeen voidaan tunnistaa. Lisäksi voiteluun liittyvät ongelmat kuten metallikosketus aiheuttaa tyypillisesti korkealla yli 2kHz taajuusalueella kohinaa. Liukulaakerit puolestaan aiheuttavat herätteitä vain pyörimistaajuudellaan ja niiden monikerroilla, joiden voimakkuuden muutoksista voidaan päätellä liukulaakereihin liittyvistä ongelmista. (PSK5707 2011)

2.3.4 Asennus- ja valmistusvirheen aiheuttamat herätteet

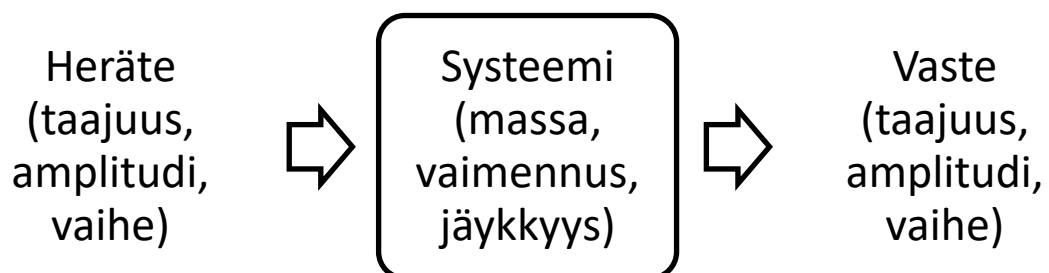
Mekaanisesta väljyydestä johtuva heräte muodostuu pyörimistaajuudelle ja sen voimakkuus vaihtelee väljyyden asteen mukaan eli isommat väljyydet aiheuttavat isomman he-

rätteen. Usein kuitenkin huonosta sovituksesta, kuten liukulaakereiden liiallisesta välyksestä tai löysästä kiinnityksestä akseliin, aiheutuu myös aliharmonisia herätetaajuuksia ja niiden monikertoja.

Hammaspyörän epäkeskeisyys pyörimisakseliin nähden tyypillisesti voimistaa ryntötaajuuden herätteen molemminpuolisia sivunauhoja. Tämän lisäksi epäkeskeisyys myös lisää herätteen voimakkuutta hammaspyörän pyörimistaajuudella. Puolestaan hammaspyörien linjausvirhe eli kohtisuorattomuus pyörimisakseliin nähden aiheuttaa tyypillisesti pyörimistaajuuden toisella monikerralla ensimmäistä monikertaa voimakkaamman herätteen. Lisäksi näiden monikertojen ympärille muodostuu sivunauhoja, jotka eivät ole yhtä voimakkaita molemmin puolin. (PSK5707 2011)

2.4 Komponentin taajuusvaste ja ominaistaajuus

Taajuusvasteella tarkoitetaan systeemin värähtelyn vastetta herätteeseen eri herätteen taajuuksilla. Komponentin taajuusvastetta voidaan kuvata taajuusvastefunktiolla (FRF, frequency response function), jota käytetään ominaistaajuuksien, vaimennuksen ja ominaismuotojen selvittämiseen. Taajuusvastefunktio esittää annetun värähtelyn herätteen ja mitatun värähtelyn vasteen lineaarista ja aikainvarianttia yhteyttä. Funktio esitetään usein kuvan 7 lohkokaaavion mukaisesti, jossa systeemi kuvataan funktiona herätteen ja vasteen välillä.



Kuva 7. Taajuusvastefunktion lohkokaavio.

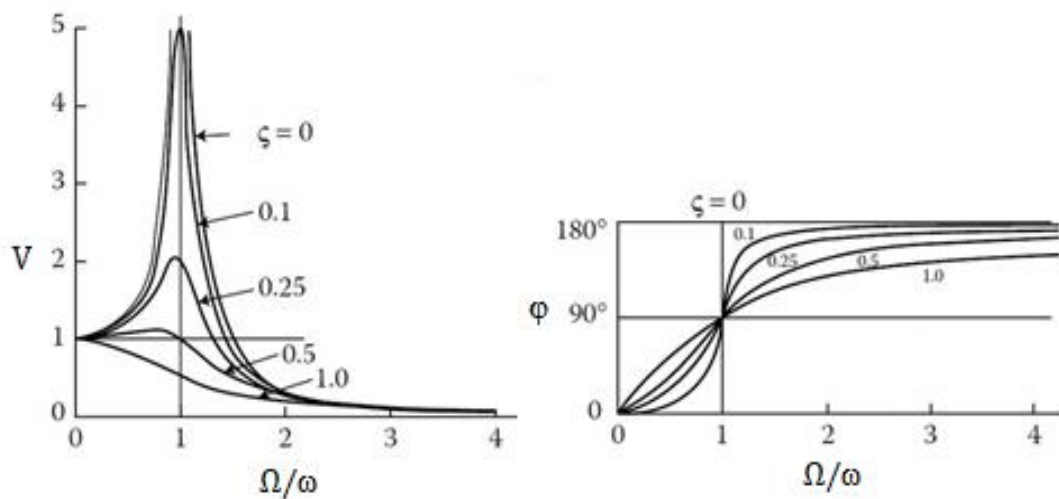
Herätteellä on oma taajuus, amplitudi ja vaihe, joihin systeemi eli komponentti vastaa sille ominaisella tavalla. Näin edelleen systeemin mitattu vaste kuvaa, miten heräte vaikuttaa systeemiin eli miten eri värähtelyn taajuuksilla amplitudi ja vaihe muuttuvat systeemin ominaisuuksien vaikutuksesta. (Grenier 2016)

Komponentin ominaistaajuudet tarkoittavat taajuuksia, joilla komponentti värähtelee mieluiten ulkoisen herätteen vaikutuksesta. Kaikilla komponenteilla on useita ominaistaajuuksia, jotka ovat riippuvaisia niiden massan ja jäykkyyden jakautumisesta. Yleisesti

massan lisääminen alentaa ominaistaajuutta ja jäykkyyden lisääminen kasvattaa sitä. Komponentin värähtelyä jollain ominaistaajuudella ulkoisen voiman vaikutuksesta kutsutaan resonanssitilanteeksi. (Thomson 1989)

2.5 Resonanssi ja sen vaikutus moottorissa

Resonanssitilanteessa systeemin herätteen kulmataajuus on sama kuin vaimentamattoman systeemin ominaiskulmataajuus, jolloin vaimentamattomassa systeemissä vasteen amplitudi kasvaa rajatta ajan kuluessa. Käytännön vaimennetuissa systeemeissä amplitudipiikin suuruus riippuu vaimennuksen voimakkuudesta. Usein ilmaistaan, että resonanssi tapahtuu alikriittisellä vaimennuksella aina kohdassa, jossa herätteen kulmataajuus on yhtä suuri kuin systeemin ominaistaajuus. Systeemin maksimivaste saavutetaan kuitenkin alhaisemmalla taajuudella, mutta taajuusero on tyypillisesti pieni todellisten koneenosien pienillä vaimennuksilla. Seuraava kuva 8 esittää vaimennuskertoimen vaikutuksen resonanssikohdan amplitudipiikkiin ja vaihekulman muutokseen. (Salmi 2003)



Kuva 8. Vaimennuskertoimen vaikutus vahvistuskertoimeen ja vaihekulman muutokseen. (Adams 2010)

Vaimennuksen ansiosta todellisissa koneissa on mahdollista käydä ajoittain resonanssi-alueella tai mennä nopeasti sen ohitse ilman vaurioita. Resonanssikohdassa vasteen vaihekulma muuttuu 90 astetta ja koko resonanssikohdan ohitsemismentäessä 180 radiaania. Vaihekulman muuttuminen saa siis aikaiseksi voimakasta värähtelyä resonanssikohdassa ja sen ohitsemismentäessä vastakkaiseksi muuttuvat vaiheet vähentävät värähtelyä merkittävästi. (Adams 2010)

Dieselmoottorin komponentit pyritään tyypillisesti suunnittelemaan siten, että niiden ominaistaajuus ei ole herätteiden kanssa samalla taajuudella, vaan ominaistaajuus asetetaan herätteiden taajuuksia korkeammaksi. Joissain tapauksissa parempi vaihtoehto on yrittää laskea komponentin ominaistaajuutta herätteiden kulmataajuuksia alhaisemmaksi. Aina kuitenkin resonanssitilannetta ei voida välttää, mutta tällöin sen vaikutus pyritään minimoimaan muun muassa vaimennuksen avulla. Dieselmoottorien yhteydessä resonanssin kannalta turvalliseksi taajuusalueeksi voidaan todeta 250 hertsistä eteenpäin oleva alue, jolloin esiintyy tyypillisesti enää vain voimakkuudeltaan pieniä herätteitä. Dieselmoottorin herätteiden taajuuksia on vaikea muuttaa, sillä esimerkiksi komponenttien pyörimisnopeudet määräytyvät moottorin optimaalisen toiminnan mukaan.

Resonanssi aiheuttaa moottoriin liitettyjen komponenttien kiinnityksien löystymistä ja irtaamista, mikä lisää vaurioiden riskiä ja äänihaittaa. Lisäksi se voi aiheuttaa komponentteihin ja rakenteeseen väsymisestä johtuvia pysyviä muodonmuutoksia, jolloin moottorin normaali toiminta häiriintyy. Resonanssitilanteen esiintyessä vain silloin tällöin esimerkiksi moottorin kierrosluvun muuttuessa, saattaa myös ajan kuluessa aiheuttaa edellä mainittuja ongelmia. Pahin tilanne on kuitenkin aina, mikäli resonanssitaajuudella olevan herätteen suunta sopii komponentin ominaismuotoon aiheuttaen voimakkaimmin värähtelyä. (Tienhaara 2004)

3. POLTTOMOOTTORIN VÄRÄHTELYN MITTAAMINEN

Värähtelyn mittaamiseen tarvitaan värähtelymittalaitteisto ja mittausdatan käsittelyä varten sopiva ohjelmisto. Tämän lisäksi on valittava mittauspisteet ja peruste, minkä vuoksi värähtelyä halutaan mitata.

3.1 Moottorin kunnonvalvonta värähtelymittauksilla

Uusien polttomoottorien kunnonvalvontaa on mahdollista tehdä koekäytön aikaisella värähtelyvasteen mittaamisella, kuten melkein minkä tahansa muunkin dynaamisen systeemin. Mittaaminen tehdään kiihtyvyyssanturilla, joko yhdestä tai useammasta valitusta pisteestä. Mitattua vastedataa analysoimalla reaaliaikaisesti tilastollisesti on mahdollista löytää moottorien joukosta poikkeavia yksilöitä ja poikkeamien mahdollinen syy.

Poikkeavien yksilöiden tunnistaminen koekäytön aikana estää mahdollisesti viallisten moottorien lähtemisen asiakkaalle, kun korjaaminen voidaan tehdä välittömästi tuotannon yhteydessä. Tämä säästää suoraan viallisten moottorien palautuksista aiheutuvista kustannuksista ja lisäksi ylläpitää korkean laadun mainetta, kun asiakkaiden ei tarvitse kohdata ongelmia viallisten moottorien kanssa.

Perinteisesti moottorien koekäytön aikaista kunnonvalvontaa on tehty aistinvaraisesti muun muassa kuuntelemalla moottoria sen ollessa käynnissä. Tämä toimintatapa vaatii kuitenkin tarkastuksia suorittavalta henkilöltä erityistä kokemusta vikatilanteiden aiheuttamista äänistä ja lisäksi diagnoosi moottorin kunnosta saattaa siltikin jäädä arvailujen varaan. Tämän perinteisen kunnonvalvonnan tukena värähtelymittaus antaa luotettavamman kuvan moottorin kunnosta ja auttaa vian syyn etsimisessä.

Reaaliaikaisen kunnonvalvonnan lisäksi voidaan tallennetulle mittausdatalle tehdä jälkikäteen data-analysointia. Tämän tarkastelun avulla on mahdollista havaita esimerkiksi tuotannon laadussa tapahtuvia muutoksia, jos värähtelytasoissa havaitaan yleisesti trendejä suuntaan tai toiseen. Lisäksi esimerkiksi mittaustulosten välisten hajonnan yleisestä vaihtelusta ajan kuluessa voidaan päätellä tuotannon tasalaatuisuuden muutoksista.

3.2 Mitattavat suureet

Yleisimmin mitattavia värähtelyn suureita ovat siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys. Siirtymä kuvaa värähtelystä aiheutuvaa poikkeamaa tasapainotilasta. Näin ollen siirtymä saa maksimiarvonsa amplitudin suuruuden mukaan. Seuraava kaava (11) esittää poikkeaman X arvon sinimuotoisessa värähtelyssä.

$$X = X_0 \sin \omega t, \quad (11)$$

Jossa maksimipoikkeama on X_0 . Siirtymän ensimmäinen aikaderivaatta on värähtelyn nopeus. Nopeus saa maksimiarvonsa, kun värähtelymekanismi ohittaa tasapainoasemansa. Nopeus saadaan siirtymästä seuraavalla kaavalla (12).

$$v = \frac{dX}{dt} = X_0 \omega \cos \omega t, \quad (12)$$

Kiihtyvyys saadaan nopeudesta derivoimalla se ajan suhteen ja se kertoo nopeuden muutoksesta. Kiihtyvyys puolestaan on huipussaan värähtelymekanismin ollessa ääri-asennossaan. Kaava (13) esittää kiihtyvyyden laskemisen nopeudesta.

$$a = \frac{dv}{dt} = -X_0 \omega^2 \sin \omega t, \quad (13)$$

Jokaisen derivoinnin yhteydessä vaihe muuttuu 90 astetta, joten kiihtyvyys on tällöin vastakkaisessa vaiheessa siirtymän kanssa. Näiden suureiden amplitudin suuruudesta voidaan päätellä värähtelyn voimakkuudesta, mikä edelleen kertoo esimerkiksi mahdollisten vikojen vakavuusasteesta. Alle 10 Hz alueella kiihtyvyyden amplitudiarvot ovat tyypillisesti pieniä ja siirtymä saa tällöin verrattain suurimpia amplitudiarvoja. 10 Hz:n ja 1000 Hz:n välisellä alueella nopeus kuvaa parhaiten värähtelyä ja yli 1000 Hz:n alueella ainoastaan kiihtyvyys on paras suure käytettäväksi. Hyvin usein pyörivien koneiden tärkeimmät herätteet ovat 10 Hz:n ja 1000 Hz:n välillä, joten monesti käytetään mittauksissa nopeutta suureena. Polttomoottorien kunnonvalvonnassa halutaan kuitenkin tarkastella myös yli 1000 Hz:n taajuusalueita, joten suureena käytetään kiihtyvyyttä. (Girdhar, Scheffer et al. 2004)

3.3 Mittausanturi

Anturi muodostaa mitattavasta kohteesta signaalin, joka kuljettaa mittaustiedon. Mittausanturin tärkein osa on tuntoelin, joka tunnustelee mittauskohdetta. Mittauskohteita on hyvin monia erilaisia, joten myös anturityyppejä ja niiden muodostamia signaaleja on monenlaisia. Joidenkin antureiden muodostama signaali on valmis suoraan käytettäväksi, kun taas toisissa käyttötapauksissa signaalille voidaan joutua tekemään useita

erilaisia käsittelyjä ennen käyttämistä. Tyypillisiä signaalien käsittelyjä ovat muun muassa vahvistaminen ja suodattaminen. (Aumala, Ihalainen et al. 1998)

3.3.1 Anturityypit värähtelyn suureille

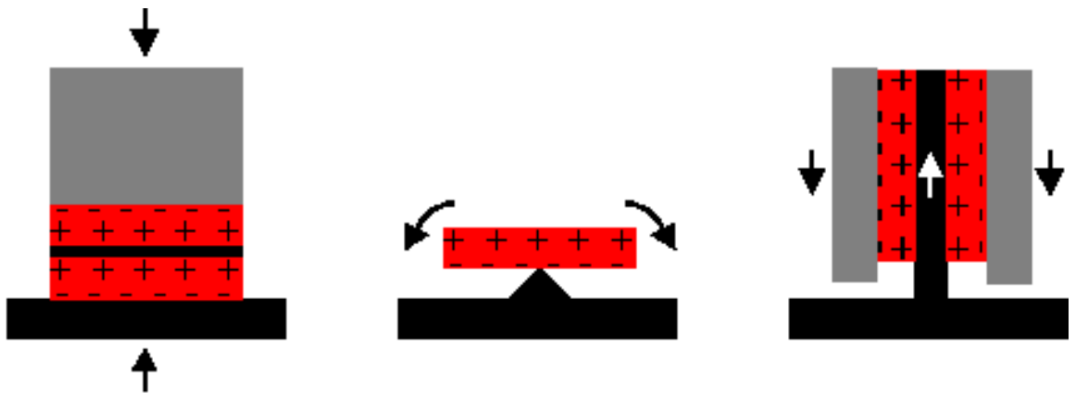
Siirtymää mitataan pyörivissä koneissa tyypillisesti pyörivän osan, kuten akselin ja pyörimättömän osan välillä. Kiihtyvyyden- ja nopeusantureista poiketen siirtymäanturin toiminta perustuu täysin sähköiseen ilmiöön. Induktanssiin perustuva siirtymäanturi on kiinni pyörimättömässä osassa ja pyörivän akselin ja anturin välillä ei ole kosketusta, vaan pieni väli. Akselin pyöriessä anturin ja akselin välinen etäisyys vaihtelee värähtelyn voimakkuudesta riippuen ja tämä aiheuttaa magneettikentän muutosta. Magneettikentän muutoksesta edelleen aiheutuu tuntoelimestä lähtevän sähkövirran muutos, joka muutetaan jännitesignaalksi. Näin muodostuva sinimuotoinen jännitesignaali lähetetään mittalaitteelle käsiteltäväksi. Anturin käytännöllinen toiminta-alue on vain muutaman millimetrin luokkaa, mutta sen ylittäminen ei yleensä ole ongelma, kun kone on jo todennäköisesti vioittunut mitta-alueen ylittyessä.

Yleisesti nopeusanturin toiminta perustuu anturin sisäiseen värähtelevään magneettiin ja sitä ympäröivään käämiin. Magneetin värähdellessä käämin suhteen indusoituu ympäröivään käämiin jännite, joka on suoraan verrannollinen värähtelyn nopeuteen. Nopeusantureiden sijaan nykyään käytetään usein kiihtyvyydsentureita myös nopeuden mittaamiseen. Kiihtyvyydsenturiin lisättävällä elektroniikalla saadaan muodostettua kiihtyvyydestä värähtelyn nopeus tarvittaessa.

Kiihtyvyydsenturi toimii myös värähtelevään massaansa perustuen, kuten nopeusanturi. Signaalien muodostajana on kuitenkin tyypillisesti pietsokide ja pietsosähköisen kiihtyvyydsenturin toimintaa esitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 3.3.2. (Adams 2010)

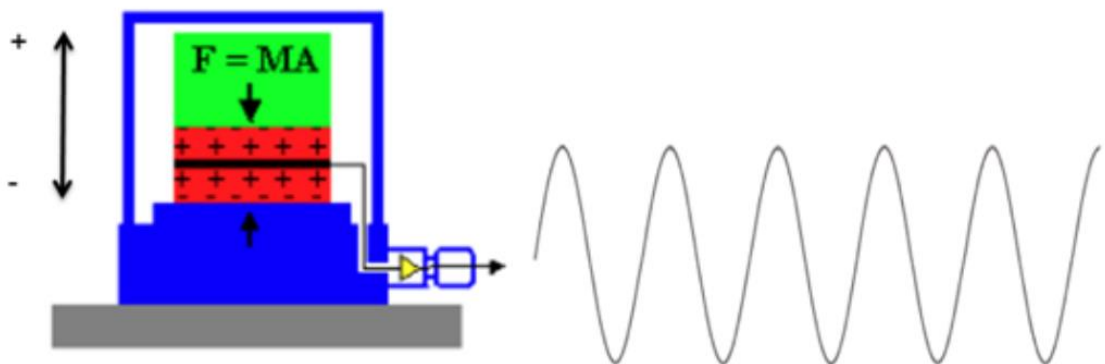
3.3.2 Pietsosähköisellä kiihtyvyydsenturilla mittaaminen

Pietsosähköisen kiihtyvyydsenturin toiminta perustuu pietsoelementtiin, johon muodostuu vastakkaisille pinnoille erimerkkiset varaukset, kun siihen kohdistetaan voimaa. Tyypillisesti antureissa käytetään puristukseen, taivutukseen tai leikkaukseen perustuvaa varauksen muodostamistapaa. Nämä eri tavat näkyvät seuraavassa kuvassa 9, jossa harmaalla värillä seisminen massa ja punaisella pietsoelementti.



Kuva 9. Pietsosähköisen anturin toimintaperiaatteet järjestyksessä puristus, taivutus ja leikkaus. (PCB Piezotronics a)

Toiminta perustuu yhden akselin suuntaiseen liikkeeseen eli yhdellä kuvan 9 mukaisella pietsoelementillä voi mitata vain yhden suuntaista liikehdintää. Pietsosähköinen anturi ei siis sovellu staattisten tilanteiden mittaamiseen varauksen hävitessä melko lyhyessä ajassa. Seismisen massan värähdellessä muodostuu kuvan 10 mukainen sinimuotoinen signaali, joka käsitellään käyttökelpoiseksi jännitesignaalksi, vahvistetaan ja suodataan ennen signaalin jatkokäsittelyä mittalaitteessa. (PCB Piezotronics a)



Kuva 10. Seismisen massan edestakaisen liikehdinnän muodostama sinisignaali. (PCB Piezotronics b)

Kiihtyvyyssanturin kiinnityskohdan tulee olla mahdollisimman suorassa yhteydessä tutkittaviin värähtelyn herätteisiin ja kiinnityskohdan pinnanlaadun tulee olla tasainen. Lisäksi anturin kiinnitystavalla on vaikutus käyttökelpoiseen taajuusalueeseen. Taajuusalueen ylärajaksi muodostuu anturin kiinnityksen resonanssitaajuus, joka vaihtelee merkittävästi kiinnityksen mukaan. Resonanssitaajuus asettuu yleensä korkeimmalle anturin kiinteällä

ruuvi kiinnityksellä. Alataajuusrajaan on puolestaan vaikutusta yleensä vain anturin mallikohtaisella herkkyydellä.

3.3.3 Kolmiakselinen kiihtyvyysanturi

Kohdeyrityksen tuotannon koekäytössä käytetään PCB 356B21 kolmiakselista ICP kiihtyvyysanturia, jonka mitta-alue on ± 500 g ja käyttökelpoinen taajuusalue 2 – 10000 Hz. Anturin toimintaperiaatteena on leikkausvoimaan perustuva piezoelementti, joka esiteltiin luvussa 3.3.2.

Anturi on ICP anturi, mikä tarkoittaa anturin sisältävän tuntoelimen lisäksi mikroelektronikkaa. Tämän ansiosta anturin sisällä signaalista muodostetaan jännitesignaali, joka on suoraan valmis siirrettäväksi ja luettavaksi millä tahansa jännitemittarilla. ICP anturi vaatii kuitenkin erillisen DC jännitelähteen tai mittalaitteen, joka syöttää jännitettä sisäisen mikroelektronikan toimintaa varten. (PCB Piezotronics b)

3.3.4 Kosketuksettomat anturit

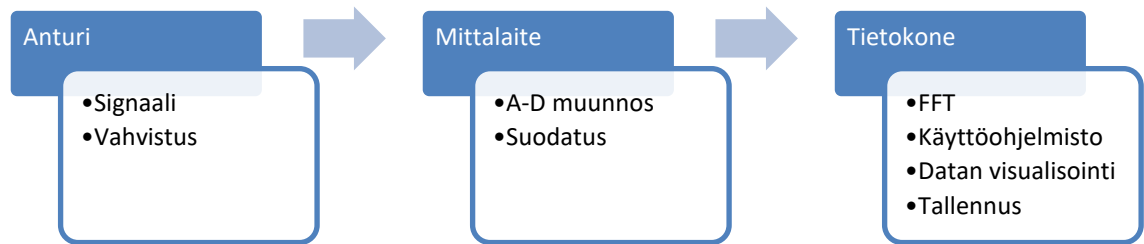
Kosketuksettomat anturit mittaavat kohteen värähtelyä ilman suoraa kosketusta siihen. Yleisimmin käytetty etäältä mittaava laite on laser värähtelymittalaite, jonka toiminta perustuu lasersäteen takaisiheijastumiseen kohteen pinnasta. Pinnan edestakaisen värähtelyn nopeus saadaan täten laskettua takaisiheijastuneen säteen avulla. Mittauskohdan pinnanlaadun on kuitenkin oltava hyvä ja tämän lisäksi mittauskohdan sijainnin pienetkin muutokset voivat aiheuttaa mittaustuloksiin huomattavia muutoksia.

Mitattavan kohteen pinnan värähtelyn aiheuttamia akustisia aaltoja on mahdollista mitata kohdeyrityksen kunnonvalvontalaitteen toimittajan kehittämällä akustisella anturilla. Anturin asetetaan noin viiden senttimetrin etäisyydelle kohteen pinnasta, jolloin mittauskohdan akustiset aallot saadaan tarkasti mitattua. Akustisen anturin on oltava optista lasersäteeseen perustuvaa mittalaitetta lähempänä pintaa, mutta toisaalta mitattavan kohteen pinnanlaadun vaihtelulla ei ole niin suurta merkitystä. Akustisten aallojen aallonpituus on lasersäteiden aallonpituutta huomattavasti pidempi, jolloin mittaustilanteen toistettavuus on parempi. (Reilhofer)

3.4 Värähtelyn mittauslaitteisto

Tyypillinen värähtelymittauslaitteisto sisältää anturin, vahvistimen, suodattimen, analogi-digitaalimuuntimen (A-D muunnin) ja tietokoneen ohjelmistoinen. Anturina voidaan

käyttää esimerkiksi mitä tahansa 3.3 luvussa esiteltyjä värähtelyn suureiden anturityyppejä. Anturista tuleva signaali voidaan myös vahvistaa, mikäli matka anturilta mittalaitteelle on pitkä. Vahvistamisella vältetään siirtohäiriöiden vaikutukset signaaliin. (Adams 2010)



Kuva 11. Tyypillinen värähtelymittalaitteisto.

A-D muuntimella muunnetaan analoginen signaali digitaaliseksi eli näytteistetään, jotta signaalin käsittely ja tallentaminen mahdollistuu. Mikroprosessorit suorittavat muunnoksen binäärilukujärjestelmän mukaisesti eli esimerkiksi 12 bittinen muunnin muodostaa 4096 diskreettiä jaksoa. Mitä enemmän on jaksoja, sitä parempi on muunnoksen resoluutio. 16 bittisellä muuntimella saadaan täten tarkempi resoluutio, kuin 12 bittisellä muuntimella. (Girdhar, Scheffer et al. 2004)

Värähtelyn mittaussignaali sisältää aina ylimääräisiä komponentteja, joita ei ole tarkoituksenmukaista jatko käsitellä. Suodattimella rajataan värähtelyn mittaussignaalista pois taajuusalueet, joita ei haluta käsitellä. Suodatus tehdään usein A-D muunnoksen jälkeen, mutta myös analoginen signaali on alipäästösuoatettava laskostumisen välttämiseksi. Värähtelymittauksissa käytettäviä suodattimia ovat alipäästö-, ylipäästö-, kaistanpäästö-, kaistanesto- ja seurantasuodatin. Ali- ja ylipäästösuoatimet päästävät nimensä mukaisesti suodattimen läpi ali tai yli asetetun taajuusrajan olevan signaalin. Näiden suodattimien yhdistelmällä saadaan aikaseksi kaistanpäästösuoatatin, jossa läpi menevän signaalin taajuudet on rajattu kummastakin päästä. Kaistanpäästösuoatattimen vastakohta on kaistanestosuoatatin, jolla saadaan rajattua tietty taajuusalue pois signaalista. Lisäksi seurantasuoatattimen avulla saadaan esimerkiksi haluttua suodatuskaistaa muutettua oikealle tasolle koneen pyörimisnopeuden vaihdella.

Digitaalimuotoinen suodatettu signaali on valmis jatkokäsiteltäväksi ja tallennettavaksi. Tietokoneen avulla mittaussignaali voidaan esittää näytöllä ja muodostaa luvussa 4.2

esitettävällä Fourierin muunnoksella mittaussignaalin tehospektriesitys. Tietokoneeseen ladattavalla mittalaittekohtaisella ohjelmistolla voidaan tehdä mitatulle signaalille myös muita käsittelyjä. Lisäksi mittausdata voidaan tallentaa esimerkiksi tietokoneen kovalevyille tai myös johonkin muuhun tallennusvälineeseen. (Adams 2010)

3.4.1 Tyypillisiä laitteistoja

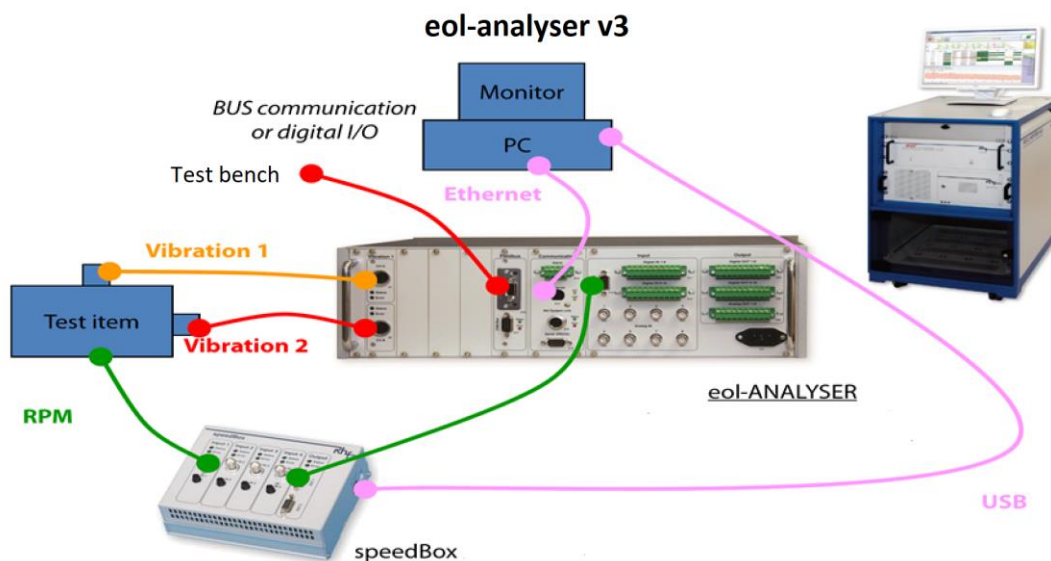
Värähtelymittalaitteita on olemassa erilaisia riippuen käyttötarkoituksesta. Kannettavilla mittalaitteilla on mahdollista tehdä helposti mittauksia monista kohteista samalla mittalaitteella. Mittalaitteen tallentama mittausdata on yleensä siirrettävissä tietokoneelle tarkempaa analyysiä ja tallennusta varten. Tämä ajoittainen kannettavalla mittalaitteella tehtävä mittaus tapa on halvempi vaihtoehto jatkuvalle mittaukselle, mutta ei välttämättä sovellu kaikkiin tilanteisiin.

Kiinteään ja jatkuvaan mittaukseen sekä tutkimuskäyttöön tarkoitettut mittalaitteet ovat kannettaviin mittalaitteisiin verrattuina parempia signaalinkäsittely ominaisuuksiltaan ja usein mahdollistavat monikanavaisen mittaamisen. Lisäksi näillä laitteilla saadaan aikaseksi tarkemmat mittaustulokset. Mittalaitteen lisäksi tarvitaan myös tietokone mittalaitteen käyttämiseksi ja tulosten tarkastelemiseksi, joten laitteisto on huomattavasti monimutkaisempi verrattuna kannettavaan mittalaitteeseen. (Adams 2010)

3.4.2 Värähtelymittaukseen perustuva kunnonvalvontalaite

Värähtelymittauksiin perustuva Reilhofer KG:n kunnonvalvontalaite on suunniteltu käytettäväksi uusien moottorien tai vaihteistojen tuotannon koekäytön aikaiseen kunnonvalvontaan. Laite sisältää värähtelymittalaitteen lisäksi ohjelmiston, joka tekee kerätyn mittausdatan perusteella tilastollista vertailua mittauksessa olevasta kohteesta. Tärkeimpänä tavoitteena laitteen käyttämisellä on tuotannon laadunparantaminen eli viallisten yksilöiden havaitseminen mahdollisimman varhaisessa vaiheessa tuotannon lopputaustuksessa.

Laitteen toiminta perustuu kiihtyvyyssanturiin, joka on kytkettynä mitattavaan kohteeseen ja johtimen välityksellä mittalaitteeseen. Mittalaite on edelleen kytkettynä väyläyhteydellä testauspenkkiin ja Ethernet yhteydellä mittalaitteen tietokoneeseen esitystä varten. Kuvassa 12 esitetään nämä laitteeseen liittyvät komponentit ja niiden väliset yhteydet.



Kuva 12. Kunnonvalvontalaitteen yleinen toiminta.

Mitattavassa kohteessa voi olla kiinnitettynä yksi tai useampi mitta-anturi eri pisteissä riippuen halutusta mittaustavasta. Kaikki mitta-anturit kiinnitetään omiin laitteen mittauskanaviin, jolloin kaikkien antureiden mittaukset käsitellään erikseen. Värähtelymittauksen lisäksi mitattavasta kohteesta tarvitaan pyörimisnopeustieto, joka moottorin tapauksessa on kampiakselin pyörimisnopeus. Pyörimisnopeussignaalin käsittelyyn tarvitaan erillinen signaalinkäsittely-yksikkö (speedBox) mittalaitetta varten. Pyörimisnopeussignaali lähetetään yksiköstä mittalaitteelle ja mittalaitteen tietokoneelle näyttöä varten. Mitattavan kohteen yksilöintitiedot ja mittauksen suorituskomennot saadaan väyläyhteydellä testisolua käyttävästä tietokoneesta. Mittalaite tekee täten mittauksia täysin automatisoidusti normaalin moottorin koekäytön yhteydessä. Mittausdatan esittämiseen käytetään tavallista tietokonetta, jossa on käytössä Reilhoferin oma kunnonvalvontalaitteen käyttöliittymä.

Mittaustulokset on mahdollista esittää luvuissa 4.1–4.3 läpikäytävillä aikatason, taajuustason ja kertalukuesityksen tavoilla. Pyörimisnopeustieto tarvitaan kertalukuesitykseen, mutta laitteen käyttäminen on mahdollista myös ilman tätä valitsemalla tulosten esitystavaksi taajuustason. Laite tekee tilastollista valvontaa luvussa 5.6.1 esitettävien laatuindeksien avulla valittua mittaustulosten esitystapaa hyödyntämällä. Kaikki mittaustulokset tallennetaan myöhempää tarkastelua varten tietokoneen kovalevylle tai vaihtoehtoisesti verkkolevylle.

Mittaussignaalien vahvistuksen arvo on laitteessa asetettava siten, että signaalintasot saadaan mittausalueeseen nähden sopiviksi. Signaalin tarvitsema vahvistus riippuu värähtelyn voimakkuudesta eli eri mittauspisteet ja kuormitustasot tarvitsevat lähtökohtaisesti erisuuruiset signaalin vahvistuksen arvot. Signaalin näytteistystaajuus on valittava halutun tarkasteltavan taajuusalueen mukaisesti. Virhettä aiheuttava signaalin laskostumisilmiö on näkyvissä laitteen spektrin taajuusalueella. Laskostumisen välttämiseksi on käytettävä laskostumisenestosuodatinta, jonka avulla signaalista suodatetaan pois Nyquistin teoreeman mukaisesti puolet näytteistystaajuudesta ylittävät taajuudet. Spektrin resoluutioon on myös mahdollista vaikuttaa aikasignaalin pituutta muuttamalla ja tästä resoluutio muodostuu seuraavien laskukaavojen (14) ja (15) mukaisesti taajuustasossa ja kertalukuesityksessä.

$$Resoluutio[Hz] = \frac{Näytteistystaajuus[näytettä/sekunti]}{Aikasignaalin pituus[näytettä]}, \quad (14)$$

$$Resoluutio[Order] = \frac{Näytteistystaajuus[näytettä/kierros]}{Aikasignaalin pituus[näytettä]} \quad (15)$$

Aikasignaalin pituutta lisätessä mittausaika pitenee, mutta tällöin saadaan mittauspisteiden välit pienemmiksi. Toisin sanoen aikasignaalin pituutta kasvattamalla pystytään havaitsemaan alhaisempia taajuuksia, kun alhaisimmaksi nolasta poikkeavaksi taajuudeksi muodostuu kaavan (14) mukainen taajuus. Fourierin muunnoksella saadaan siis myös nolla taajuuden komponentti, jota ei tyypillisesti kuitenkaan käytetä. Lisäksi, jos aikasignaalin pituus kasvaa yhtä spektriä kohden, niin ajallisesti vakiossa kokonaismittauksessa keskiarvotettavien spektrien määrä vähenee. (Reilhofer 2016)

3.5 Mittaustilanne tuotannon koekäytössä

Kohdeyrityksen tuotannon koekäytössä kunnonvalvontalaitteella mitataan kaikki yhden koekäyttöhuoneen läpi menevät dieselmoottorit ja mittaustulokset tallennetaan mittalaitteen tietokoneen kovalevyille. Testisolun normaali koekäyttö sisältää kuusi eri kuormitustasoa, kuten esimerkiksi maksimitohon ja maksimiväännön alueet, joilta kaikilta mitataan yksi mittaustulos. Kuormitustasoilta saatetaan kuitenkin mitata myös useampi tulos, mikäli mitattavalle moottorille joudutaan tekemään tehonkorjauksia eli ajamaan jokin kuormitustaso uudelleen mahdollisesti useaan kertaan. Kaikissa mittauksissa käytetään kertalukuesitystä eli mittalaite käyttää moottorin pyörimisnopeustietoa tähän analysointitapaan. Kuormitustasoilla moottorin kierrosluku pysyy vakiona eli moottorin kierrosluvun vaikutusta värähtelyn voimakkuuteen ei tässä tapauksessa tutkita.

Mitta-anturina käytetään luvussa 3.3.3 esiteltyä kolmiakselista kiihtyvyyssanturia, jolloin käytössä on kolme mittakanavaa, yksi jokaiselle anturin suunnalle. Käytössä on vain yksi mittauspiste moottorin kiinnittimessä paletille ja anturin kiinnitykseen käytetään kuvan 13 mukaista kiinnitintä.



Kuva 13. Kiihtyvyyssanturin kiinnitysmekanismi tuotannon koekäytössä.

Anturin kiinnitin on aina asetettava uudelleen jokaisen moottoriyksilön tullessa koekäyttöön, minkä vuoksi anturin asemointi on tehtävä täsmälleen samalla tavalla jokaisella kerralla. Mittausdatan vertailukelpoisuuden parantamiseksi tarkan asemoinnin lisäksi myös ruuvien kiinnittäminen on tehtävä aina samalla kiristysmomentilla, jolloin kiinnittimen jännityksestä johtuvat värähtelyominaisuudet pysyvät mahdollisimman samanlaisena.

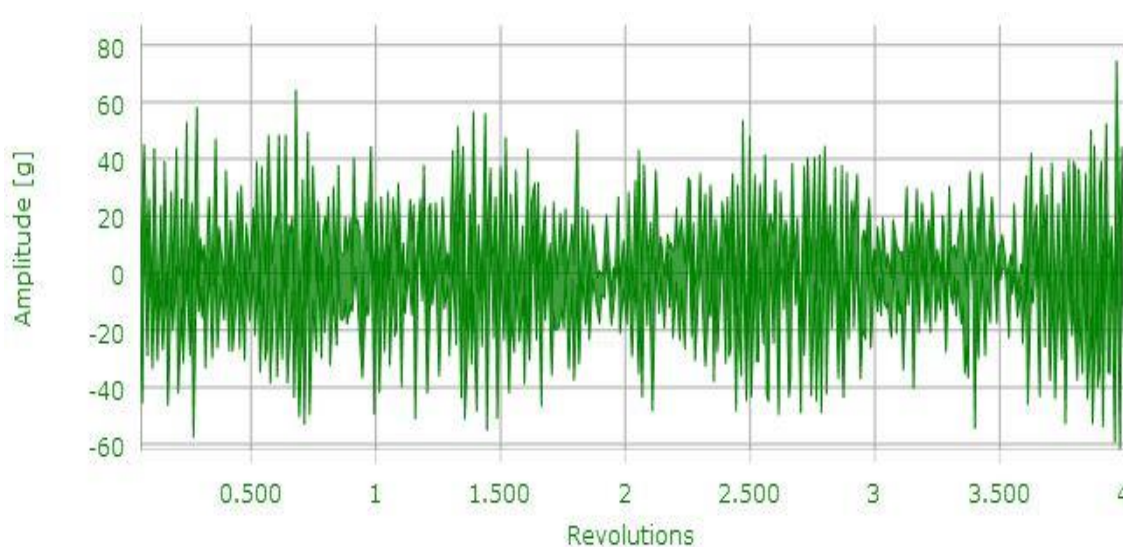
Mitattavia moottorityyppejä on useita erilaisia, joten erityyppisten moottorien mittausdataa käsitellään erikseen erilaisten värähtelyominaisuuksien takia. Kaikille moottorityypeille muodostuvat omat mittausilastot, joiden perusteella kunnonvalvontalaite tekee tilastollista vertailua. Erilaisten moottorityyppien mittausilastot on myös mahdollista yhdistää samaksi tilastoksi, mikäli havaitaan, että värähtelyominaisuudet ovat normaaliin hajontaan nähden tarpeeksi samankaltaiset.

4. MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Mittaustulosten analysoimiseksi on olemassa erilaisia datan esitystapoja. Esitystavoissa on omat etunsa riippuen tilanteesta, mutta yleisimmin käytetään taajuustason esitystapaa sen soveltuessa hyvin monien tilanteiden analysoimiseen.

4.1 Aikataso

Mittaussignaali on mahdollista esittää suoraan ajan funktiona ilman käsittelyjä, jolloin käytetään nimitystä aikatason esitys (time domain). Aikatasossa voidaan esittää esimerkiksi mittaussignaalin virran, jännitteen tai muun fyysikaalisen suureen vaihtelua ajan kuluessa. Analoginen jatkuva signaali on aina näytteistettävä eli pilkottava osiin, jotta sen tallentaminen ja jatkokäsittely mahdollistuu. Kuvassa 14 kunnonvalvontalaitteen esitystapa aikatason signaalille, jossa aikana käytetään moottorin kampiakselin kierrosten määrää ja vaihtelevana suurena signaalin amplitudia putoamiskihtiyyvyyden yksikössä.



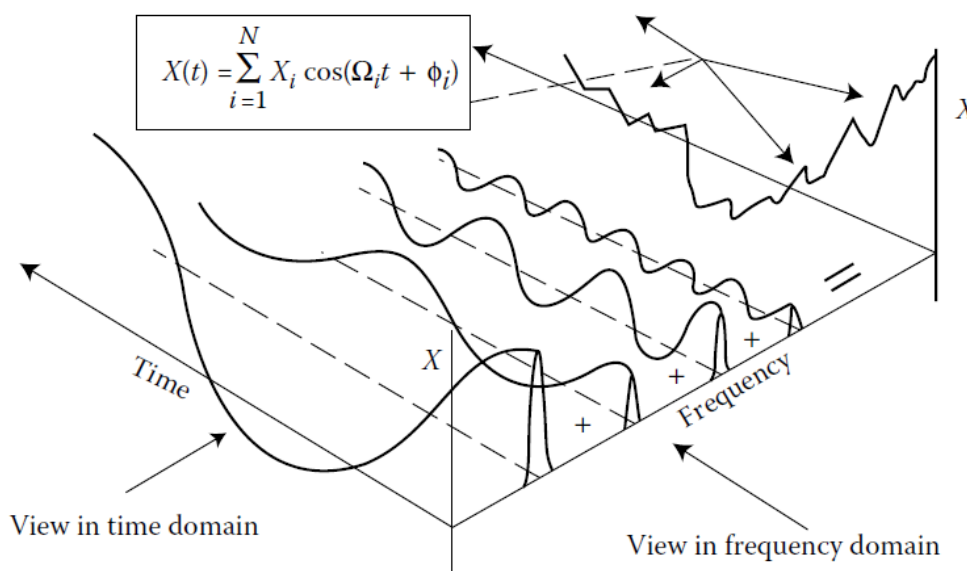
Kuva 14. Kunnonvalvontalaitteen aikatason signaali.

Tasapainotila on nollassa, jonka ympärillä signaalin amplitudi vaihtelee eli samoin kuin mekaanista värähtelyä tapahtuu tasapainotilan ympärillä. Päätelmiä aikasisignaalista voi tehdä esimerkiksi samanlaisten jaksojen esiintymisestä, joiden aikavälistä on mahdollista löytää niiden aiheuttaja. Aikatason esityksestä ei kuitenkaan tyypillisesti voi tehdä

kovin hyvää analyysiä signaalista tai mitattavasta kohteesta, joten mittaussignaalin analysoimisessa käytetään useammin seuraavassa luvussa 4.2 esitettävää taajuustason esitystapaa. (Aumala, Ihalainen et al. 1998)

4.2 Taajuustaso

Pyörivien koneiden, kuten polttomoottoreiden vikatilanteiden tutkimisessa on havaittu hyväksi tavaksi käyttää taajuustason esitystapaa (frequency domain). Taajuustason tarkastelussa jaetaan aikaisignaali taajuuskomponentteihin Fourierin sarjakehitelmän mukaisesti, jolloin saadaan parempi käsitys signaalin sisällöstä. Kuvassa 15 näkyy havainnollistava esimerkki signaalin jakautumisesta taajuuskomponentteihin.



Kuva 15. Aikatason signaalin muodostuminen taajuuskomponenteista. (Adams 2010)

Aikatason mittaussignaali on sen taajuuskomponenttien summa ja taajuustasossa tarkastellaan näiden komponenttien amplitudien X_i suuruutta. Amplitudin arvo on aina positiivinen, kun kuvassa 15 oleva kosinifunktio saa arvoja väliltä $[-1, 1]$, jolloin aikataason signaali vaihtelee tasapainotilansa eli nollan ympärillä. Nykyiset laitteet muodostavat aikataason signaalista taajuustason esityksen tyypillisesti perinteistä Fourierin integraaliin perustuvaa muunnosta nopeammalla FFT muunnoksella (Fast Fourier Transformation). Muunnos taajuustasoon on samalainen riippumatta mitattavasta suureesta eli värähtelyn tapauksessa siirtymästä, nopeudesta tai kiihtyvyydestä. (Adams 2010) Kohdeyhteyden

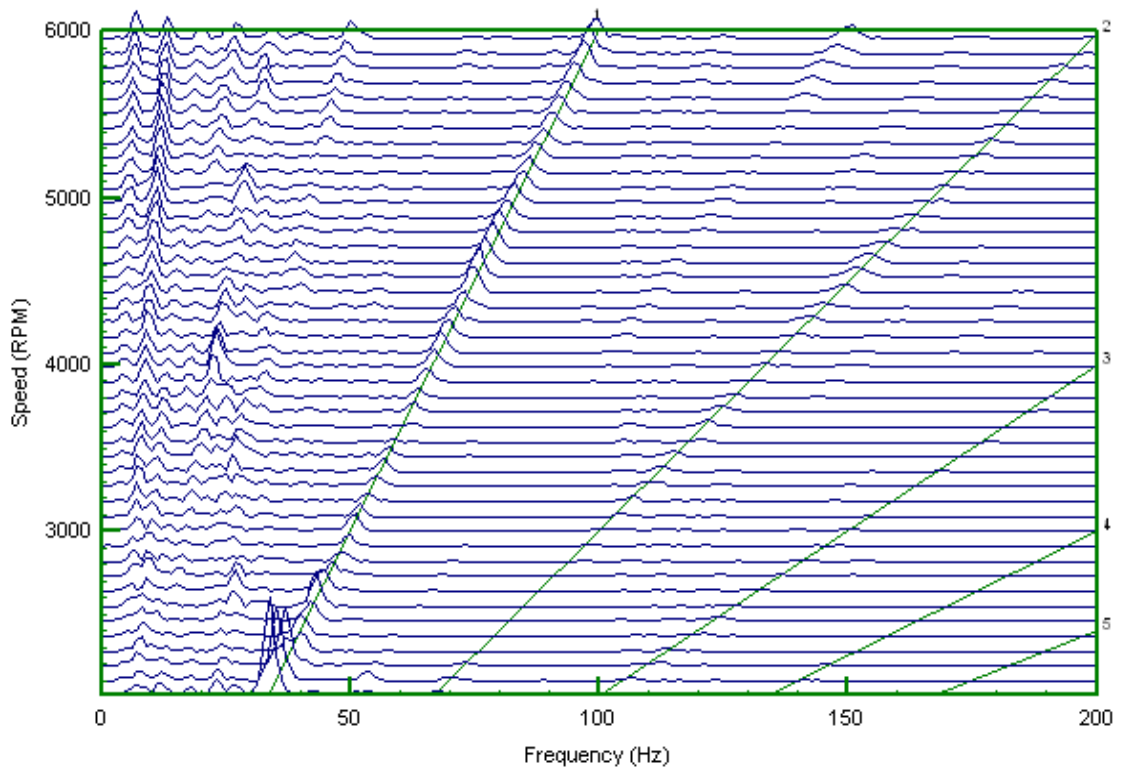
käyttämä kunnonvalvontalaite esittää muunnoksen seuraavassa luvussa 4.3 esitettävässä kertaluku muodossa, kun mitattavan moottorin pyörimisnopeustieto yhdistetään taajuustason esitykseen.

4.3 Kertalukuesitys

Kaikissa pyöriviä komponentteja sisältävissä koneissa värähtelyn herätteiden taajuus muuttuu pyörimisnopeuden muuttuessa, joten herätelähteiden tunnistamisen helpottamiseksi käytetään usein taajuustason sijasta kertalukuesitystä. Käsittelytapa muuttuu silloin taajuustason tapahtumia sekunnissa kertalukuesityksen tapahtumia kierroksen aikana ajattelutapaan. Tällöin pyörivän komponentin aiheuttaman herätteen kertaluku (order) pysyy samana pyörimisnopeudesta riippumatta. Kertaluvut lasketaan komponentin pyörimistaajuudesta seuraavan laskukaavan (16) avulla.

$$Order = \frac{f_{komponentti}[Hz]}{f_{kampiaksi}[Hz]}, \quad (16)$$

Kertaluku kertoo komponenttien pyörimisnopeuksien välisen suhteen ja polttomoottorin tapauksessa vertailukohtana käytetään kampiakselin pyörimistaajuutta, kun sen pyörimisnopeutta tyypillisesti mitataan. Yhtä hyvin voitaisiin käyttää myös jonkin muun pyörivän komponentin pyörimisnopeutta vertailukohtana. Kuva 16 lisäksi havainnollistaa kertalukujen taajuuden muuttumista pyörimisnopeuden muuttuessa.



Kuva 16. Kertalukujen näkyminen kaltevina viivoina vesiputoussesityksessä. (Mercer 2001)

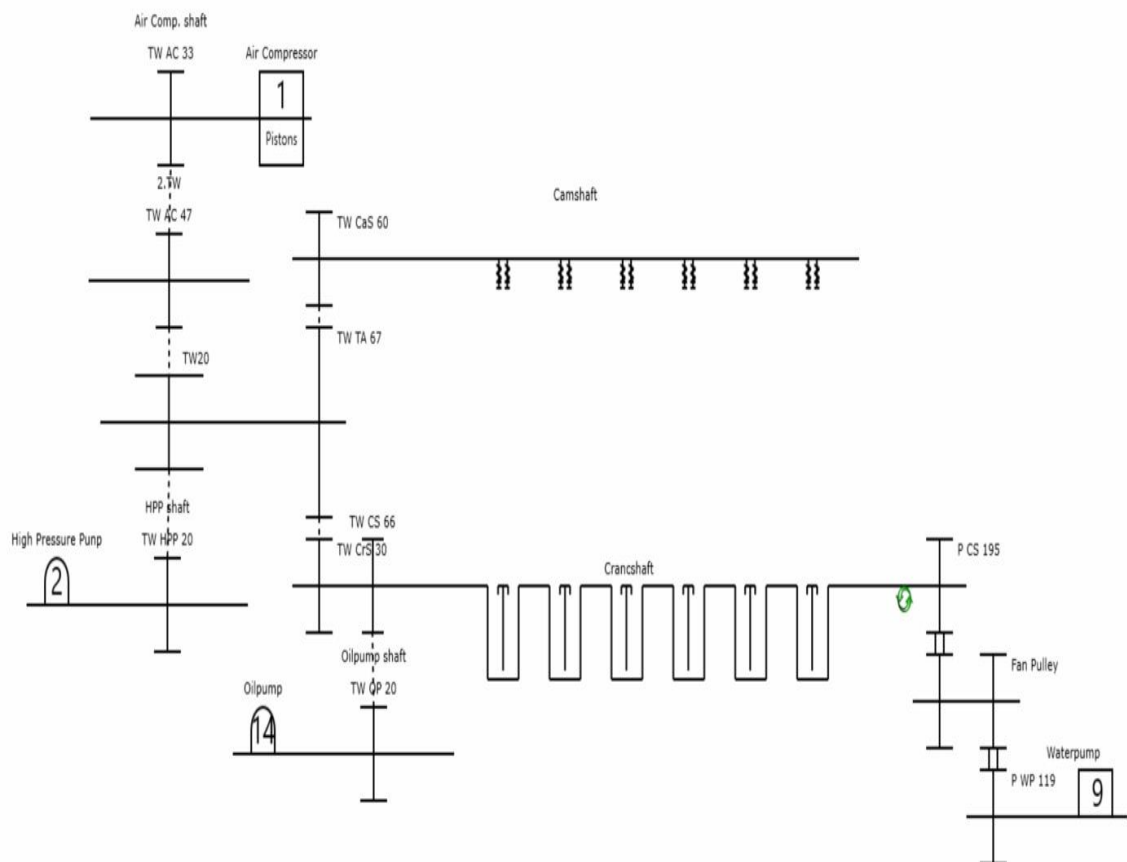
Kertaluvut ovat havaittavissa viivoina kuvan 16 vesiputoussesityksessä. Viivojen kaltevuus tarkoittaa, että herätteiden taajuus muuttuu pyörimisnopeuden muuttuessa ja yksi viiva kuvaa aina samaa tai samoja herätteitä. Kertalukuesitys soveltuu myös komponenttien pyörimisnopeuden vaikutuksen tutkimiseen värähtelyvasteen voimakkuuteen esimerkiksi resonanssitaajuuksia etsittäessä, kun mitatun vasteen voimakkuus muuttuu pyörimisnopeuden muuttuessa.

Hammaspyörien tapauksessa kertaluku saadaan pyörimistaajuuden lisäksi ryntötaajuudelle kertomalla kaavan (11) tulos hampaiden lukumäärällä. Samaa laskutapaa voidaan käyttää myös esimerkiksi pumpuille, joissa lapataajuuden kertaluku saadaan samalla tavalla laskemalla käyttäen siipien lukumäärää. (Kinsler 2016)

4.4 Kertalukulaskin

Kunnonvalvontalaitteen kertalukulaskimen avulla voidaan mallintaa polttomoottorin tai vaihteiston rakennetta, johon sisällytetään pyörivien komponenttien välityssuhteisiin liittyviä tietoja. Malliin muodostetaan pyörivien komponenttien väliset yhteydet ja rakentee-

seen saadaan lisättyä myös liitännäisiä komponentteja, kuten öljypumppu ja vesipumppu. Seuraavassa kuvassa 17 on yhdestä kuusisylinterisestä moottorityypistä muodostettu kertalukulaskimen malli. Kuvan keskellä pitkällä vaakasuuntaisilla osioilla kuvataan alempana kampiakselia ja ylempänä nokka-akselia. Näiden komponenttien välillä on vasemmassa reunassa hammaspyörävälitys yhden apuhammaspyörän avulla. Apuhammaspyörään on lisäksi yhteydessä hammaspyörävälityksellä vasemman yläreunan paineilmakompressori ja vasemman alareunan polttoaineen korkeapainepumppu. Kampiakseliin on lisäksi yhteydessä erillisellä hammaspyörällä öljypumppu ja oikeassa reunassa kuvattuna hihnavälityksellä jäähdytyksen vesipumppu.

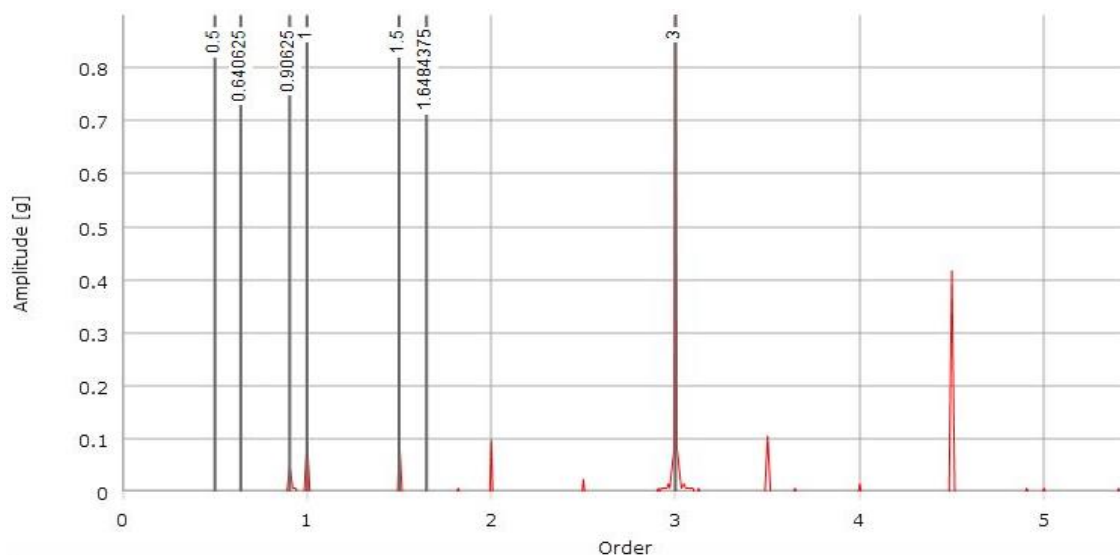


Kuva 17. Kertalukulaskimen rakenteen malli.

Välityssuhteisiin vaikuttavia tietoja ovat muun muassa hammaspyörien hampaiden lukumäärät, hihnapyörien halkaisijat ja laakerien osien halkaisijat. Näiden tietojen avulla kertalukulaskin laskee kaikkien rakenteeseen liitettyjen pyörivien komponenttien herätteiden kertaluvut. Kertalukulaskin laskee kertalukuja ensimmäisestä herätteen kertaluvusta viiteenkymmeneen harmoniseen monikertaan asti. Komponenttien kertaluvut muodostuvat niiden pyörimisnopeuden suhteesta kampiakselin pyörimisnopeuteen. Kampiakselin

kertaluku on aina yksi, sillä moottorin pyörimisnopeus mitataan kampiakselista. Vaihteis-
tojen tapauksessa ensimmäisen kertaluvun heräte, johon muut komponentin on synkro-
noitu, voi vaihdella riippuen muun muassa pyörimisnopeuden mittaustaikasta.

Kertalukulaskimen tulosten yhdistäminen mitattuun dataan helpottaa tärkeiden kertalu-
kujen löytämistä mittausdatasta. Kuvassa 18 on kertalukulaskimen tiedot yhdistettynä
mittausdataan.



Kuva 18. Lasketut kertaluvut yhdistettynä mittausdataan.

Kuvassa 18 näkyvät pystyviivat osoittavat kertalukulaskimella laskettuja komponenttien
kertalukuja ja yksi pystyviiva eli yksi kertaluku voi liittyä useaan eri herätteeseen. Pysty-
viivat auttavat epäilyttävän korkeiden tai poikkeavien amplitudien kohdistamisessa nii-
den mahdollisiin aiheuttajiin. Tämä nopeuttaa moottorien mahdollisten vikojen syiden et-
simistä, kun on mahdollista havaita välittömästi epäilyttävät komponentit.

5. POLTTOMOOTTORIN DIAGNOSTIIKKA

Värähtelymittaustulosten perusteella diagnoosin tekemiseksi käytetään apuna erilaisia tilastolliseen analyysiin perustuvia menetelmiä. Analyysi – oire – diagnoosi ketjun avulla pyritään löytämään joukosta poikkeavia yksilöitä ja kohdentamaan poikkeaman syy johonkin komponenttiin sekä tunnistamaan komponentissa oleva vika. Diagnosointiketjun tarkka määrittelemisen ei kuitenkaan ole vielä värähtelymittausten kehitystyön alkuvaiheessa mahdollista ilman hieman pidemmän ajan kokemusta todellisten vikatilanteiden kohtaamisesta. Tässä luvussa käsitellään ketjua pääasiassa kokonaisuutena eli annetaan esimerkkejä diagnosoinnin etenemisestä.

5.1 Mittaustulosten tilastollinen tarkastelu

Värähtelymittaustulosten tilastollisella tarkastelulla pyritään hahmottamaan mitattavan joukon tyypillistä värähtelyn spektriä ja sen hajontaa matemaattisten menetelmien avulla. Ideaalisessa tilanteessa mittaustulosten arvojen tulisi noudattaa normaalijakaumaa jokaisella kertaluvulla ja resoluution mukaisella mittapisteellä. Luvussa 5.3 kerrotaan mahdollisista virhelähteistä, jotka vaikuttavat tulosten vaihteluun ja edelleen näkyvät tilastollisen tarkastelun yhteydessä. Tämä voi aiheuttaa esimerkiksi poikkeavuutta normaalijakaumasta ja mittaustilastosta voidaan tehdä virheellisiä päätelmiä. (Mellin 2006)

Moottorityypin mittaustuloksia ollessa tarpeeksi tilastollista tarkastelua varten, voidaan mittaukseen tulevia moottoriyksilöitä verrata jo mitattuun tilastoon ja arvioida yksilön värähtelyn sopivuutta moottorityypin joukkoon. Mikäli moottoriyksilö poikkeaa värähtelymittaustulokseltaan joukostaan, voidaan yksilön todeta olevan suurella todennäköisyydellä viallinen. Tässä luvussa 5 esitellään tapoja viallisten yksilöiden löytämiseen ja viallisen komponentin kohdentamiseen. Oletuksena tilastollisessa tarkastelussa on, että suuri osa moottorityypin joukosta on värähtelyominaisuuksiltaan samankaltaisia siten, että vialliset yksilöt ovat erotettavissa selkeästi joukosta.

Yksittäisen moottorityypin tilastollisen joukon tarkastelemisen lisäksi voidaan vertailla moottorityyppien joukkoja keskenään. Tämän avulla on mahdollista tunnistaa värähtelyominaisuuksiltaan samankaltaisia moottorityyppejä. Mikäli moottorityyppien värähtelymittaustulosten tilastot havaitaan tarpeeksi samankaltaisiksi, voidaan tässä tapauksessa tilastot yhdistää ja käsitellä niitä yhtenä tilastona. Tästä on etua esimerkiksi tilanteessa,

jossa yhden moottorityypin mittaustuloksia on vain vähän pienen volyymin takia. Yhdistämisen jälkeen myös pienen volyymin moottorityyppejä on mahdollista verrata suurempaan tilastoon.

5.2 Mittaustulosten virhelähteiden arviointi

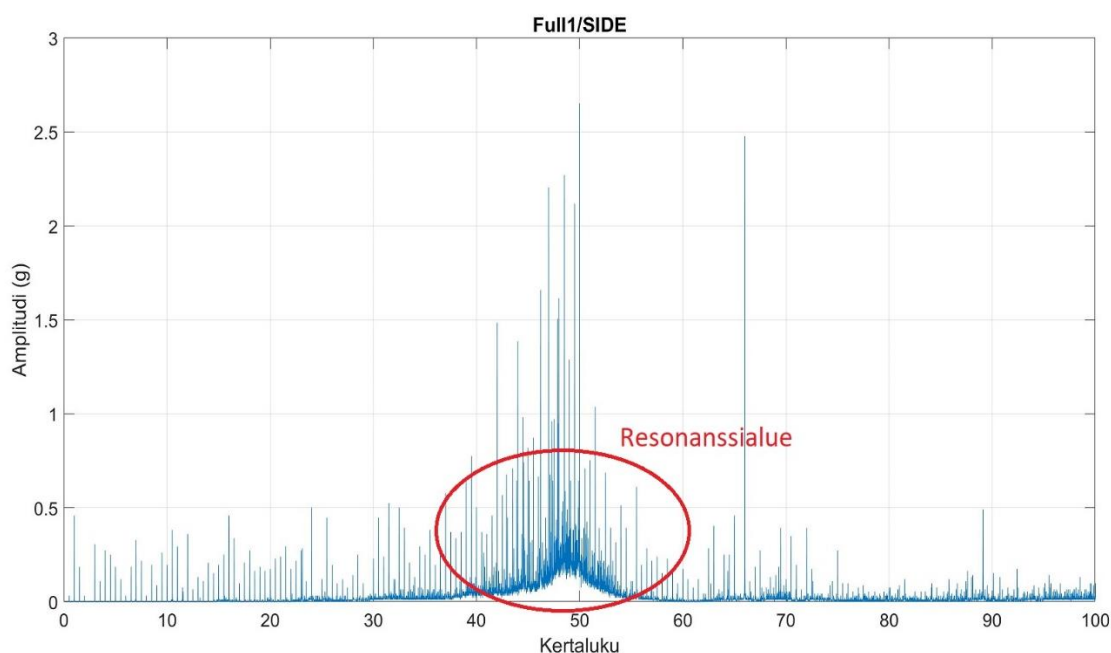
Värähtelymittaustuloksissa saattaa esiintyä mittaustapahtumasta, mittalaitteistosta ja mitattavan moottorin ominaisuuksista johtuvia virheitä. Tilastollisessa tarkastelussa samanlaisena toistuvat virheet kaikissa mittauksissa eivät suuresti vaikuta viallisten yksilöiden tunnistamiseen. Puolestaan satunnaisesti ja silloin tällöin esiintyvät virheet saattavat vaikeuttaa huomattavasti vikatilanteiden analysointia. Saatetaan esimerkiksi tehdä virheellisiä päätelmiä vioista, joita ei todellisuudessa ole.

5.2.1 Mittaustapahtuman virheet

Mittaustapahtuman yhteydessä voi esiintyä kiihtyvyyssanturin jatkuvaan uudelleenkiinnittämiseen liittyviä ongelmia, jotka aiheuttavat mittaustuloksiin virheitä. Anturin kiinnityksen vaihtelut tulee minimoida, sillä silloin kiinnityksestä aiheutuva virhe aiheuttaa vähemmän haittaa tilastollisessa tarkastelussa, kun mahdollinen virhe esiintyy aina samanlaisena.

Anturin sijoittaminen on tehtävä jokaiselle mittaukselle mahdollisimman samalla tavalla, jolloin mittauskohda moottoriyksilöiden välillä pysyy samana ja edelleen mitattu värähtely on vertailukelpoista. Pienetkin muutokset anturin asennossa tai paikassa voivat näkyä merkittävänä erona mitatun värähtelyn voimakkuudessa eri taajuusalueilla. Mitä enemmän anturin kiinnityksen yhteydessä esiintyy vaihtelua, sitä enemmän mittaustulokset vaihtelevat siitä aiheutuvan virheen takia. Esimerkiksi mittauspisteestä etäällä olevat vian aiheuttajat saattavat sekoittaa kiinnittimen sijainnin muutosten hajontaan eli viat voisivat muutoin olla havaittavissa.

Kiihtyvyyssanturin kiinnittimellä on aina omat resonanssitaajuusalueet, joilla mitattu värähtely on voimakasta. Kiinnittimen resonanssitaajuusalue riippuu materiaalista, koosta ja muodosta. Resonanssialue tulee pyrkiä ohjaamaan sellaiselle taajuusalueelle, joka ei ole mahdollisesti yleisimmin esiintyvien vikojen kannalta tärkeällä alueella. Tämän lisäksi kiinnittimen rakenteen mukaan, on kiinnittimen kiinnitysruuvit kiristettävä mahdollisimman tarkasti samaan kireyteen. Kiinnitysruuvien kireydellä on mahdollisesti vaikutus resonanssitaajuusalueen sijaintiin eli kiinnittimen resonanssi ilmenee eri kireyksillä eri taajuuksilla. Seuraava kuva 19 havainnollistaa resonanssin näkymistä mitatussa spektrissä.



Kuva 19. Resonanssialueen näkyminen mittaustuloksen kertalukuesityksessä.

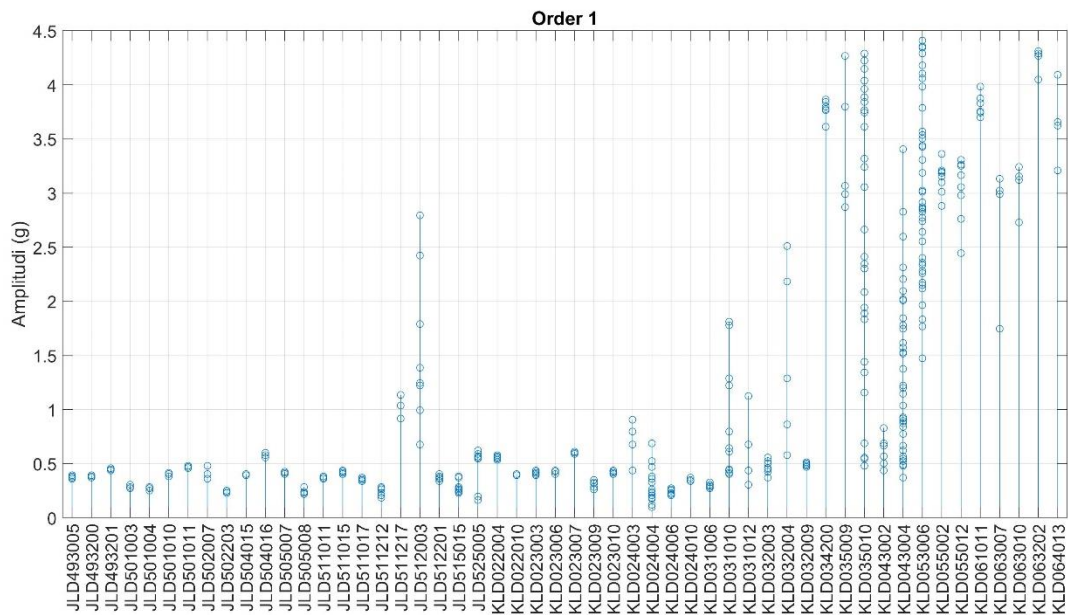
Värähtelyn voimakkuus kasvaa yleisesti resonanssikohtassa ja moottorin komponenttien herätteet näkyvät siinä kohdassa voimistuneina. Resonanssikohtien mittaustulosten tilastollinen vertailu ei täten ole järkevää resonanssin aiheuttaessa tuloksiin suurempaa hajontaa. Resonanssikohtien olemassaolo tarkasteltavalla taajuuskaistalla ei aiheuta ongelmia käytettävän kunnonvalvontalaitteen toimintaan, mutta viat, jotka ilmenevät näissä kohdissa voivat jäädä huomaamatta. Resonanssitaajuusalueiden sijainnin vaihtelun tulisi kuitenkin olla mahdollisimman vähäistä. Anturin kiinnittimen resonanssitaajuus on mahdollista määrittää iskukokeella, jolloin saadaan tietoon alueen sijainti. Resonanssitaajuusalueen sijaintitietoa voidaan edelleen käyttää apuna mittaustulosten tarkastelemisessa, kun tiedetään, mikä resonanssi aiheutuu anturin kiinnittimestä ja mikä mahdollisesti muusta moottorin rakenteesta.

5.2.2 Mittauskaluston virhelähteet

Mittalaitteistosta voi myös aiheutua virheitä mittaustuloksiin. Virhe voi aiheutua mittaus-signaalin sisältämästä virheestä tai mittalaitteen tekemästä signaalinkäsittelyn virheestä. Kumpikin virhe on mahdollisuuksien mukaan poistettava tai pyrittävä ainakin pitämään virhe aina samanlaisena.

Mittaus-signaalissa oleva virhe voi aiheutua esimerkiksi mitta-anturin ja mittalaitteen välillä olevien johtimien ja liittimien sähköhäiriöistä. Anturin johtimen ollessa vioittunut tai

liittimien kontaktin ollessa huono, ei mittaussignaalia ja mittaustulosta voida pitää luotettavana. Ensisijaisesti mittauksen sähköhäiriöt on mahdollista havaita täysin poikkeavina signaalintasoina tavalliseen verrattuna eli joko kovin suurena tai lähes olemattomana. Mittaustuloksista sähköhäiriöitä on mahdollista havaita seuraamalla jonkin kertaluvun mittaustuloksia moottorikohtaisesti aikajärjestyksessä. Kuvassa 20 näkyy esimerkki mittaustuloksista moottorikohtaisesti aikajärjestyksessä. Kuvassa 20 näkyy esimerkki mittaustuloksista moottorikohtaisesti aikajärjestyksessä. Kuvassa 20 näkyy esimerkki mittaustuloksista moottorikohtaisesti aikajärjestyksessä.

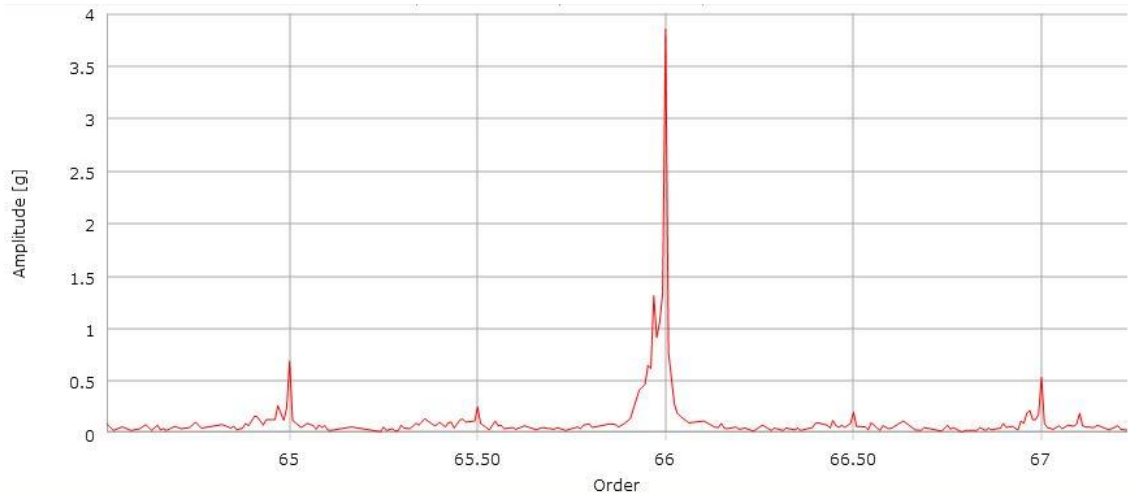


Kuva 20. Sähköhäiriön näkyminen hajonnan kasvamisena moottorikohtaisissa mittaustuloksissa.

Yksi piste tarkoittaa yhtä mittausta kuvan 20 tapauksessa kertaluvulla 1 ja useat mittaustulokset yhdellä x-akselin moottorin sarjanumerolla johtuvat koekäytön aikaisista uusintamittauksista. Y-akselilla on amplitudin suuruus putoamiskiihtyvyyden yksikössä. Moottoriyksilöjen ollessa x-akselilla aikajärjestyksessä nähdään, että hajonta on alkanut kasvamaan huomattavasti jossain vaiheessa. Hajonnan syy on todennäköisesti mittaustahtuman sähköhäiriö.

Mittalaitteen signaalinkäsittelystä saattaa myös aiheutua virhettä. Aikatason signaalin muuntamisessa taajuustasoon eli Fourierin muunnoksen yhteydessä. Seurauksena voi olla esimerkiksi, että amplitudit eivät ole juuri sillä taajuudella, missä niiden todellisuudessa kuuluisi olla. Amplitudit voivat myös näkyä jakautuneina useammalle eri taajuudelle oikean taajuuden ympärillä. Tämän lisäksi nopeussignaalin yhdistämisessä mitattuun spektriin saattaa muodostua virheitä, jos esimerkiksi nopeussignaalin mittaamisessa on häiriöitä. Tällöin amplitudit eivät välttämättä ole tarkasti oikeiden kertalukujen

kohdilla, vaan poikkeavat hieman oikeista kohdistaan. Nämä virheet eivät samanlaisina pysyessään aiheuta haittaa tilastollisen tarkastelun ja yksilöiden välisen vertailun yhteydessä, mutta voivat vaikeuttaa vian kohdistamista. Esimerkiksi tutkittaessa jonkun komponentin aiheuttaman herätteen laskettua kertalukua voidaan virheellisesti tutkia spektrin väärää kohtaa, jos herätteen aiheuttama amplitudi sijaitsee hieman eri kertaluvulla kuin laskettu kertaluku. Kuvassa 21 näkyy amplitudin jakaantuminen ja sijainnin poikkeaminen, joka johtuu mittalaitteen käsittelyvirheestä.



Kuva 21. Amplitudin jakaantuminen ja poikkeaminen.

Esimerkkikuvan amplitudi on osittain jakautunut kertaluvun 66 eteen, mutta suurin amplitudin kärki on kuitenkin oikeassa kohdassa. Joissain tapauksissa suurin amplitudi saattaa olla hieman eri kohdassa, kuin missä sen teoreettisesti kuuluisi olla. Tämä johtuu myös mittalaitteen käsittelyvirheestä esimerkiksi pyörimisnopeussignaalin yhdistämisessä.

5.2.3 Moottorin ominaisuuksien aiheuttama hajonta

Moottorien komponenttien valmistuksessa ja kokoonpanossa olevasta hajonnasta aiheutuu hajontaa myös värähtelymittaustuloksiin. Tässä yhteydessä kyse ei ole niinkään virheestä, vaan ominaisuudesta. Moottorien värähtelymittaustuloksien luonnollista hajontaa pitäisi pyrkiä mahdollisuuksien mukaan minimoimaan pitämällä valmistuksen ja kokoonpanon laatu hyvänä.

Komponenttien valmistuksesta aiheutuvan hajonnan pienentämiseen on mahdollista vaikuttaa esimerkiksi pyrkimällä minimoimaan materiaaliominaisuuksien vaihteluja komponenttiyksilöiden välillä tai asettamalla mittatoleranssit mahdollisimman pieniksi. Materiaaliominaisuudet vaikuttavat värähtelyn johtumiseen moottorin rakenteessa ja sen

vuoksi vaihtelut materiaaliominaisuuksissa kasvattavat värähtelyn voimakkuuden hajontaa. Moottorin komponenttien rakenteen mittojen vaihtelu kasvattaa myös värähtelyn hajontaa, kun komponenttien muodot hieman vaihtelevat, mikä johtaa osaltaan myös moottorin toiminnan aikaisiin vaihteluihin, kuten sylinteripaineiden vaihteluun. Muun muassa näiden asioiden vuoksi värähtely on erilaista moottoriyksilöiden välillä.

Moottorin kokoonpanoon liittyvä vaihtelu voi johtua muun muassa vaihtelusta osien kiinnittämisessä. Osien ollessa kiinnitettynä hieman eri lailla esimerkiksi kiinnitysruuviin eri kireyksillä, ovat kiinnityksissä olevat jännitykset erilaisia, mikä edelleen muuttaa osien ja moottorikokoonpanon värähtelyominaisuuksia. Toisin sanoen, osien kokoonpanovaiheen tarkkuus vaikuttaa moottorin värähtelyn vaihteluun.

Moottorin lämpötilan muutokset saattavat aiheuttaa virheen mittaustulokseen. Kuormitustasojen mittaukset tehdään useimmissa tapauksissa samassa lämpötilassa, mutta jos jostain syystä esimerkiksi moottorin koekäytön pituus on poikkeava tavalliseen verrattuna, saattaa jokin kuormitustason mittaus tallentua poikkeavassa lämpötilassa. Lämpölaajenemisen takia ovat esimerkiksi komponenttien väliset välykset erilaisia ja tämän takia edelleen on värähtely erilaista. Poikkeavan lämpötilan mittaustulos ei siis välttämättä ole muihin mittaustuloksiin hyvin vertailukelpoinen. Samalla poikkeavien koekäytöjen pituuksien yhteydessä uusi moottori saattaa hioutua eri lailla, millä on pieni vaikutus värähtelyyn.

Kiihtyvyyssanturin kiinnittimen häiritsevän resonanssin lisäksi ovat myös moottorin omat resonanssitaajuudet, joiden vaikutus vaihdellessaan häiritsee mittaustulosten tilastollista tarkastelua. Resonanssialueiden vaihteluun vaikuttaa esimerkiksi edellä mainittujen materiaaliominaisuuksien ja rakenteen mittojen vaihtelut. Mitä tasalaatuisempia moottorit ovat materiaali- ja toleranssiominaisuuksiltaan, niin sitä pienempää myös resonanssialueiden taajuusalue sijaintien vaihtelevuus. Moottorin rakenteen tyypilliset resonanssialueet ovat siis aina olemassa jollain taajuusalueella, mutta niiden sijaintiin voidaan vaikuttaa.

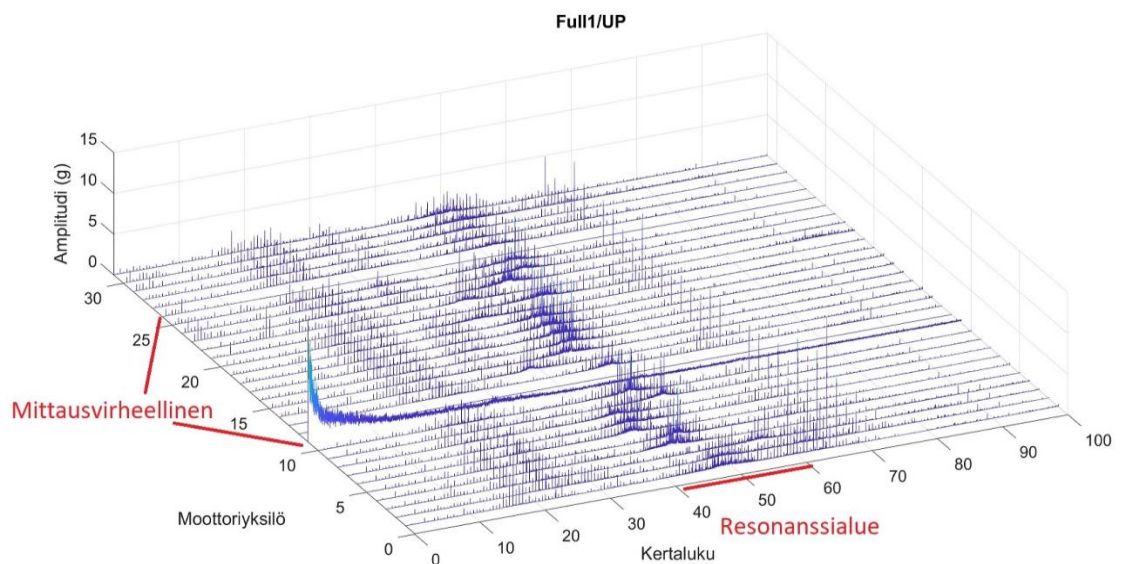
5.3 Mittaustulosten vertailukelpoisuus

Moottorityypin yksilöiden välistä mittaustulosten vertailukelpoisuutta on arvioitava tilastollisen tarkastelun pätevyyteen liittyen. Tarkastelulla pyritään selvittämään mittaustulosten hajontaa ja samalla arvioimaan onko mittaustulosten perustella yleensä mahdollista havaita poikkeavia yksilöitä vai hukkuvatko viallisetkin yksilöt hajontaan. Tässä luvussa 5.3

esiteltävät työkalut auttavat asian hahmottamisessa ja samalla on mahdollistavat täysin joukosta poikkeavien mittaustuloksien havaitsemisen.

5.3.1 Vesiputousesitys

Vesiputousesityksen avulla on mahdollista visuaalisesti havaita joukosta voimakkaasti poikkeavia mittaustuloksia ja amplitudeja eri taajuuksilla tai kertaluvuilla. Tämän lisäksi nähdään tyypilliset resonanssitaajuualueet ja taajuualueet, joilla mittaustulokset on hyvin vertailukelpoista. Kuvassa 22 näkyvät 31:n eri moottoriyksilön mittaustulokset vierekkäin y-akselilla vesiputousesityksessä. Mittaustulokset ovat täyden tehon kuormitustilanteesta ja pystysuuntaisesta kiihtyvyyssanturin mittauskanavasta. Vesiputousesityksessä on x-akselilla kertaluvut ja z-akselilla amplitudin suuruus putoamiskiihtyvyyden yksikössä.



Kuva 22. Vesiputousesitys 6-sylinterisen moottorimallin mittaustuloksista.

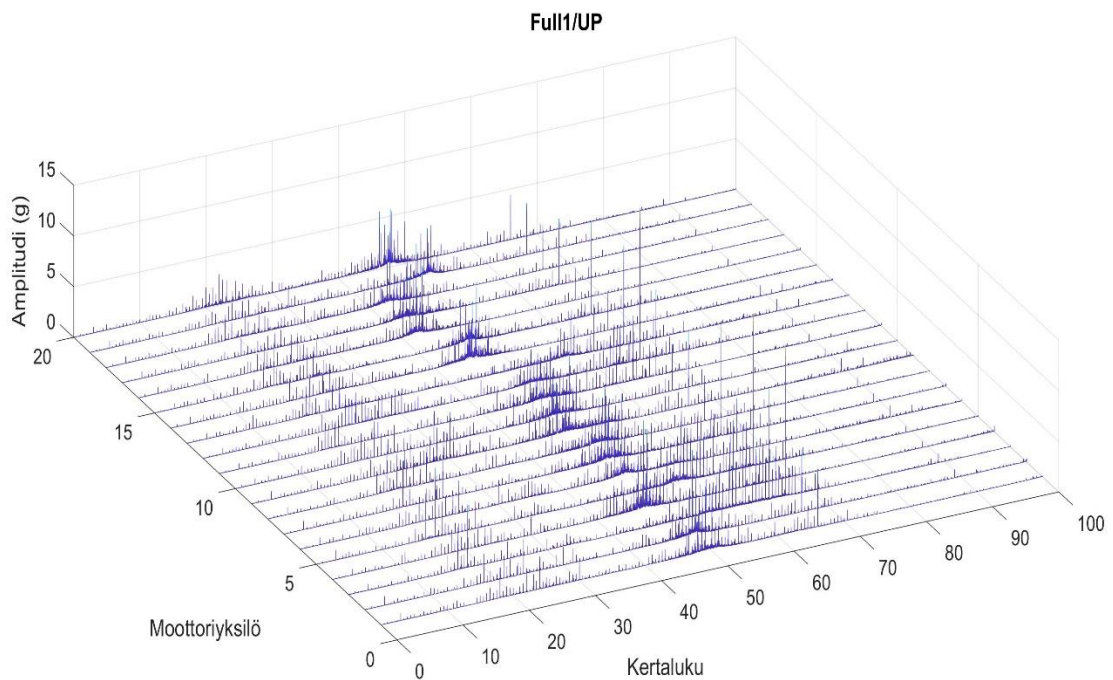
Vesiputousesityksestä on helposti havaittavasti ainakin kaksi selkeästi erilaista mittaustulosta, jotka ovat merkittyinä punaisilla viivoilla y-akselilla. Näiden poikkeavien mittaustulosten todennäköisin syy on sähköhäiriöstä aiheutuva mittausvirhe. Tämän vuoksi nämä mittaustulokset on syytä jättää pois tilastollisesta tarkastelusta virheellisten päätelmien välttämiseksi ja tilastovirheen pienentämiseksi. Isossa kymmenien tai satojen mittaustulosten joukossa muutamat virheelliset mittaukset eivät kuitenkaan aiheuta merkittävää tilastovirhettä, mutta niiden poistaminen kuitenkin parantaa tarkastelun luotettavuutta.

Kuvan 22 vesiputousesityksessä on lisäksi nähtävillä x-akselilla punaisella merkittynä tyypillinen resonanssialue eli tässä tapauksessa noin 40 kertaluvusta 60 kertalukuun. Tämän avulla tiedetään kertalukualue, jolta ei ensisijaisesti ole järkevää etsiä viallisia moottoriyksilöitä tai komponentteja resonanssin tuoman epävarmuuden takia. Mikäli mittaustulosten välisiä amplitudeja verrattaisiin tällä alueella, on mahdollista, että havaitaan vikoja todellisuudessa viattomista moottoreista. Toisaalta samalla tiedetään kertalukualueet, joilla mittaustulokset ovat puolestaan paremmin vertailukelpoisia ja viat ovat todennäköisesti havaittavissa, kuten esimerkin tapauksessa kertalukujen alusta noin kertalukuun 40 asti.

Kertaluvut, joilla on yleisesti suurimmat amplitudit, ovat myös nähtävissä vesiputousesityksessä. Kuvan 22 tapauksessa esimerkiksi kertaluvun 66 öljypumpun hammaspyörän ryntötaajuuden suuri amplitudi on selkeästi havaittavissa. Mittauspisteen mukaan nähdään siinä voimakkaimmin vaikuttavat värähtelyn herätteet. Tämänhetkinen värähtelyn mittauspiste sijaitsee lähellä öljypumpun ja jakopään hammaspyöriä, joten näiden herätteiden näkyminen suurina amplitudeina on odotettavaa.

Aikajärjestyksessä olevista vesiputousesityksen moottoriyksilöiden mittaustulosten yleisen käyttäytymisen muutoksia on myös mahdollista havaita. Nähtävät muutokset voivat olla esimerkiksi resonanssialueiden siirtymisiä ja jonkin taajuusalueen amplitudien kasvamista tai pienenemistä. Merkittävien ja jatkuvien muutoksien ilmaantuessa on tutkittava muutoksen aiheuttajaa ja sen vakavuutta. Muutokset voivat kertoa esimerkiksi mitaustapahtuman tai moottorin valmistusprosessin muutoksista.

Seuraavassa kuvassa 23 on esimerkkinä aiemman kuvan 22 kaltainen kahden erilaisen kuusisylinterisen moottorityypin mittaustulokset samassa vesiputousesityksessä. Ensimmäisen moottorityypin mittaustulokset ovat 1–10 ja toisen moottorityypin mittaustulokset ovat 11–20.



Kuva 23. Vesiputousesityksen kahden erilaisen moottorityypin mittaustuloksista.

Silmämääräisesti vesiputousesityksen perusteella kahden erilaisen moottorityypin mittaustulokset eivät merkittävästi eroa toisistaan. Suurimmat amplitudit ilmenevät kummassakin tapauksessa samoilla kertalukualueilla. Jälkimmäisen moottorityypin mittaustuloksissa kuitenkin resonanssialueen sijainti vaikuttaa vaihtelevan jonkin verran enemmän, kuin ensimmäisen moottorityypin mittaustuloksissa. Syynä suurempaan vaihteluun voi olla jonkin erilaisen moottorin komponentin aiheuttama kasvanut moottorin ominaisuuksien vaihtelevuus. Toisaalta alueen vaihtelu pysyy kuitenkin samalla kertalukualueella, joten vaihtelun lisääntyminen voi olla sattumaa ja täysin luonnollista. Asian jatkoselvittämisessä olisi käytettävä vielä useampia vastaavia otantoja, jonka jälkeen on mahdollista tehdä parempi päätelmä toisen moottorityypin resonanssialueen erilaisesta vaihtelusta.

Samankaltaista vesiputousesitystä on mahdollista käyttää myös saman moottoriyksilön mittaustulosten vertailuun esimerkiksi eri kierrosnopeuksilla, kuten aiemmin esitettyssä kuvassa 16. Tällöin moottorin kierrosnopeuden vaikutus värähtelyyn on havaittavissa. Jollain kierrosnopeudella saattaa aiheutua voimakkaita resonansseja kertalukualueilla, joilla ei muilla kierrosnopeuksilla ole voimakasta värähtelyä. Tästä saadaan arvokasta tietoa siitä, mitä kierrosnopeusalueita on syytä mahdollisuuksien mukaan välttää ja ottaa tämä huomioon moottorin suunnittelussa.

Vesiputousesityksen käyttäminen soveltuu myös kunnonvalvontalaitteen muodostamien toleranssirajojen kehittymisen seurantaan. On mahdollista asettaa esimerkiksi ylätoleranssirajat aikajärjestyksessä vierekkäin, jolloin nähdään, miten nopeasti toleranssiraja kehittyy paikalleen vai muuttuuko se voimakkaasti jatkuvasti. Tämänlaisella esitystavalla saadaan todennäköisesti parempi käsitys kunnonvalvontalaitteen toiminnasta, jolloin voidaan paremmin arvioida sen valvontatavan pätevyyttä ja luotettavuutta.

5.3.2 Tilastolliset tunnusluvut

Mittausdatan luonteesta saadaan parempi käsitys laskemalla siitä tilastollisia tunnuslukuja. Tunnuslukujen avulla pelkästään voi olla vaikea tehdä päätelmiä mittausdatan luonteesta, mutta esimerkiksi eri mittaustilanteiden datan vertaaminen tunnuslukujen avulla on tehokasta tehdä arvio tilanteiden eroista. Visuaalisia esityksiä käyttämällä voi olla helpompi ja nopeampi havaita selkeitä eroja datassa, mutta tunnuslukujen avulla saadaan aikaseksi visuaalista esitystä tarkempi analyysi. Jotkin oleelliset eroavaisuudet voivat helposti jäädä havaitsematta pelkkää visuaalista esitystä käyttämällä.

Variaatiokerroimen avulla saadaan käsitys mittausdatan hajonnan suuruudesta suhteessa mittausarvoihin. Variaatiokerroin lasketaan keskihajonta jaettuna keskiarvolla. Variaatiokerroin ilmoittaa mittaustulosten jakauman leveyden suhteessa mittausarvoihin ottamatta kantaa suoraan mittausarvon suuruuteen. Mitä pienempi on variaatiokerroimen arvo, sitä pienempi on hajonta suhteessa mittausarvojen keskiarvoon. Pienempi variaatiokerroimen arvo kertoo mittausdatan olevan vähemmän suuruudeltaan vaihtelevaa.

Muita värähtelymittaustulosten yhteydessä käyttökelpoisia tilastollisia tunnuslukuja ovat keskiarvo, mediaani, keskihajonta, maksimi ja minimi. Keskiarvon ja mediaanin poikkeudessa huomattavasti toisistaan on mittausdatan hajonta epätasaista eli toisen ääripään arvot saattavat olla huomattavasti kauempana keskiarvosta, kuin toisen ääripään arvot. Keskihajonta kertoo mittausarvojen keskimääräisen poikkeaman keskiarvosta eli mitä pienempi on keskihajonnan arvo sen parempi. Maksimi- ja minimiarvot kertovat välin, jolla mittaustulosten arvot vaihtelevat. Mitä lähempänä maksimi ja minimi arvot ovat toisiaan, sitä keskittyneempiä mittaustulosten arvot ovat. Yleisesti ottaen tilanne on aina sitä parempi, mitä keskittyneempiä mittaustulokset ovat.

Tilastollisten tunnuslukujen käyttämisestä ovat esimerkkeinä taulukoiden 1 ja 2 kiihtyvyyssanturin kiinnityksen vaihtamisen vaikutus mittaustuloksiin. Kiinnityksen vaihtamisen vaikutusta tutkittaessa käytetään saman kuusisylinterisen moottorityypin mittaustuloksia

vanhalla ja uudella kiihtyvyyssanturin kiinnityksellä. Kuormitustasona on täyden tehon alue kierronopeudella 2100 rpm ja kiihtyvyyssanturin mittauskanava sivuttaissuuntaan.

Taulukko 1. *Alkuperäinen anturin kiinnitin.*

Kertaluku	Order0_5	Order1	Order1_5	Order2	Order2_5	Order3	Order3_5	Order4	Order4_5	Order5	Order5_5	Order6
Keskiarvo	0.19	0.99	0.32	0.51	0.20	0.62	0.19	0.23	0.33	0.46	0.22	0.21
Mediaani	0.14	0.52	0.19	0.26	0.16	0.56	0.12	0.16	0.34	0.41	0.17	0.18
Keskihajonta	0.15	0.84	0.20	0.40	0.15	0.24	0.12	0.16	0.10	0.17	0.10	0.11
Variaatiokerroin	0.83	0.85	0.63	0.77	0.77	0.39	0.66	0.70	0.30	0.38	0.46	0.52
Maksimi	0.81	3.41	1.51	2.21	0.93	1.91	0.69	0.99	0.88	1.36	0.67	0.79
Minimi	0.00	0.08	0.05	0.08	0.02	0.11	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05

Kiinnittimen sijainti muuttui hieman vaihdon yhteydessä eli on odotettavaa, että värähtely on voimakkuudeltaan hieman erilaista. Mittauspiste säilyi kuitenkin lähellä alkuperäistä paikkaa, joten näiden kahden paikan välisten tulosten vertailu on mielekästä. Suoraan amplitudiarvojen suuruutta ei siis kannata vertailla, mutta etenkin hajonnan muuttumisen arvioiminen on oleellista.

Taulukko 2. *Uudistettu anturin kiinnitin.*

Kertaluku	Order0_5	Order1	Order1_5	Order2	Order2_5	Order3	Order3_5	Order4	Order4_5	Order5	Order5_5	Order6
Keskiarvo	0.02	0.19	0.10	0.10	0.05	0.75	0.11	0.16	0.29	0.41	0.15	0.14
Mediaani	0.02	0.20	0.10	0.10	0.05	0.73	0.11	0.15	0.31	0.42	0.15	0.14
Keskihajonta	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.11	0.02	0.05	0.04	0.08	0.04	0.04
Variaatiokerroin	0.45	0.23	0.17	0.23	0.39	0.15	0.20	0.29	0.14	0.19	0.24	0.25
Maksimi	0.03	0.28	0.14	0.14	0.10	0.99	0.17	0.25	0.39	0.57	0.24	0.21
Minimi	0.01	0.11	0.06	0.04	0.01	0.58	0.07	0.08	0.19	0.26	0.04	0.08

Taulukoiden 1 ja 2 mittaustuloksista lasketut arvot ovat variaatiokerrointa lukuun ottamatta putoamiskiihtyvyyden yksikössä (g) ja tarkastelussa on otettu huomioon vain spektrin alkupään kertaluvut puolikkaan kertaluvun välein. Yleisesti, lähes kaikki arvot ovat suuremmat alkuperäisellä kiihtyvyyssanturin kiinnittimellä. Tämä tarkoittaa, että mittaustulosten laatu on selkeästi parantunut kiinnittimen uudistamisen jälkeen. Esimerkiksi variaatiokertoimen arvot ovat pienemmät uudistamisen jälkeen eli mittaustulosten muodostama jakauma suhteessa mittausarvon suuruuteen on kapeampi. Tällöin kiinnittimestä aiheutuva vaihtelu on selvästi pienempää. Alkuperäisellä kiihtyvyyssanturin kiinnittimellä maksimi ja minimi arvot ovat kauempana toisistaan, kuin uudistetulla kiinnittimellä eli tämäkin kertoo mittaustulosten arvojen olevan uudistetussa tapauksessa keskittyneempiä tarkasteltavilla kertaluvuilla.

Variaatiokertoimen arvot ovat etenkin alkuperäisellä anturin kiinnittimellä varsin suuret, jolloin myöhemmin esiteltävään tilastolliseen normaalijakaumaan liittyen mittausarvojen jakaumasta muodostuisi melko leveä. Taulukon 1 variaatiokertoimen arvojen mukaisesti esimerkiksi kertaluvun 1 mittausarvojen kuuden keskihajonnan mukaisen jakauman leveydeksi tulisi yli viisinkertainen suhteessa mittausarvon keskiarvon suuruuteen. Tässä

tapauksessa mittausrvojen suuruuden vaihtelu on merkittävän suurta. Uudistetulla anturin kiinnittimellä päästään täten myös kapeampaan jakaumaan variaatiokertoimien ollessa yleisesti pienempiä. Taulukon 2 mukaisilla arvoilla jäädään suurimmankin hajonnan tapauksessa alle kolmen mittausrvon keskiarvon levyiseen jakaumaan. Kiihtyvyyssanturin kiinnityksen muuttaminen siis kavensi jakauman leveyttä selkeästi ja voidaan tämänkin perusteella uuden kiinnityksen olevan toistettavuudeltaan parempi.

Kiihtyvyyssanturin kiinnitystapaa uudistettaessa jälleen voidaan käyttää samaa vertailutapaa myös silloin. Aiemman esimerkin mukaisten taulukoiden tilastollisista arvoista nähdään nopeasti, onko kiinnityksen uudistaminen onnistunut. Esimerkiksi hajonnan pienentyessä edelleen voidaan uudistetun kiinnityksen todeta olevan aiempaa parempi ja silloin uudistetulla kiinnittimellä on syytä jatkaa mittaamista. Toisaalta kiinnittimen uudistamisessa on myös muita huomioitavia asioita, kuten kiinnittämisen nopeus ja toimivuus. Parannuksia tehdessä on siis huomioitava myös saavutetun lisätarkkuuden suhdetta käytännön mittaamisen sujuvuuteen.

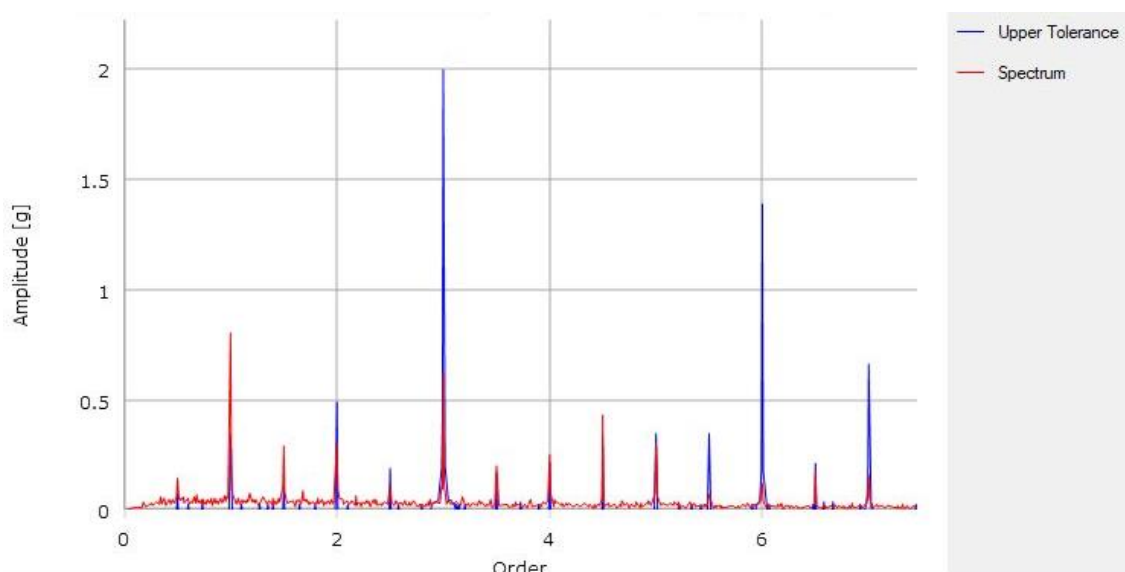
5.4 Poikkeavien moottoriyksilöiden tunnistaminen

Poikkeavien mittaustulosten eli todennäköisesti viallisten moottoriyksilöiden löytäminen joukosta on oleellisin asia koekäytön aikaisessa kunnonvalvonnassa. Tässä luvussa 5.4 esitellään kunnonvalvontalaitteen käyttämää tapaa viallisten yksilöiden havaitsemiseksi ja sen lisäksi muita kehitettäviä ja käyttökelpoisia työkaluja poikkeamien ja niiden syiden havaitsemiseksi.

5.4.1 Toleranssirajat ja laatuindeksit

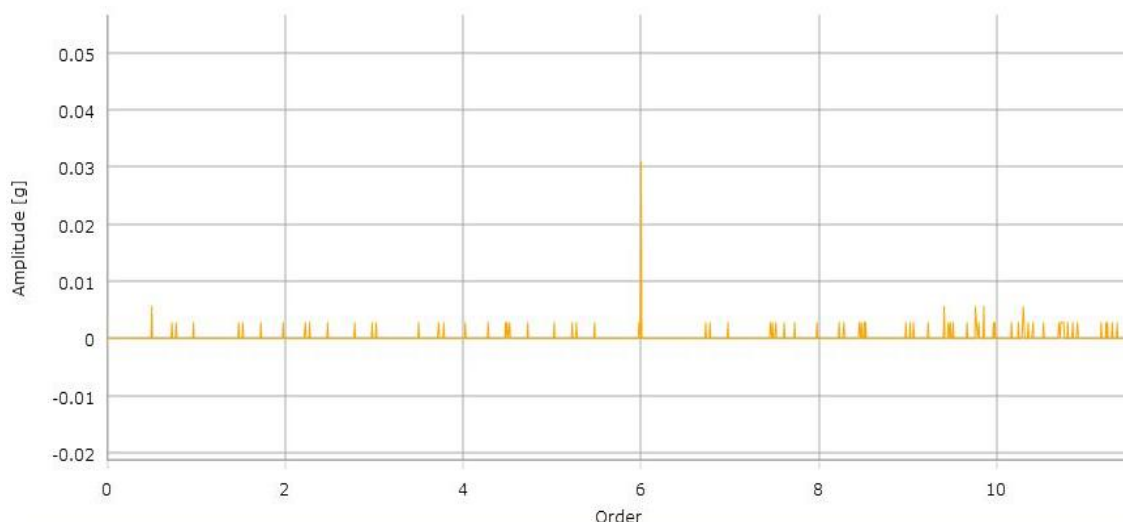
Kunnonvalvontalaite muodostaa tilastolliseen hajontaan perustuvia ylä- ja alatoleranssirajoja mitatuille moottorityypeille. Kaikille kuormitustasoille ja mittauskanaville muodostuvat omat toleranssirajat kertalukuesitykseen. Toleranssiarvot lasketaan jokaiselle pisteelle resoluution mukaisesti eli jokaiselle mittausrvolle muodostuu oma ylä- ja alatoleranssiarvo. Laitteen valvontaperusteena on lähtökohtaisesti aina koko mitattava spektri yksittäisten taajuuksien sijaan. Toleranssirajojen määrittelyssä laite käyttää viimeisimpiä sadan moottorin mittaustuloksia ja rajat muuttuvat jatkuvasti mittausten edetessä. Muuttuvien toleranssien lisäksi laitteeseen on mahdollista määrittää absoluuttinen toleranssi, joka varmistaa, etteivät moottoreiden yleiset värähtelytasot pääse liikaa muuttumaan ajan kuluessa. Tällä havaitaan muun muassa tuotannossa tapahtuvat pidempiaikaiset laatumuutokset, jotka yleisesti vaikuttavat moottorin värähtelyominaisuuksiin. Kuvassa

24 on esimerkki Reilhoferin kunnonvalvontalaitteen muodostamasta toleranssirajasta ja mittaustuloksesta kertalukuesityksessä.



Kuva 24. Kunnonvalvontalaitteen muodostama toleranssiraja sinisenä viivana ja mittaustulos punaisena viivana.

Muuttuvien toleranssirajojen muodostumisen jälkeen jokaiselle mittaukselle lasketaan laatuindeksejä kertalukuesityksen spektriin ja sen toleranssirajoihin perustuen. Toleranssiylityksistä muodostuu seuraavan kuvan 25 mukainen poikkeamakuvaaja eli kuvaajan arvo 0 tarkoittaa, että toleranssiarvoja ei ole ylitetty. Poikkeamat nollassa puolestaan kertovat toleranssirajan ylityksestä. Positiiviset arvot ovat ylätoleranssirajan ylityksiä ja negatiiviset arvot alatoleranssirajan ylityksiä. Mikäli poikkeamakuvaaja näkyisi täysin suorana viivana nollassa, niin kumpaakaan toleranssirajaa ei silloin ole ylitetty millään kertaluvulla. Tällainen poikkeamakuvaaja on kuitenkin harvinainen etenkin kunnonvalvontalaitteen käyttämisen alkuvaiheessa, kun rajat vielä kehittyvät jatkuvasti. Hyvin tasalaa-tuisen tuotannon ja hyvän mittaustapahtuman ansiosta poikkeamakuvaaja voidaan saada hyvin tasaisesti pysymään nollassa koko spektrissä.



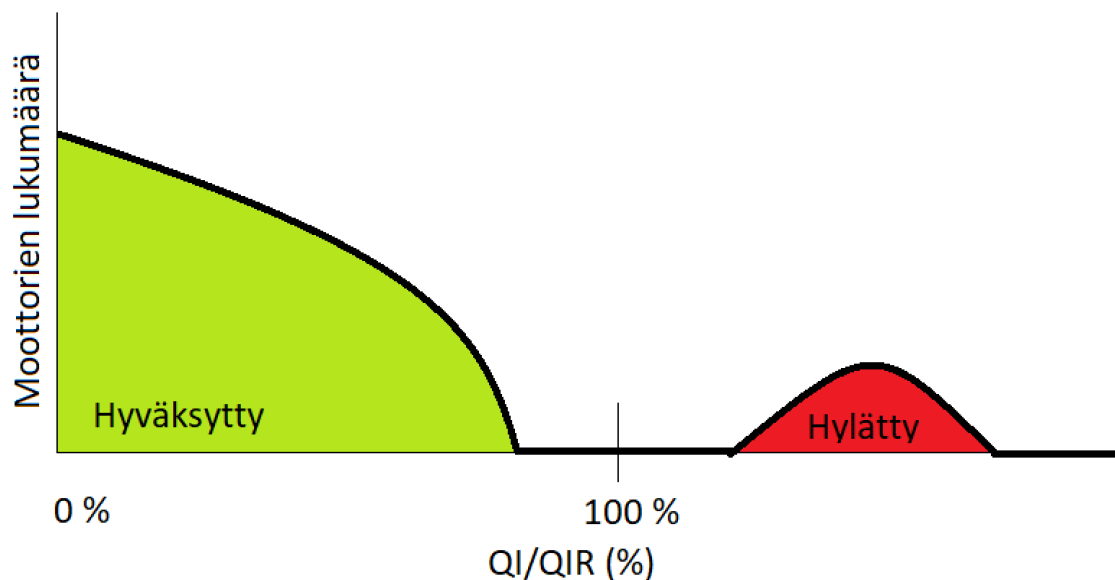
Kuva 25. Mittaustuloksen poikkeamakuvaaja toleranssirajoihin nähden.

Laatuindeksejä on kahdenlaisia, suoraan toleranssien ylityksiin perustuvia (QI, Quality Index) ja toleranssin arvoon suhteutettuja ylityksiä (QIR, Quality Index Relative). Laatuindeksien laskenta perustuu poikkeamakuvaajan absoluuttisten arvojen summaan ja seuraava taulukko 3 havainnollistaa näiden indeksien laskentaa.

Taulukko 3. *Laatuindeksien laskentaesimerkki.*

Kertaluku	Mittaustulos	Toleranssiraja	Ylitys (QI)	Ylitys/Toleranssiraja (QIR)
5	6	5	1	0.20
12	8	6	2	0.33
24	4	3	1	0.33
65	10	7	3	0.43
103	15	12	3	0.25
	Summa		10	1.55
	Indeksien raja-arvot		200	120
	QI ja QIR		5%	1%

Indeksien laskentaa varten on määritettävä raja-arvot, joihin ylityksiä verrataan. Oletuksena on, että suuri osa moottoreista on värähtelyltään samankaltaisia siten, että joukosta on havaittavissa vikatilanteista johtuvia poikkeavia yksilöitä. Tällöin laatuindeksien raja-arvot on määritettävä niin, että 100% asettuu kuvan 26 mukaisesti hyväksytyjen ja hylättyjen moottorien joukon välille.

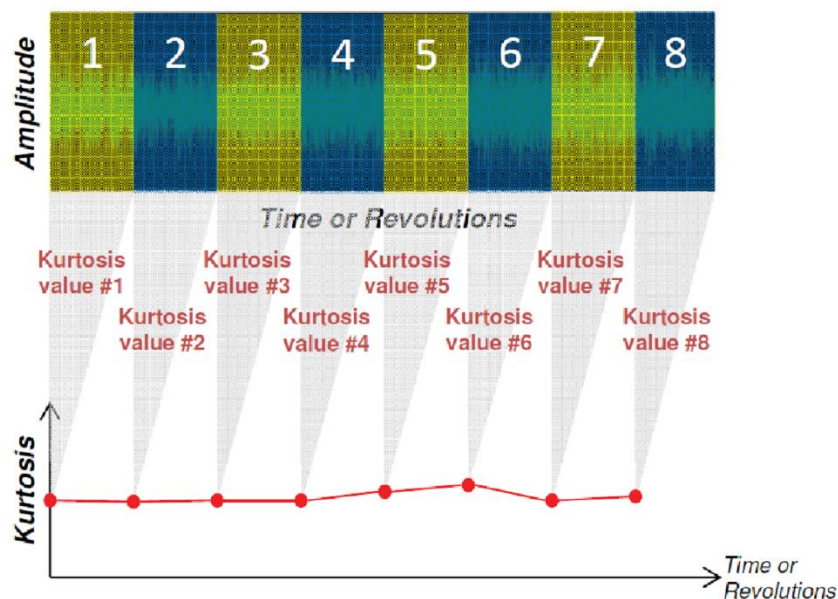


Kuva 26. Laatuindekseihin perustuva tilastollinen analyysi.

Indeksien raja-arvot (100%) ovat määritetty sopiviksi, kun asetusta tehdessä laatuindeksien arvot ovat pääasiassa välillä 10-50%. Kummallekin indeksille on omat raja-arvonsa, jolloin molemmat arvot on asetettava erikseen. Raja-arvojen ollessa sopivat, on laitteen mahdollista havaita tilastollisesti joukosta poikkeava mittaustulos ja ilmoittaa tällöin mitauksessa oleva yksilö vialliseksi. Yksilö tulkitaan vialliseksi, kun jompikumpi laatuindekseistä on suurempaa kuin 100%. Viallisen tuloksen yhteydessä on vian aiheuttajaa lähdettävä etsimään esimerkiksi luvussa 4.4 esitetyn kertalukulaskimen tulosten ja niiden integraation avulla.

5.4.2 Kurtoosi

Kurtoosi eli kurtosis on tilastollinen työkalu, joka kuvaa sarjan muodostaman jakauman jyrkkyyttä tai tasaisuutta. Aikatason signaalin seurannassa voimakkaat poikkeavuudet vaikuttavat kurtoosi arvon suuruuteen. Aikatason signaali jaetaan halutun pituisiin jaksoihin ja jokaisesta jaksosta lasketaan kurtoosi arvo, kuten kuvan 27 esimerkissä.

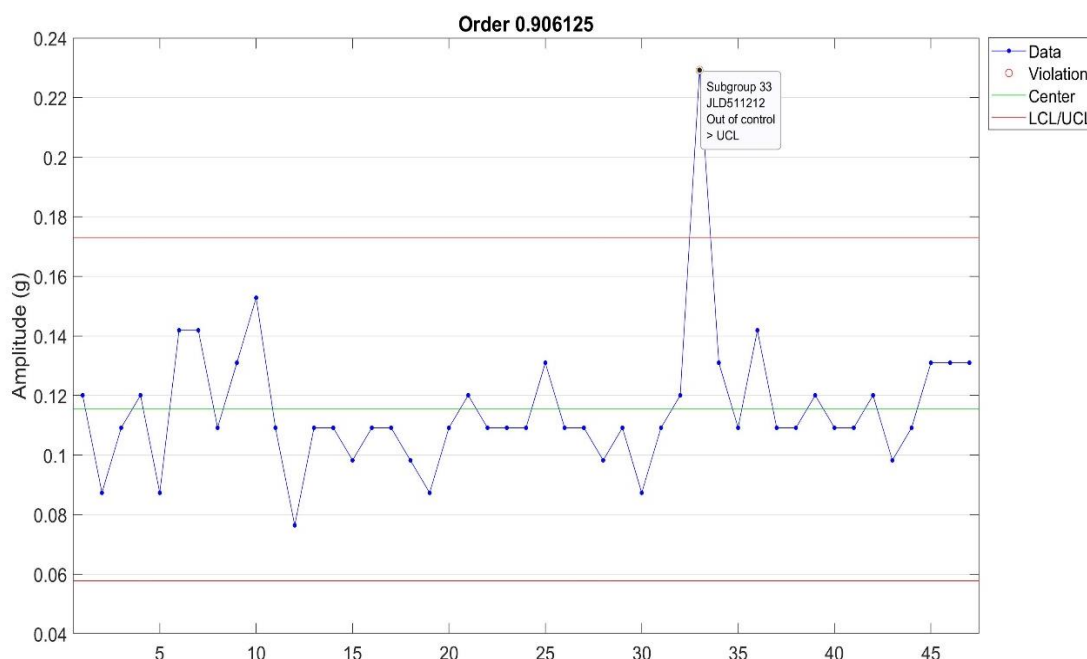


Kuva 27. Kurtoosi arvojen muodostuminen aikatazon signaalista. (Reilhofer 2016)

Kurtoosi arvoja tulee siis sitä enemmän, mitä useampaan jaksoon aikatazon signaali jaetaan. Lisäksi, jos halutaan tarkemmin tarkastella signaalin poikkeavuuksia, on mahdollista jakaa signaali osittain päällekkäisiin jaksoihin. Tällöin varmistutaan siitä, etteivät poikkeamat signaalissa jäisi havaitsematta. Aikatazon signaalin sarjat noudattavat tyypillisesti normaalijakaumaa, jolloin kurtoosi arvo on kolme. Toisin sanoen, kurtoosi arvon ollessa voimakkaasti suurempi kuin kolme, on aikatazon signaalissa siinä kohdassa poikkeavuutta normaaliin hajontaan nähden. Voimakkaan värähtelyn iskun aiheuttama poikkeavuus on täten havaittavissa kurtoosi arvoa seuraamalla. Reilhofer kunnonvalvontalaitteessa on määritettävissä valvontaraja kurtoosi arvolle eli värähtelymittaustuloksen kurtoosi arvon ylittäessä valvontarajan, tulkitaan moottori vialliseksi. (Reilhofer 2016)

5.4.3 Kontrollikaavio

Kontrollikaavion avulla on mahdollista seurata yksittäisten kertalukujen amplitudien suuruuksia eri moottoriyksilöillä. Jos esimerkiksi tiedetään, että jokin toiminnallinen komponentti on usein ollut käytännössä ongelmallinen, niin voidaan sen pyörimisnopeuden perusteella laskea sille kertaluku, jota erityisesti seurataan kontrollikaavion avulla. Kontrollikaavion avulla seurattavia erityisesti kiinnostavia kertalukuja on mahdollista määrittää aiemmassa luvussa esitettyä kertalukulaskinta käyttämällä. Seuraavassa kuvassa 28 on esimerkki kontrollikaavion käyttämisessä kertaluvun amplitudien seurantaan. Kontrollikaavion kertaluku 0,906125 on laskettu olevan moottorin liitännäisen paineilmakompressorin pyörimistaajuuden kertaluku.



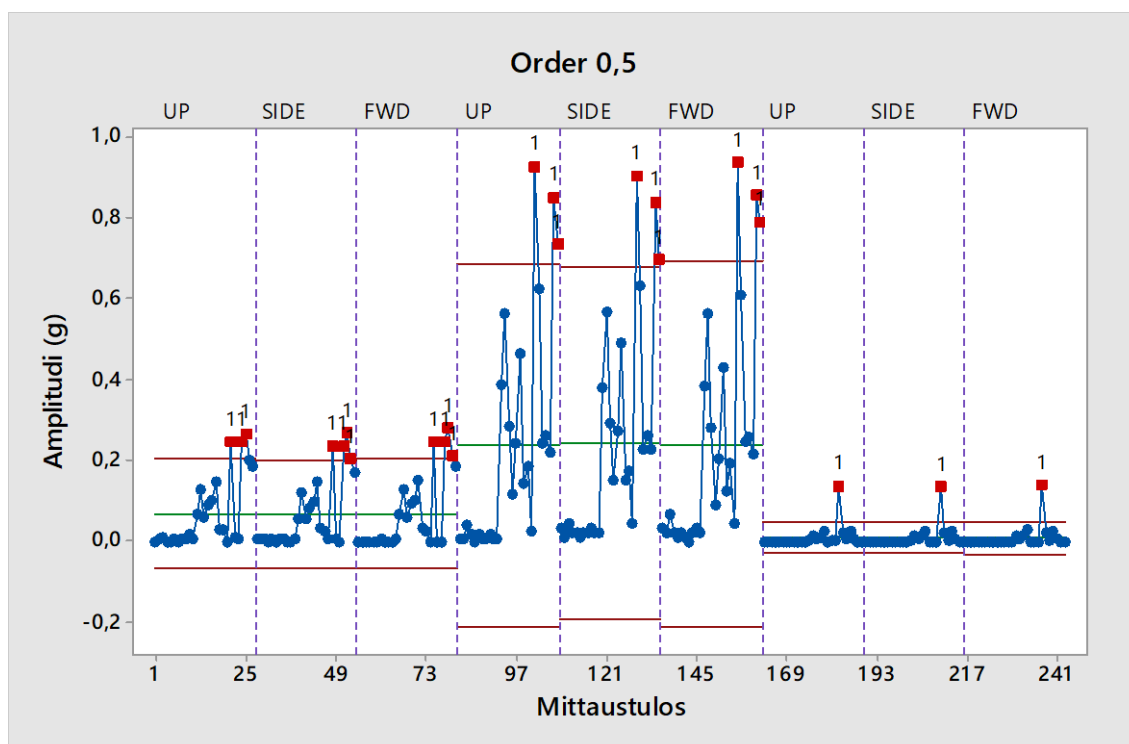
Kuva 28. Kontrollikaavio moottorin paineilmakompressorin pyörimistaajuuden kertaluvulta.

Esimerkin mukaisessa kontrollikaaviossa ylä- ja alarajat ovat laskettu kaaviossa mukana olevien amplitudiarvojen keskihajonnan mukaan siten, että molemmat ovat kolmen keskihajonnan päässä joukon keskiarvosta. Normaalijakaumaa noudattavan joukon arvoista noin 99 % on kolmen keskihajonnan etäisyydellä keskiarvosta. Tyypillisesti kontrollikaavioiden käyttämisen sääntönä käytetään, että mikäli jokin amplitudiarvoista ylittää ylä- tai alarajan, niin mittaustulos tulkitaan hylätyksi ja joukkoon kuulumattomaksi. Kontrollikaavioihin on mahdollista yhdistää muita tuloksia seuraavia sääntöjä, kuten arvojen poikkeavien nousevien tai laskevien jatkuvien trendien seuraamiseksi. Värähtelyn amplitudiarvojen seurannassa kolmen keskihajonnan päässä keskiarvosta olevat rajat eivät välttämättä ole sopivat. Värähtelymittauksista ajan kuluessa kertyvän kokemuksen mukaan rajoja voi säätää sopivimmiksi ja paremmin poikkeavuuksia erottelevimmiksi.

Paineilmakompressorin pyörimistaajuuden kertaluvun kontrollikaavion tapauksessa havaitaan yksi selkeästi joukosta poikkeava amplitudiarvo, joka ylittää normaalin ylärajan. Poikkeavaan arvoon liitetyn moottorin sarjanumeron perusteella saadaan selville moottoriyksilö, josta poikkeava mittaustulos on. Edelleen, kun seurataan yksittäistä kertalukua eli esimerkin tapauksessa paineilmakompressorin vahvasti liittyvää kertalukua 0,906125, voidaan todeta yhden moottoriyksilön paineilmakompressorin olevan todennäköisesti viallinen.

Perinteisestä yhtä muuttujaa seuraavasta kontrollikaaviosta on myös mahdollista käyttää moniulotteisempaa tarkastelutapaa. Seuraavissa kuvissa 29,30 ja 31 on esimerkkejä usean eri mittauskanavan ja eri kuormitusilanteiden mittaustulosten seuraamisesta kontrollikaaviolla. Kaikissa kontrollikaavioissa on omat hyväksyntäraajat kullekin mittauskanavalle ja kuormitustasolle. Vasemmalta oikealle edetessä ensimmäiset kolme lokeroa ovat täyden väännön (Full3) kuormitustason mittauskanavien tulokset, seuraavat kolme lokeroa moottorin täyden tehon (Full1) kuormitustason mittauskanavien tulokset ja viimeiset kolme lokeroa ovat käymättömän moottorin (Crank) mittauskanavien tulokset. Kontrollikaavioiden tuloksista on suodatettu pois selkeästi mittausrvirheellisiä tuloksia, jotka lisääisivät virhettä mittaustuloksien tarkasteluun.

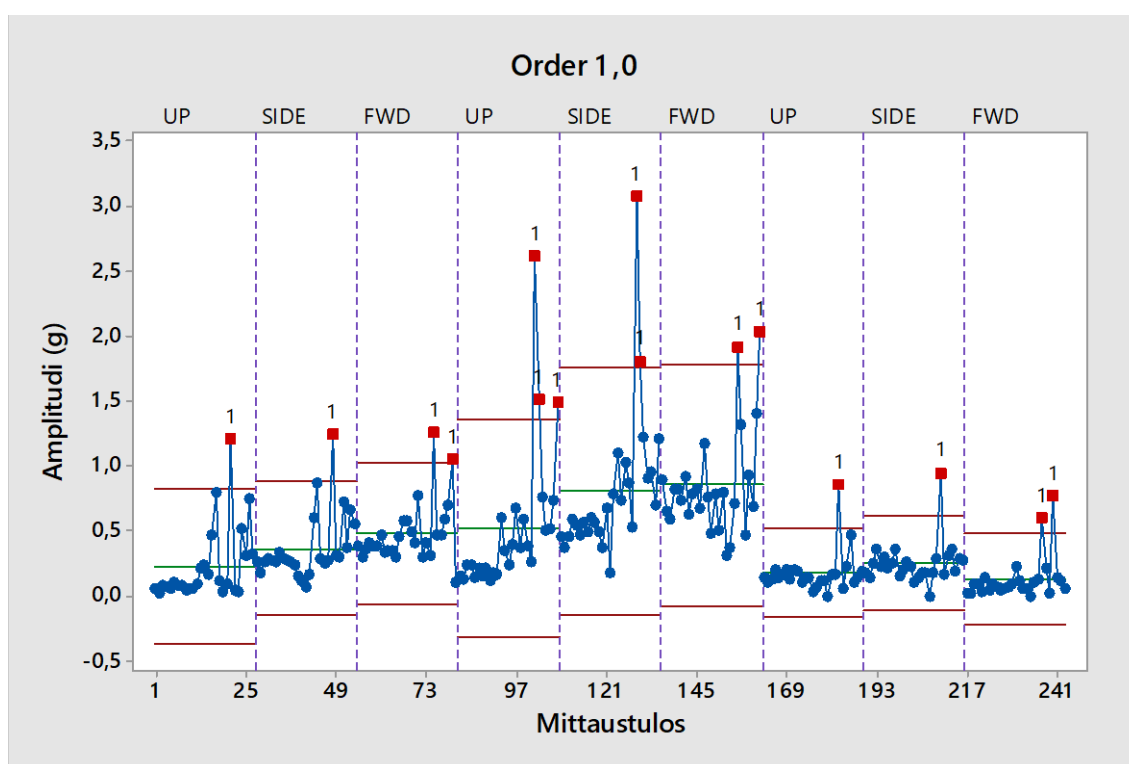
Jokaisella seuraavien kontrollikaavioiden mittauskanavalla mittaustulokset on järjestetty siten, että alkuosassa on kuusisynterisen moottorityypin normaaleja mittauksia ja loppuosassa erilaisten keinotekoisien vikatilanteiden mittaustuloksia. Keinotekoisia vikatilanteita esitellään tarkemmin tässä työssä myöhemmissä luvuissa. Tässä käydään läpi, miten yleisesti ottaen erilaisten keinotekoisien vikatilanteiden tulokset erottuvat mittaustulosten tilastossa.



Kuva 29. Kertaluvun 0,5 yhdistetty kontrollikaavio.

0,5 kertaluvun kontrollikaaviossa on havaittavissa selkeää hajonnan kasvua keinotekoisien vikatilanteiden mittaustulosten yhteydessä. 0,5 kertaluvun amplitudiarvojen on ole-

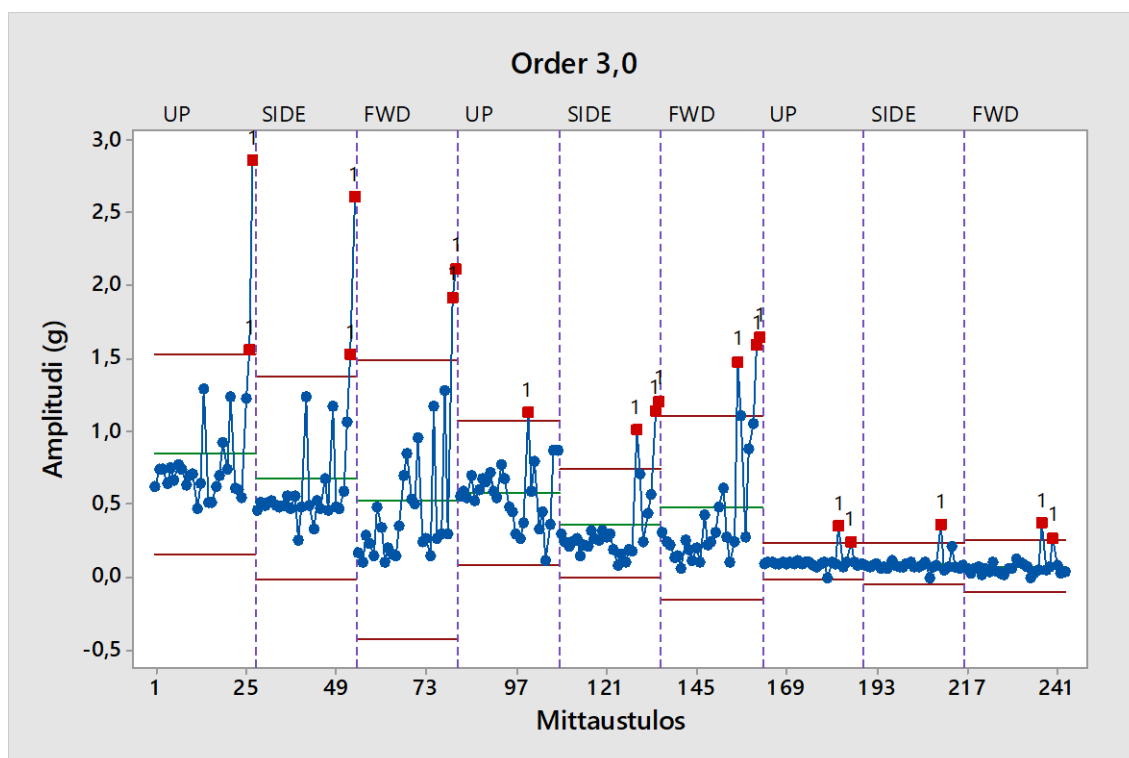
tettavaa liittyä vahvasti palotapahtumiin ja niihin liittyviin vikatilanteisiin. Osa vikatilanteiden mittaustuloksista ylittää kolmen keskihajonnan päässä keskiarvosta olevan ylärajan. Pääasiassa ylärajan ylityksiä esiintyy täyden väännön ja täyden tehon kuormitusilanteen mittauksissa. Käymättömän moottorin mittauksissa puolestaan ylityksiä on selkeästi vähemmän ja mittaustuloksissa vaikuttaa olevan vähemmän hajontaa muihin kuormitustasoihin verrattuna. 0,5 kertaluvun kontrollikaavion perusteella voi täten päätellä, että useimmat vikatilanteet olisivat parhaiten havaittavissa täyden väännön ja täyden tehon kuormitusalueiden mittaustuloksista. Käymättömässä moottorissa ei esiinny palotapahtumia, joten 0,5 kertaluvun kontrollikaaviossa näistä mittauksista ole paljoakaan pääteltävissä vikatilanteista.



Kuva 30. Kertaluvun 1,0 yhdistetty kontrollikaavio.

Kertaluvun 1,0 kontrollikaaviossa on havaittavissa yleisesti amplitudiarvojen suurempaa hajontaa verrattuna kertaluvun 0,5 kontrollikaavioon. Tämän vuoksi kolmen keskihajonnan päässä keskiarvosta olevat hyväksyntärajat ovat myös kauempana, kuin 0,5 kertaluvun tapauksessa. Edelleen ainakin osa vikatilanteiden mittauksista erottuu selkeästi sarakkeiden alkupään normaaleista mittauksista. Ensimmäisen kertaluvun kontrollikaaviossa näkyy moottorin värähtelyn teorian mukaisesti erityisesti kampiakselin pyörimisestä aiheutuva värähtely. Muihin verrattuna suuret amplitudiarvot kertovat tässä todennäköisesti kampiakselin pyörimiseen vaikuttavista vikatilanteista. Erilaisten vaikuttavien

värähtelyn herätteiden takia on siis odotettavaa, että kontrollikaaviot ovat erilaisia eri kertaluvuilla.



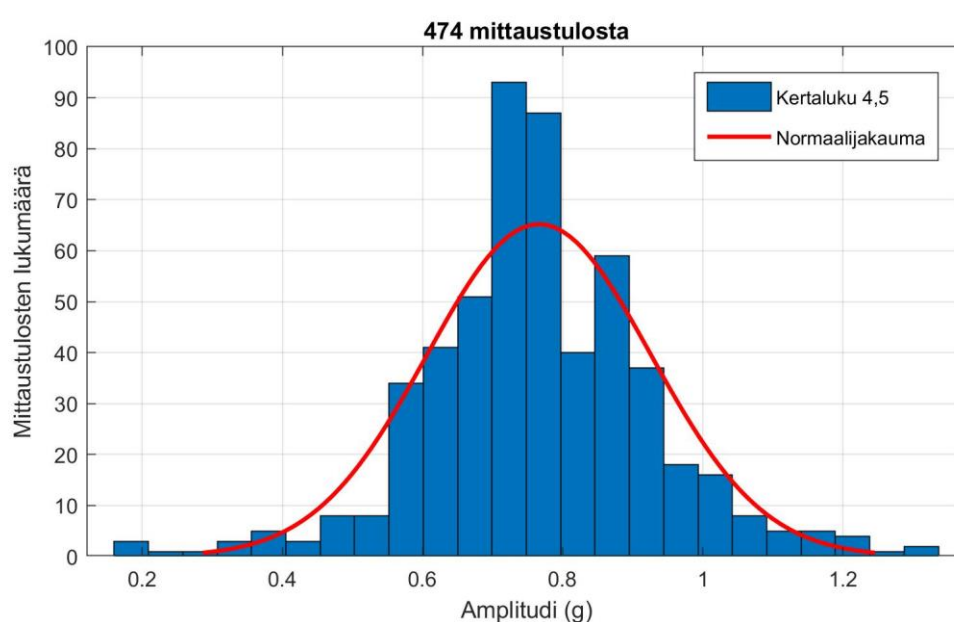
Kuva 31. Kertaluvun 3,0 yhdistetty kontrollikaavio.

Kertaluvun 3,0 kontrollikaaviossa näkyy sama ilmiö, kuin aiemmissakin kontrollikaavioissa eli sarakkeiden loppupään amplitudiarvoissa on kasvanutta hajontaa. Osa mittaus tulosten amplitudiarvoista ovat sarakkeiden loppupuolella selkeästi jälleen suurentuneet eli voidaan päätellä osan vikatilanteista voimistaneen värähtelyä kertaluvulla 3,0. Kertaluku kolme on kuusisylinterisen moottorin tapauksessa sylinterien palotaajuuden kertaluku. Kertaluvun kolme kontrollikaaviosta on täten teorian mukaan mahdollista havaita palotapahtumiin liittyvien herätteiden eroavaisuuksia, mutta kuitenkin vikatilanteen yhdistäminen yksittäisen sylinterin palamiseen saattaa olla haastavaa. Kertaluvulla 3,0 on myös muita vaikuttavia herätteitä palotaajuuden lisäksi, joten poikkeavuuden yhdistäminen suoraan sylinterien palamiseen saattaa olla haastavaa ilman sopivia herätteiden erottelua helpottavia lisätyökaluja.

5.4.4 Tilastollisen jakauman sovittaminen

Tilastolliseen jakaumaan sovittamisessa käytetään samankaltaista periaatetta viallisten moottoriyksilöiden tunnistamiseksi kuin kontrollikaaviossakin. Mittaus tulosten yksittäis-

ten kertalukujen amplitudiarvojen tulisi ideaalisessa tapauksessa noudattaa normaalijakaumaa. Mittaustulosten histogrammiin sovitetun normaalijakaumakuvaajan avulla voidaan päätellä mittaustulosten ja normaalijakauman yhteneväisyyttä. Yhden kuusisylinterisen moottorityypin hyvin normaalijakaumaa noudattavan kertaluvun 4,5 mittaustulosten histogrammi näkyy kuvassa 32. Viattomien moottorien mittaustulosten tulisi näyttää esimerkki histogrammin mukaisilta kaikilla kertaluvuilla, mutta käytännössä erilaiset virhelähteet usein aiheuttavat mittaustulosten poikkeavuutta normaalijakaumaan nähden. Väärähtelymittausdataa kertyessä lisää voidaan tarkemmin arvioida noudattavatko kertalukujen mittausarvot yleisesti normaalijakaumaa vai jotain muuta jakaumaa paremmin.

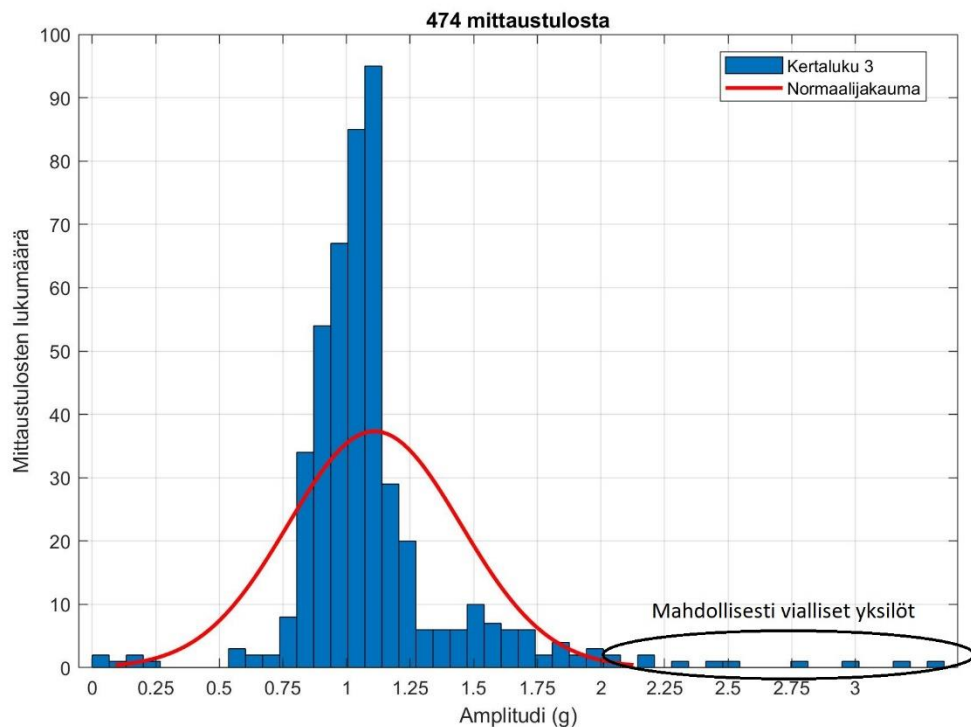


Kuva 32. Kuusisylinterisen moottorityypin kertaluvun 4,5 amplitudiarvojen histogrammi.

Kertaluvun 4,5 amplitudiarvot noudattavat esimerkkitapauksessa hyvin normaalijakaumaa, jolloin ei voida selkeästi havaita viallisten moottoriyksilöiden mittaustuloksia joukossa. Toisin sanoen, jos histogrammi näyttäisi samalta kaikilla tärkeiksi valikoiduilla kertaluvuilla, ei todennäköisesti mittaustulosten joukossa ole yhtään viallista moottoria.

Seuraavan kuvan 33 histogrammi kertaluvun 3 mittaustuloksista ei puolestaan noudata niin hyvin normaalijakaumaa, kuin kertaluvun 4,5 mittaustulokset. Lisäksi kertaluvun 3 histogrammiin sovitetun normaalijakauman kuvaajan avulla voidaan havaita osan mittaustuloksista olevan voimakkuudeltaan suurempia isoon joukkoon verrattuna. Nämä poikkeavat mittaustulokset kertovat mahdollisesti viallisista moottoriyksilöistä ja kertalukuun 3 liittyvät amplitudiarvot liittyvät kuusisylinterisen moottorin palotaajuuteen. Poik-

keavien mittaustulosten voidaan siis päätellä johtuvan palotapahtumiin liittyvistä vikatilanteista tai erilaisuuksista verrattuna suurimpaan joukkoon mittaustuloksista. Mikäli jokaiseen mittaustulokseen liitetään lisäksi moottorin yksilöintitieto, kuten sarjanumero, saadaan poikkeaviksi havaittavista mittaustuloksista suora yhteys yksittäisiin moottoreihin.



Kuva 33. Kuusisylinterisen moottorityypin kertaluvun 3 amplitudiarvojen histogrammi.

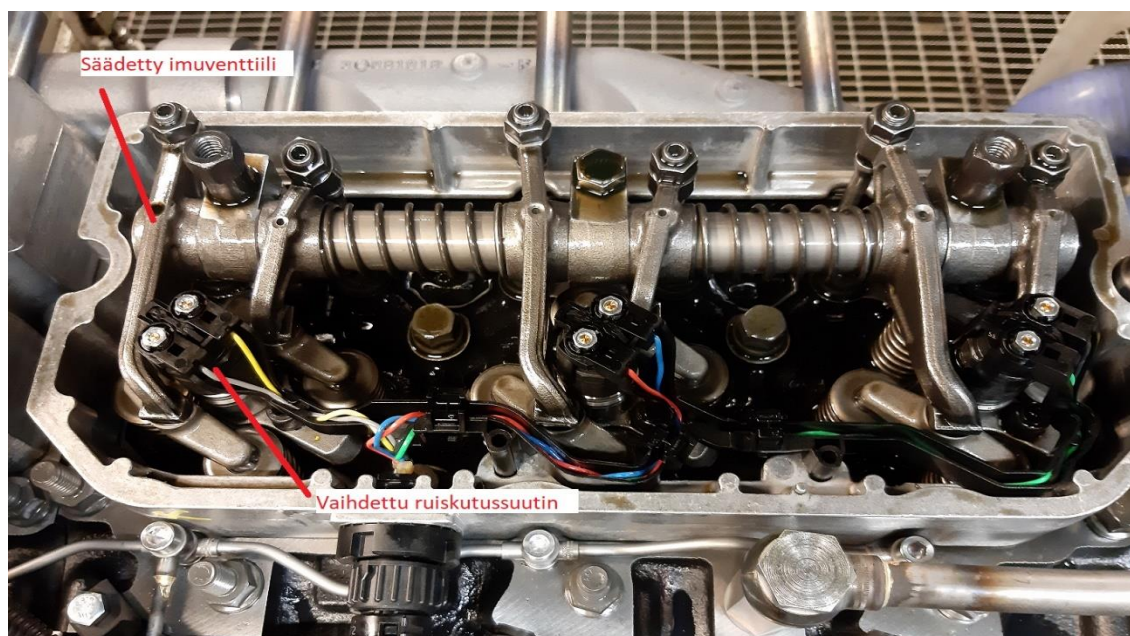
Yksittäisien kertalukujen mittaustulosten soveltuvuutta normaalijakaumaan voidaan arvioida laskemalla mittaustulosten joukosta erilaisia normaalisuusarvoja. Normaalijakauman ollessa yksi yleisesti tärkeimmistä jakaumista, on arvojoukkojen normaalisuuden arvioimiseksi kehitelty erilaisia tapoja. Värähtelymittausdataa kertyessä enemmän on hyvä arvioida normaalisuustestejä käyttäen eri kertalukujen mittauservojen normalisuutta. On siis täysin mahdollista, että jotkin kertaluvut noudattavat lähes poikkeuksetta hyvin normaalijakaumaa, kun taas jotkin kertaluvut voivat olla hyvin poikkeavia normaalijakaumaan nähden. Kun kokemuksen lisääntyessä mahdollisesti tiedetään kertalukuja, joilla mittaustulokset noudattavat hyvin normaalijakaumaa, on mahdollista erityisesti niiden tuloksia tarkastellessa käyttää esimerkiksi edellisissä kuvissa olevia histogrammityyppisiä.

5.5 CASE: Dieselmoottorin keinotekoiset vikatilanteet

Kohdeyrityksen tuotannossa koekäytettiin yhtä kuusisylinteristä moottoria keinotekoisilla vikatilanteilla. Vikatilanteina olivat virheellinen imuventtiilin välys, poikkeavan ainemäärän ruiskutussuutin, ajoituksen välihammaspyörän vika ja virheellinen öljypumpun hammaspyörän välys. Lisäksi koekäytettiin seitsemänsylinteristä moottoria viallisella kampiakselin värinävaimentimella. Kaikissa koekäyttötilanteissa moottorissa oli vain yksi vikatilanne kerrallaan ja mittaukset kunnonvalvontalaitteella tehtiin normaalin koekäyttötilanteen mukaisesti. Tässä luvussa tarkastellaan erityisesti vikatilanteiden mittaustuloksia ja analysoidaan erilaisten vikatilanteiden havaitsemista mittaustuloksista.

5.5.1 Virheellinen imuventtiilin välys

Moottoriin säädettiin kuvan 34 mukaista imuventtiilin välystä asteittain kasvattaen. Venttiilin säätämällä on täten mahdollinen vaikutus ainoastaan yhden sylinterin toimintaan eli viiden muun sylinterin toiminta pitäisi pysyä normaalina. Ensin venttiilivällykseen asetettiin 0,4 mm, minkä jälkeen 0,8 mm ja viimeiseksi 1,2 mm. Venttiilivällyksen säätämisen vaikutus on mahdollista näkyä teorian mukaisesti todennäköisimmin pienillä kertaluvuilla. Palamistapahtuman aiheuttamiin herätteisiin liittyen tutkitaan erityisesti 0,5–6 kertalukuja puolen kertaluvun välein.



Kuva 34. Säädetty imuventtiili ja vaihdettu ruiskutussuutin.

Taulukossa 4 näkyvät mittaustulokset eri tilanteista ja kunnonvalvontalaitteen muodostamat oppivat toleranssirajat 0,5 kertaluvulla. 0,5 kertaluku on valikoitu tarkasteltavaksi,

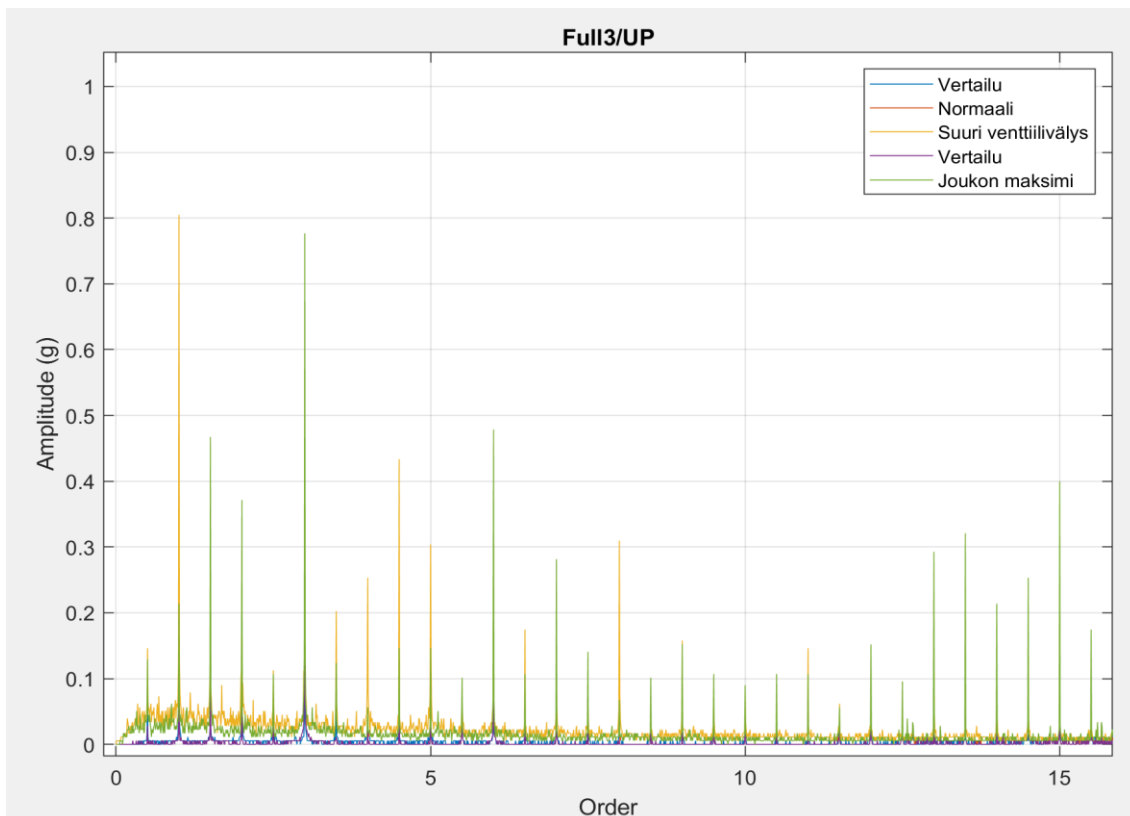
sillä kampiakselin kahden kierroksen aikana yhdessä sylinterissä tapahtuu yksi palota-
pahtuma, jolloin laskennallisesti kertaluvuksi muodostuu puoli. Mittaustulokset ovat kol-
miakselisen kiihtyvyyssanturin mukaisesti kolmesta suunnasta eteen (FWD), sivulle
(SIDE) ja ylös(UP). Crank, Full1 ja Full3 ovat erilaisia kuormitustilanteita, joista Crank
tarkoittaa käymättömän moottorin pyörittämistä, Full1 käynnissä olevan moottorin täyden
tehon alue ja Full3 täyden väännön alue. Kaikki taulukon amplitudiarvot ovat putoamis-
kiihtyvyyden yksikössä.

Taulukko 4. *Kertaluvun 0,5 amplitudiarvot erilaisilla imuventtiiliväläyksillä.*

	CrankFWD	CrankSIDE	CrankUP	Full1FWD	Full1SIDE	Full1UP	Full3FWD	Full3SIDE	Full3UP
Toleranssi	0.000	0.000	0.000	0.294	0.229	0.118	0.076	0.090	0.079
Normaali	0.000	0.003	0.003	0.565	0.568	0.566	0.127	0.123	0.129
0.4 mm imuventtiilivälälys	0.008	0.008	0.006	0.090	0.153	0.118	0.093	0.082	0.090
0.8 mm imuventtiilivälälys	0.014	0.014	0.011	0.204	0.273	0.245	0.102	0.098	0.101
1.2 mm imuventtiilivälälys	0.028	0.027	0.025	0.430	0.491	0.464	0.153	0.147	0.146

Kaikissa kuormitustilanteissa ja kaikilla mittaussuunnilla imuventtiilin väläyksen kasvatta-
minen suurentaa amplitudiarvoa. Laitteen muodostama toleranssiraja ylittyy 1,2 mm
venttiiliväläyksellä jokaisessa kuormitustilanteessa ja jo 0,8 mm väläyksellä lähes kaikissa
tilanteissa. Normaalisissa tilanteissa moottorin mittaustulokset ovat verrattain korkeita
muihin tilanteisiin ja toleranssiin nähden Full1 ja Full3 kuormitustilanteissa. Tämä saattaa
viitata normaaliksi oletetun moottorin sisältävän jonkin vian tai mittausanturin uudelleen-
kiinnittämisen seurauksena on tullut mittausrvirhe. Taulukon kolme alimmaista mittausta
on kuitenkin tehty ilman anturin uudelleenkiinnittämistä, joten tulokset ovat hyvin vertai-
lukelpoisia. Kolme alimmaista riviä amplitudiarvoista kasvavatkin loogisesti aina vian va-
kavuuden lisääntyessä.

Seuraavassa kuvassa 35 ovat suurimman venttiiliväläyksen mittaustuloksen spektri ver-
rattuna normaaleihin mittauksiin ja moottorityypin normaalien mittausten joukon maksimi-
tuloksiin kullakin kertaluvulla. Mittaustulokset ovat täyden väännön kuormitustilan-
teesta ja pystysuuntaiselta mittauskanavalta.



Kuva 35. *Suuren imuventtiilivälitysmittauksen spektri verrattuna normaaleihin.*

Suuri venttiilivälitys aiheuttaa vertailussa usein selvästi korkeimpia amplitudeja pienillä kertaluvuilla. Esimerkiksi kuvan toinen korkea amplitudi, joka on ensimmäisellä kertaluvulla, on selkeästi saanut moninkertaisen arvon suurella venttiilivälityksellä verrattuna muun joukon maksimiin. On siis hyvin mahdollista, että imuventtiin virheellinen välys on havaittavissa maksimiväännön kuormituksella ensimmäisellä kertaluvulla.

Taulukon 4 mukainen esitys ei kuitenkaan muilla kertaluvuilla ole yhtä looginen, kuin 0,5 kertaluvun tapauksessa. Venttiilivälystä kasvatettaessa amplitudin arvot eivät siis välttämättä kasva järjestelmällisesti muilla kertaluvuilla. 0,5 kertaluku on täten tämän kokeen perusteella mielenkiintoisin virheellisten venttiilivälitysten havaitsemiseen liittyen.

5.5.2 Poikkeavan ainemäärän ruiskutussuutin

Vikatilanteiden testauksessa olleeseen moottoriin vaihdettiin kuvan 34 mukainen ruiskutussuutin ensin pienennetyllä esiruiskutuksen polttoainemäärällä ja sen jälkeen kasvatetulla esiruiskutuksen polttoainemäärällä. Muutokset kohdistuivat tässäkin tapauksessa samaan sylinteriin kuin venttiilivälitysten säätämisessä eli yhden sylinterin toiminnassa oli poikkeavuutta normaaliin verrattuna.

Taulukossa 5 on esitettyä maksimiväännön kuormitustilanteessa pienen kertalukujen amplitudiarvoja putoamiskiiktyvyyden yksikössä. Vertailukohtaksi on valikoitu jälleen kunnonvalvontalaitteen muodostama toleranssiraja ja normaalin moottorin mittaustulokset.

Taulukko 5. *Maksimiväännön kuormitustilanteen amplitudiarvot.*

Kertaluku	Order0_5	Order1	Order1_5	Order2	Order2_5	Order3	Order3_5	Order4	Order4_5	Order5	Order5_5	Order6
Toleranssi	0.079	0.343	0.107	0.490	0.191	1.998	0.169	0.220	0.293	0.349	0.349	1.390
Normaali	0.129	0.214	0.467	0.371	0.107	0.642	0.124	0.023	0.056	0.062	0.101	0.343
Pienen ainemäärän ruiskutussuutin	0.248	0.523	0.242	0.754	0.186	0.546	0.158	0.191	0.084	0.265	0.197	0.360
Ison ainemäärän ruiskutussuutin	0.265	0.310	0.118	0.428	0.253	1.227	0.163	0.281	0.045	0.107	0.073	0.281

Taulukosta 5 havaitaan, että selkeimmin amplitudiarvot ovat nousseet 0,5 kertaluvulla poikkeavien ruiskutussuuttimien tapauksessa. Muilla kertaluvuilla ero ei ole yhtä selkeä ja johdonmukainen, mutta osittain amplitudiarvot ovat voimakkaampia normaalin moottorin mittaustulokseen verrattuna. Taulukossa 6 on esitettyä vastaavat amplitudiarvot 0,5 kertaluvulla kahdessa kuormitustilanteessa ja jokaisella mittaussuunnalla.

Taulukko 6. *0,5 kertaluvun amplitudiarvot kahdella kuormitustasolla.*

	Full1FWD	Full1SIDE	Full1UP	Full3FWD	Full3SIDE	Full3UP
Toleranssi	0.2940	0.2292	0.1182	0.0763	0.0900	0.0788
Normaali	0.5655	0.5676	0.5657	0.1272	0.1228	0.1295
Pienen ainemäärän ruiskutussuutin	0.2601	0.2620	0.2617	0.2460	0.2374	0.2477
Ison ainemäärän ruiskutussuutin	0.2149	0.2292	0.2195	0.2799	0.2701	0.2646

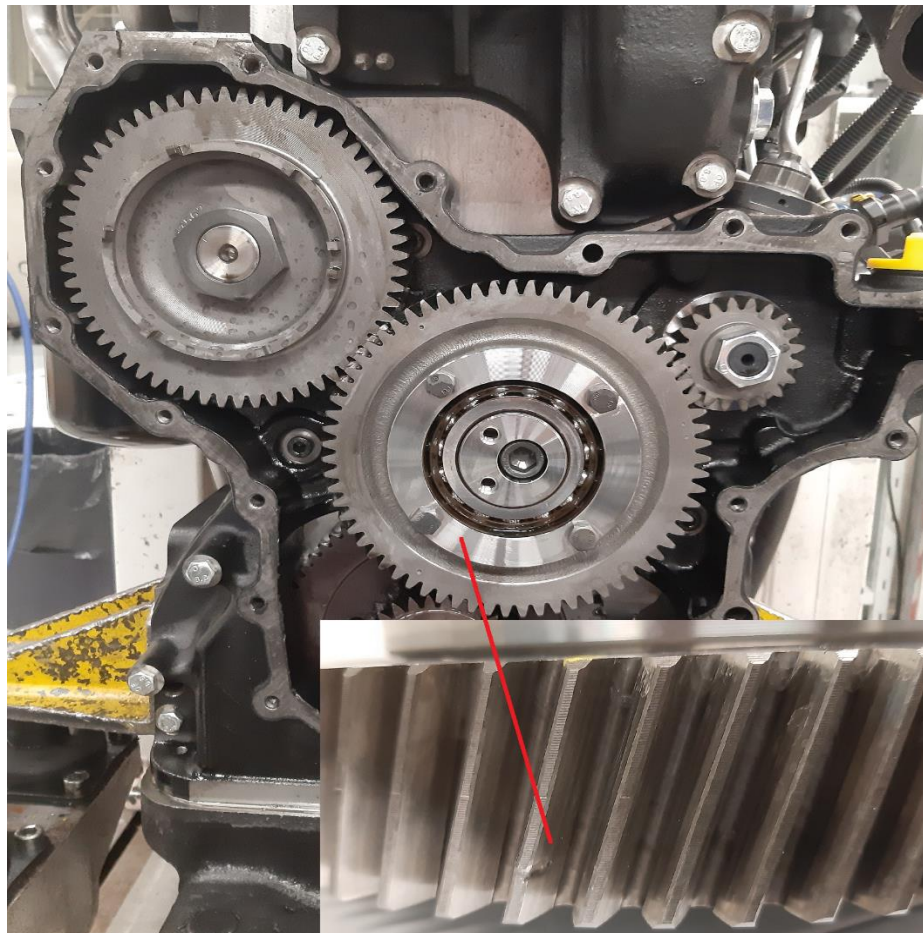
Havaitaan, että 0,5 kertaluvun amplitudiarvot ovat selvästi kasvaneet maksimiväännön (Full3) mittauksissa jokaisella mittaussuunnalla. Ison ainemäärän suuttimen tapauksessa amplitudiarvot ovat hieman pienen ainemäärän suutinta isommat. Selkeää eroa poikkeavien suuttimien mittaustuloksien välillä ei ole, mutta suurempi ero on muodostunut normaaliin verrattuna. Puolestaan maksimitehon (Full1) mittaustuloksissa vastaavaa ilmiötä ei ole selkeästi havaittavissa. Tämän perusteella on pääteltävissä, että viallinen ruiskutussuutin on ensisijaisesti havaittavissa maksimiväännön kuormitustilanteessa ja 0,5 kertaluvulla.

Etenkin palotapahtumiin vaikuttavien vikatilanteiden, kuten virheellisen venttiiliväläyksen ja poikkeavan ainemäärän ruiskutussuuttimien tapauksissa voi sylinterikohtaisista poikkeavuuksista johtuvat värähtelymuutokset sekoittua muiden värähtelyn herätteiden joukkoon, jotka vaikuttavat samalla taajuudella. Aikatason raakasignaalin sylinterikohtaisen työkierron mukaisella tahdistamisella voisi olla mahdollista havaita paremmin yksittäisten sylinterien aiheuttamia poikkeavuuksia. Tällöin tarkasteltaisiin värähtelyn amplitudin voimakkuutta moottorin kampiakselin kahden kierroksen aikana, jolloin kaikkien sylinterien

jokainen työkierron vaihe tapahtuu. Kun tiedetään sylinterien palojärjestys ja kampiakselin kulmat sylinterin palotapahtumille, voidaan jollain kampiakselin kulmalla tapahtuva poikkeavan voimakas amplitudiarvo yhdistää yksittäiseen sylinteriin. Näin olisi mahdollista tarkemmin kohdistaa esimerkiksi 0,5 kertaluvulla ilmenevä tavallista voimakkaampi amplitudin arvo yksittäisen sylinterin aiheuttamaksi. Tämä edelleen nopeuttaisi vian etsimisen prosessia. Analysointitapaan tarvittaisiin kampiakselin pyörimisnopeuden lisäksi myös signaali, jonka avulla nokka-akselin reaaliaikainen kulma saadaan tietoon.

5.5.3 Ajoituksen välihammaspyörän hammasvika

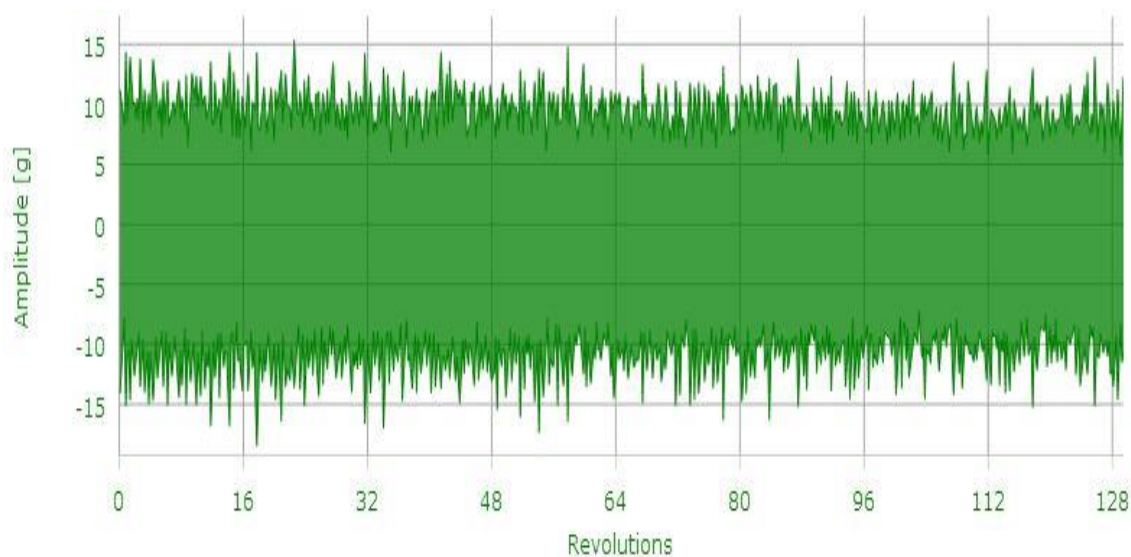
Keinotekkoisten vikatilanteiden testimootoriin vaihdettiin kuvan 36 mukainen viallinen moottorin ajoituksen välihammaspyörä. Hammaspyörän yhteen hampaaseen iskettiin kuvan alareunassa näkyvä kolhu. Kolhu on hammaspyörän sisäreunalla siten, että kolhun kohta osuu kaikkiin kolmeen hammaskosketuksessa oleviin hammaspyöriin.



Kuva 36. Välihammaspyörään tehty kolhu.

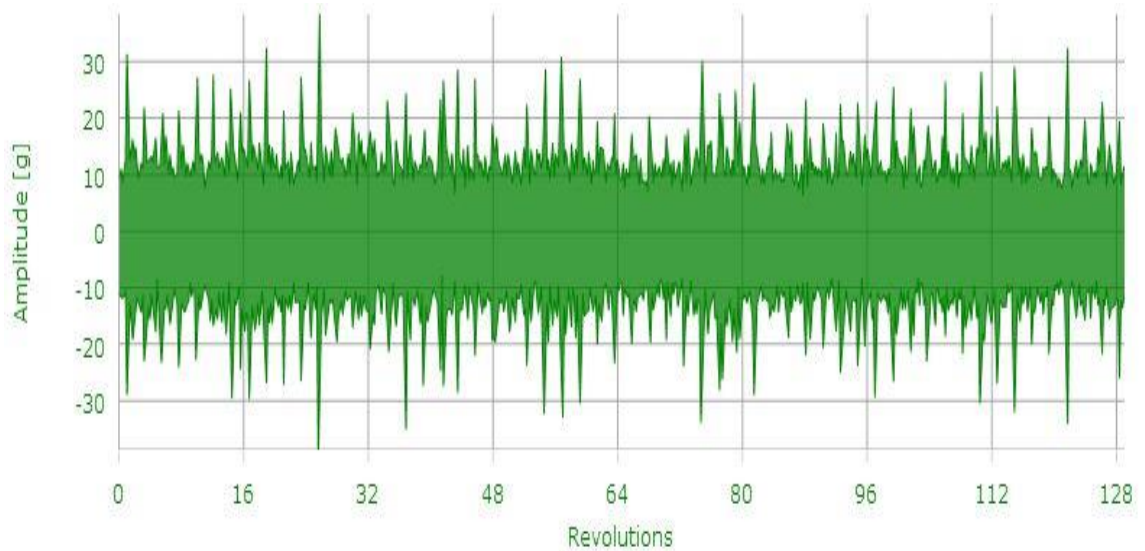
Koekäytön ensimmäisessä vaiheessa, jossa käymätöntä moottoria pyöritetään kampiakselista, aiheuttavat ainoastaan moottorin pyörivät komponentit värähtelyn

herätteitä eli palotapahtumista aiheutuvia herätteitä ei ole koekäytön ensimmäisessä mittauksessa. Hammaspyöriin liittyen on täten mielekäästä tutkia koekäytön ensimmäistä mittausta. Kuvissa 37 ja 38 näkyvät aikatazon signaalit ensin normaalista moottorista ja sitten viallisen hammaspyörän moottorista. Molemmat signaalit ovat käymättömästä moottorista ja pystysuuntaisen värähtelyn mittauskanavalta.



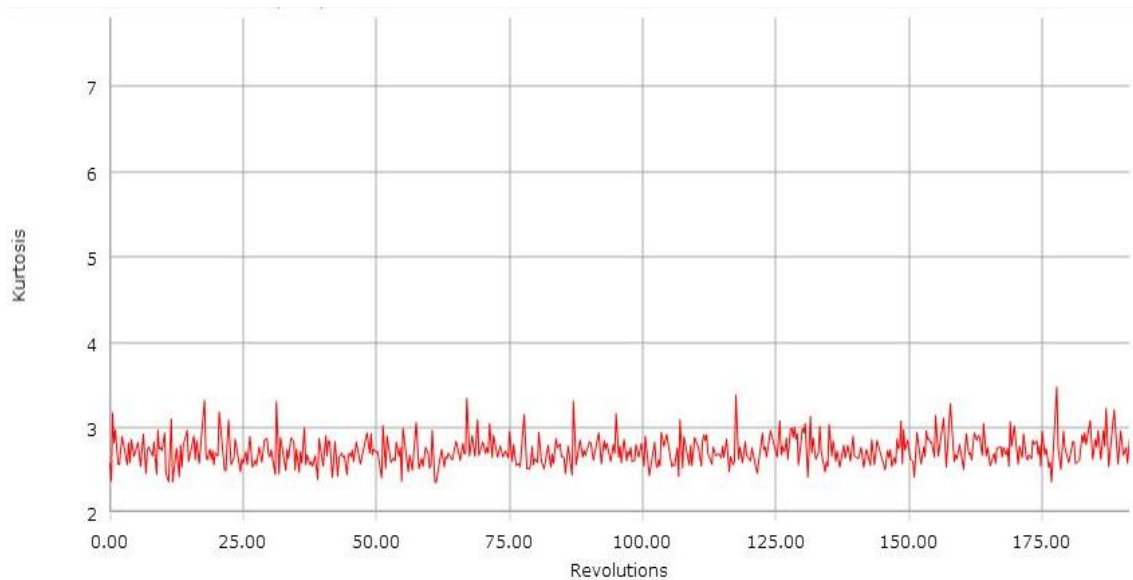
Kuva 37. Normaalin käymättömän moottorin aikatazon signaali.

Normaalin moottorin tapauksessa aikatazon signaali vaihtelee y-akselilla noin -10 g:n ja +10 g:n välillä. Aikatazon signaali viallisella välihammaspyörällä vaihtelee myös pääasiassa samalla välillä. Havaittavana erona näiden kahden aikatazon signaalien välillä on erityisesti viallisen välihammaspyörän tilanteessa signaalin lisääntynyt piikikkyys. Lisäntyneet voimakkaat piikit signaalissa johtuvat todennäköisesti siitä, kun viallinen hammas on rynnössä jonkin hammaspyörän kanssa.



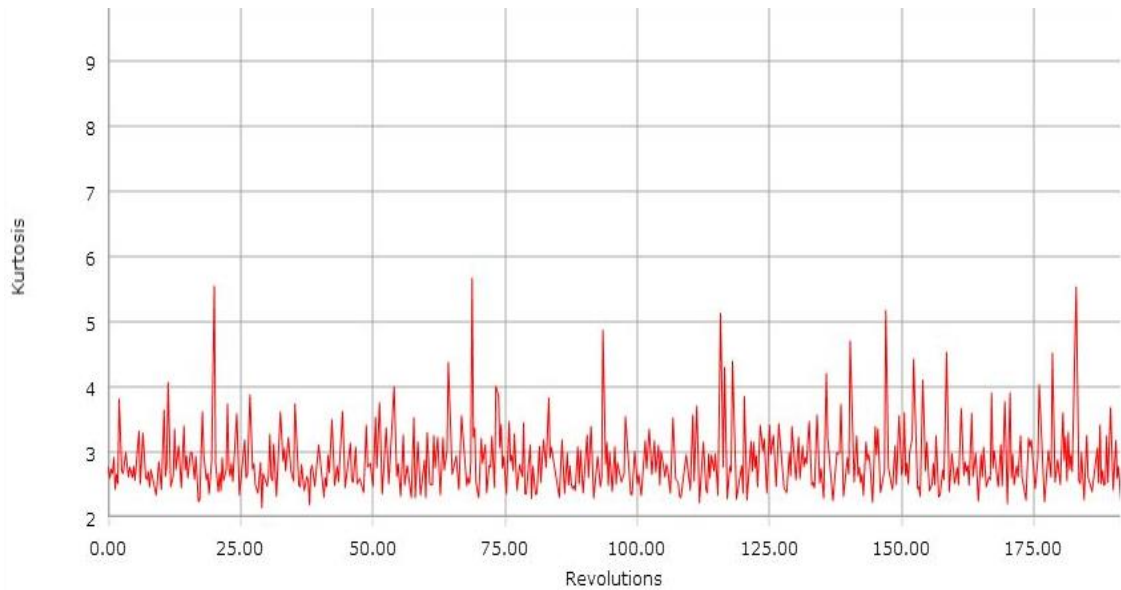
Kuva 38. Käymättömän moottorin aikatazon signaali viallisella välihammaspyörällä.

Sama asia on havittavissa myös aikatazon signaalista laskettujen kurtoosi arvojen avulla. Kurtoosi kertoo signaalin huipukkuudesta eli isompi kurtoosin arvo tarkoittaa epätasaisempaa signaalia. Kuvien 39 ja 40 esityksissä näkyvät normaalin ja viallisen hammaspyörän moottorien samoista aiempien kuvien mukaisista signaaleista lasketut kurtoosi arvot.



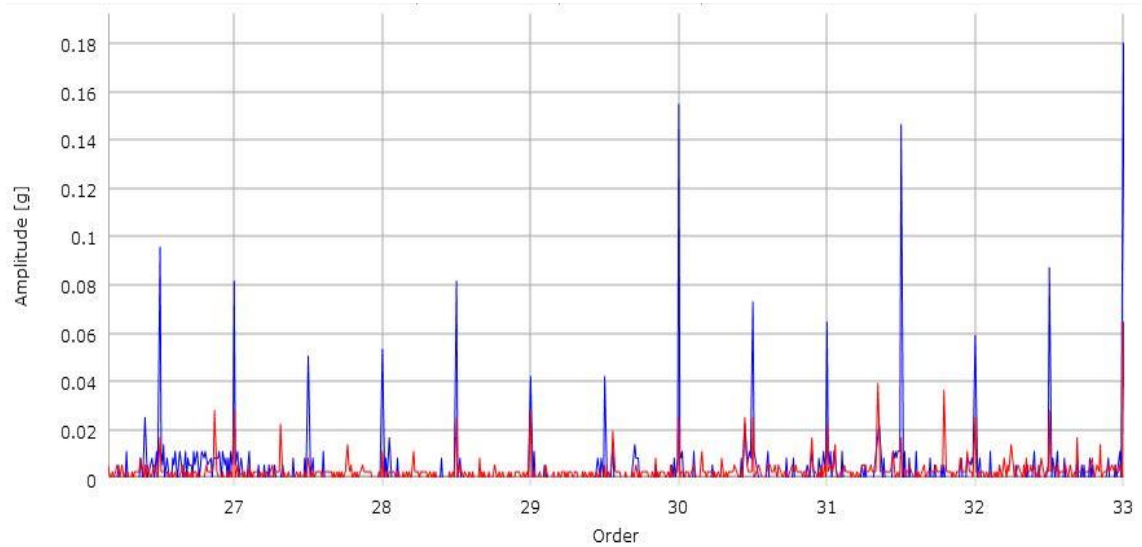
Kuva 39. Normaalin käymättömän moottorin kurtoosi.

Normaalin moottorin tapauksessa kurtoosi arvo pysyy pääasiassa alle kolmessa, kun taas viallisella välihammaspyörällä saadaan paljon yli kolmen kurtoosi arvoja. Kurtoosi arvot ovat myös enemmän vaihtelevampia viallisella välihammaspyörällä eli aikatazon signaalikin on tällöin enemmän vaihtelevampaa.



Kuva 40. Käymättömän moottorin kurtoosi viallisella välihammaspyörällä.

Tämän lisäksi, kun tarkastellaan saman viallisen välihammaspyörän mittaussignaalista muodostettua kuvan 41 kertalukuesitystä, havaitaan ryntötaajuuden ja sen sivunauhojen eli kertalukujen 30, 28, 29, 31 ja 32 amplitudien olevan suuruudeltaan normaaleja muodostuneeseen toleranssirajaan nähden. Toleranssirajan mukaisesti normaalissa tilanteessa suurimmat amplitudit ovat tyypillisesti puolikkaan kertaluvun välein. Viallisen hammaspyörän mittaustuloksessa suurentuneita amplitudeja on myös muissakin kertaluku kohdissa, joissa ei muutoin tyypillisesti esiinny värähtelyä. Esimerkiksi kertalukujen 27 ja 27,5 sekä 27,5 ja 28 välissä esiintyy suurentuneet amplitudit kohdissa, joissa tyypillisesti amplitudin arvo on lähes nolla. Tämä johtuu todennäköisesti viallisen hampaan ryntökosketuksen aiheuttamasta poikkeavasta taajuudesta eli viallisen hampaan aiheuttama jaksottainen iskeminen aiheuttaa värähtelyä tavallisesta poikkeavilla taajuuksilla.

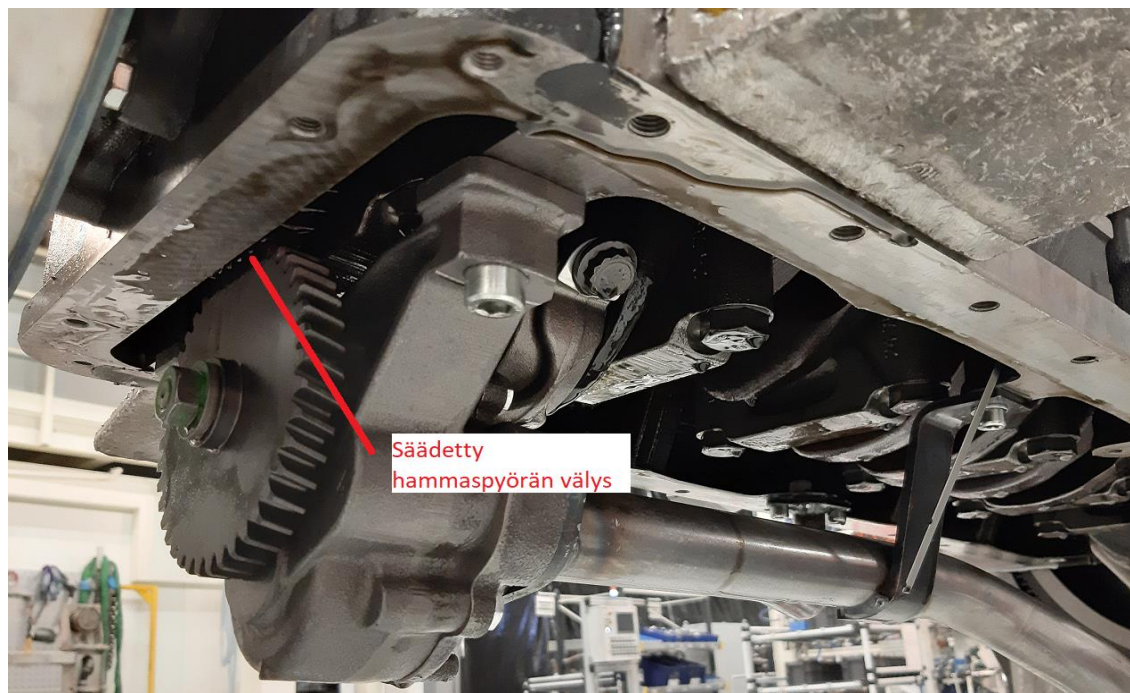


Kuva 41. Käymättömän moottorin mittaustuloksen spektri punaisella ja toleranssiraja sinisellä.

Tämän vikatilanteen yhteydessä havaitut poikkeavuudet käymättömän moottorin mittaustuloksista ovat havaittavissa myös käynnissä olevasta moottorista. Poikkeavuudet on mahdollista havaita moottorin käydessä samoilla tavoilla, mutta selkeimmin välihammaspyörän vika erottuu käymättömän moottorin pyöritysvaiheessa, jolloin voimakkaat palotapahtumista aiheutuvat värähtelyn herätteet eivät ole peittämässä hammaspyöristä aiheutuvia herätteitä.

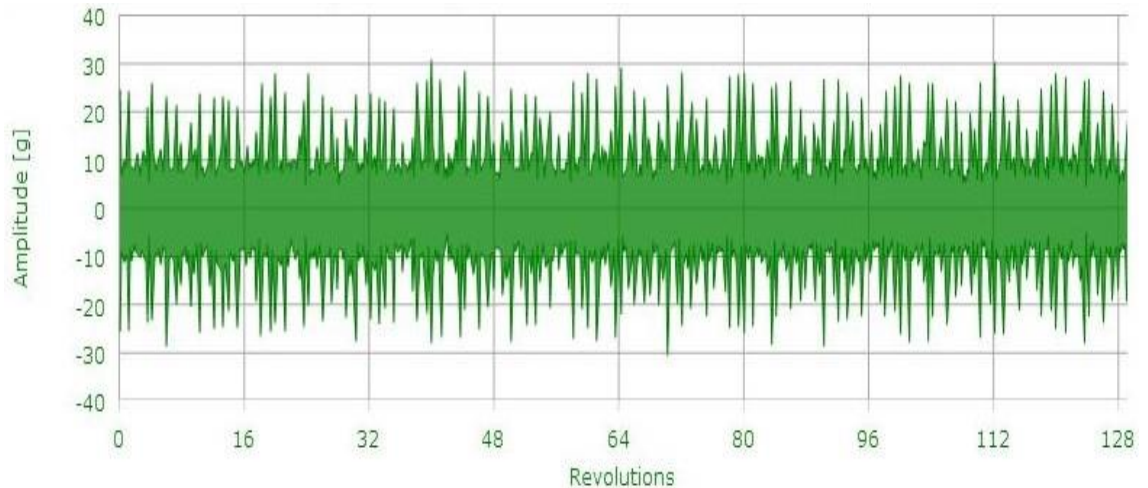
5.5.4 Virheellinen öljypumpun hammaspyörän vällys

Testauksessa olleeseen moottoriin säädettiin virheellinen öljypumpun hammaspyörän vällys. Vällys säädettiin kuvan 42 mukaisesti liian pieneksi eli säädettiin kampiakselin öljypumppua pyörittävän ja öljypumpun hammaspyörän välinen vällys normaalia tilannetta pienemmäksi. Tällöin hammaspyörien välinen hammaskosketus muuttuu erilaiseksi, kuin normaalisti ja aiheuttaa joissain tapauksissa ihmiskorvalla poikkeavaksi havaittavaa ääntä.



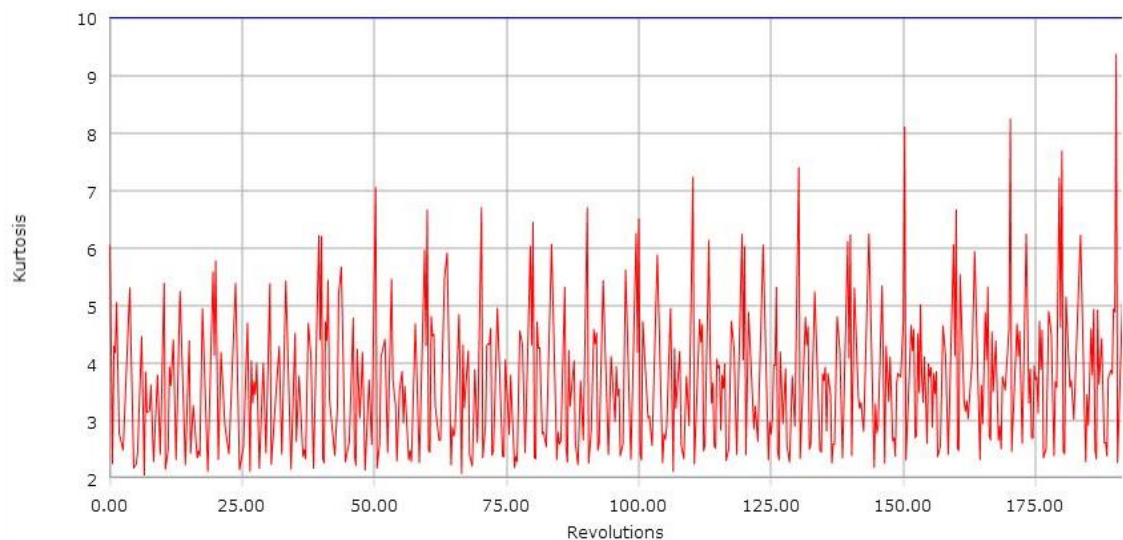
Kuva 42. Säädetty öljypumpun hammaspyörän välys.

Vikatilanteen aikatazon signaalia kuvassa 43 tarkastelemalla havaitaan, että signaalissa on selkeästi enemmän hajontaa, kuin aiemman kuvan 37 normaalin mittauksen signaalissa. Pääasiassa signaali vaihtelee tässäkin tapauksessa -10 g:n ja $+10\text{ g:n}$ välillä, mutta nyt esiintyy myös paljon suurempia piikkejä. Tässä tapauksessa hajontaa on myös selkeästi enemmän, kuin viallisen välihammaspyörän tapauksessa. Suurempien piikkien määrän lisääntyminen johtuu todennäköisesti siitä, kun lähes jokainen hammaspyörrien hammas iskeytyy epätavallisesti toisiaan vasten, jolloin voimakkaita värähtelyn herätteitä syntyy usein. Viallisen hampaan tilanteessa puolestaan voitettu hammas iskeytyy harvemmin, mikä näkyy luonnollisesti aikatazon signaalissa.



Kuva 43. Käymättömän moottorin aikatazon signaali öljypumpun hammaspyörän virheellisellä välyksellä.

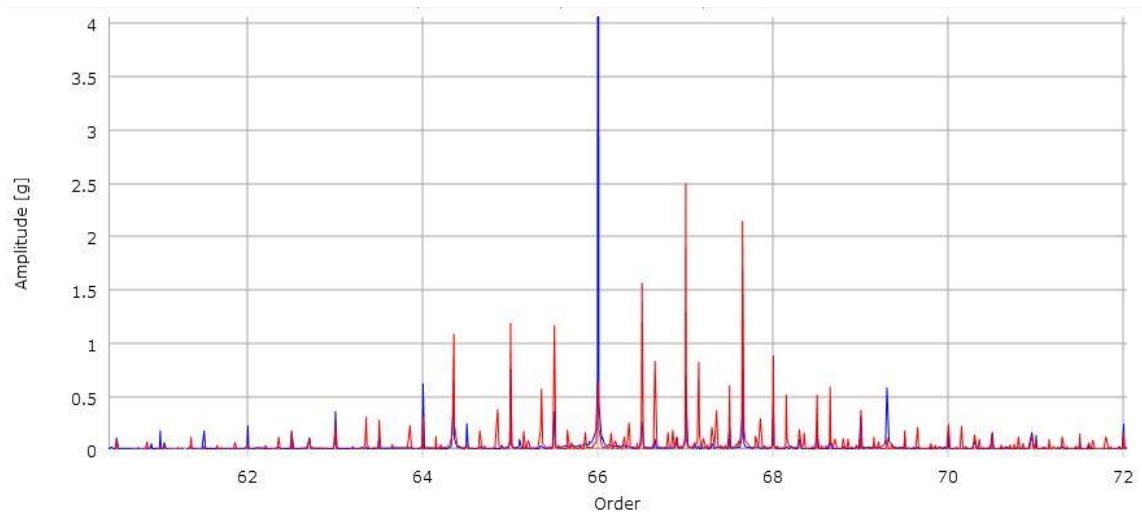
Lisäksi edellisen kuvan aikatazon signaalista muodostetussa kurtoosissa on huomattavan suuri hajonta verrattuna normaalin moottorin mittaussignaalin kurtoosiin. Öljypumpun virheellisen hammaspyörän välyksen kurtoosi näkyy seuraavassa kuvassa 44 ja on verrattavissa kuvan 39 normaalin moottorin vastavaan kurtoosiin.



Kuva 44. Käymättömän moottorin kurtoosi öljypumpun hammaspyörän virheellisellä välyksellä.

Nyt kurtoosi arvot ovat suurilta osin kolmea korkeampia, joten signaalissa tapahtuu paljon poikkeavuuksia normaalijakauman tilanteeseen verrattuna. Kurtoosi kuvaaja siis vahvistaa aikatazon signaalista havaittua suurempaa hajontaa signaalissa. Erityisesti öljypumpun hammaspyörään ilmiö saadaan liitettyä, kun tarkastellaan seuraavan kuvan

45 signaalista muodostettua kertalukuesitystä, jossa mittaustulos näkyy punaisena viivana ja kunnonvalvontalaitteen muodostama toleranssiraja sinisenä.



Kuva 45. Käymättömän moottorin kertalukuesitys öljypumpun hammaspyörän virheellisellä välyksellä.

Kertalukuesityksessä hammaspyörän ryntötaajuuden kertaluvun 66 kohdalla amplitudin suuruus on alhainen verrattuna muodostuneeseen toleranssiin. Puolestaan ryntötaajuuden sivunauhojen amplitudien suuruudet ovat kasvaneet. Kertalukujen 65 ja 67 amplitudit ovat huomattavan paljon kasvaneet verrattuna toleranssiin. Voikin päätellä vikatilanteessa tapahtuneen ryntötaajuuden amplitudin jakautuneen sivunauhojen taajuuksille suurentaen näitä. Tämä sivunauhojen suureneminen on tyypillinen ilmiö hammaspyörävikojen yhteydessä. Seuraavassa taulukossa 7 on ryntötaajuuden eli kertaluvun 66 ja sen sivunauhojen amplitudiarvot kolmessa eri kuormitustilanteessa ja pystysuuntaisella mittauskanavalla. Taulukon kaikki amplitudiarvot ovat putoamiskiihtyvyyden yksikössä ja arvopalkit helpottavat kunkin tilanteen arvojen suuruuden vertailua.

Taulukko 7. Öljypumpun hammaspyörän virheellisen välyksen amplitudiarvot.

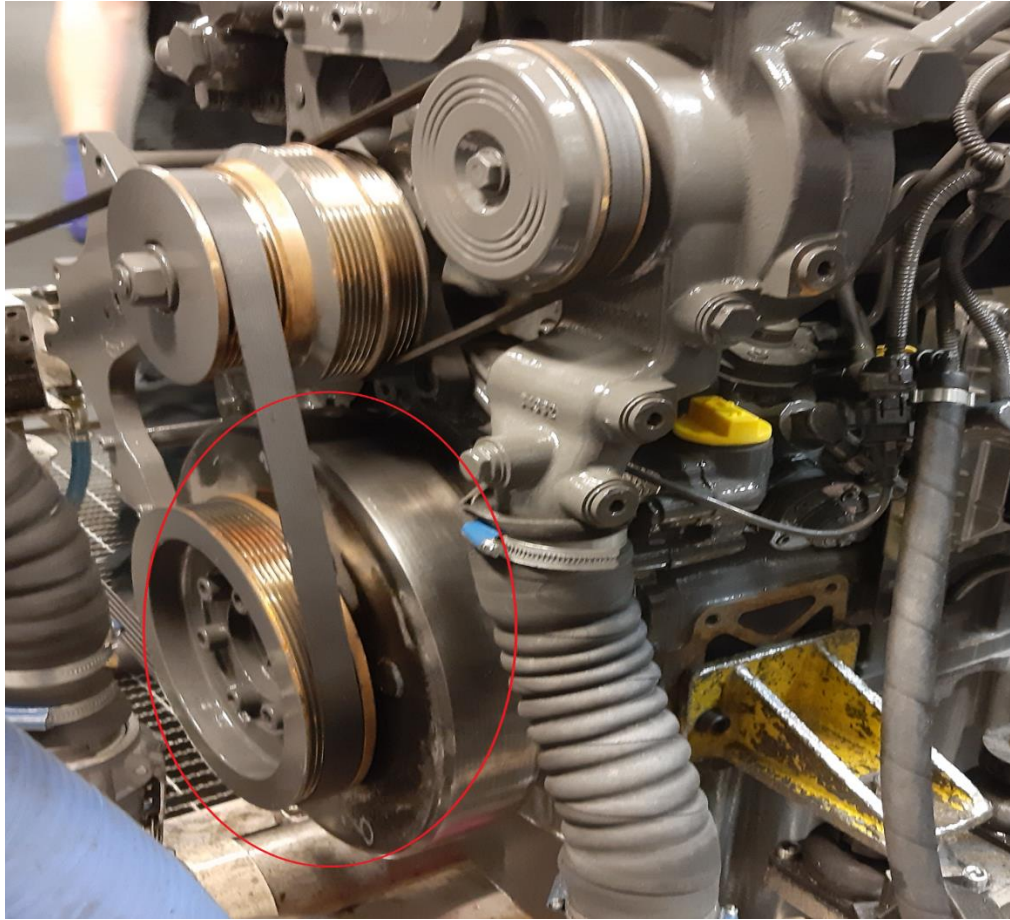
	Kertaluku	Order64	Order65	Order66	Order67	Order68
CrankUP	Toleranssi	0.400	0.656	8.153	0.611	0.355
	Normaali	0.113	0.023	3.366	0.203	0.163
	Virheellinen öljypumpun väly	0.312	1.191	0.639	2.499	0.884
Full1UP	Toleranssi	6.560	8.300	41.658	3.909	1.857
	Normaali	0.211	0.667	3.521	0.414	0.270
	Virheellinen öljypumpun väly	0.743	2.609	3.234	0.760	0.498
Full3UP	Toleranssi	12.811	16.064	101.874	14.286	8.798
	Normaali	4.531	3.670	23.568	2.364	0.715
	Virheellinen öljypumpun väly	2.522	1.266	14.961	2.004	1.570

Käynnissä olevassa moottorissa on havaittavissa samanlainen ilmiö täydellä teholla (Full1), kuin käymättömässä moottorissa (Crank) eli ryntötaajuuden kertaluvun amplitudin suuruudet pienenevät ja ryntötaajuuden sivunauhojen kertalukujen amplitudit suurenevät. Maksimiväännön kuormitustilanteessa puolestaan kahdessa edellisessä kuormitustilanteessa näkyvä ilmiö ei ole samanlaisena havaittavissa amplitudiarvojen perusteella. Ryntötaajuuden kertaluvun amplitudiarvo laskee tässäkin tapauksessa verrattuna normaaliin mittaustulokseen, mutta sivunauhojen amplitudiarvot jäävät jopa alhaisemmiksi, kuin normaalissa tapauksessa. Kunnonvalvontalaitteen muodostamaan toleranssiin verrattuna ilmiö ei näkynyt niin voimakkaasti eli moottorin käynnissä ollessa saattaa nykyisellä mittaustavalla tämänlainen vikatilanne sekoittua mittaustulosten normaaliin hajontaan.

Öljypumpun akselin pyörimistaajuuden kertaluvun tilastoa seuraamalla vikatilanne ei ollut erityisesti havaittavissa. Tämän kokeen perusteella ei voi siis päätellä, että öljypumpun hammaspyörään liittyvä vikatilanne olisi havaittavissa öljypumpun pyörimistaajuudella. Öljypumpun pyörimistaajuudella havaittava poikkeavuus luultavimmin kertoisi erilaisesta vikatilanteesta öljypumpussa. Tällöin vika voisi olla esimerkiksi öljypumpun rakenteessa.

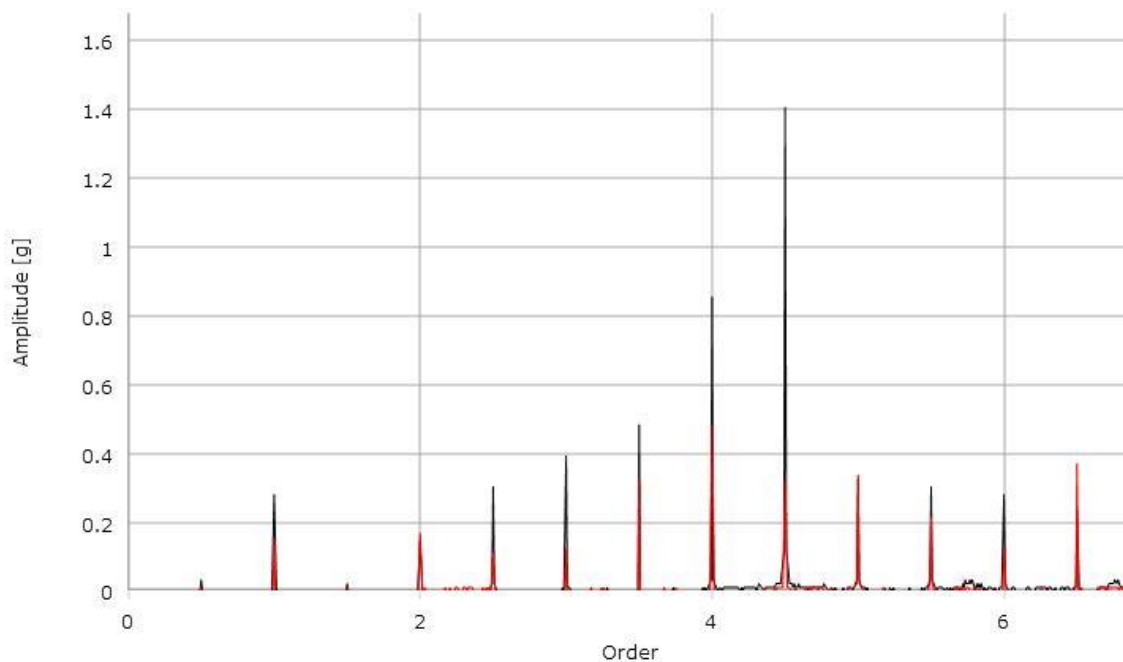
5.5.5 Viallinen kampiakselin värinävaimennin

Seitsemänsylinteriseen moottoriin vaihdettiin kampiakselissa kiinni oleva värinävaimennin vialliseen. Viallisesta värinävaimentimesta oli poistettu vaimennusominaisuus eli kampiakseliin kohdistuvien värähtelyjen vaimennus oli vikatilanteessa huomattavasti vähäisempää. Vikatilanne vastaa käytännössä tilannetta, jossa värinävaimentimen vaimennus on jumittunut. Kuvassa 46 näkyy punaisella ympyröitynä vaihdettu viallinen värinävaimennin. Testattavana ollut moottori oli matalakierrosmalli, jolloin moottorin kierrosnopeus on kaikilla normaalien testauksen kuormitustasoilla tavallista alhaisempi. Tulokset voivat olla siis poikkeavia normaalilla isommalla kierrosnopeudella pyörivällä moottorilla.



Kuva 46. *Vaihdettu värinävaimennin.*

Värinävaimentimen vaikuttaessa erityisesti kampiakselin värähtelyyn, on todennäköistä, että viallisen värinävaimentimen vaikutukset ovat havaittavissa pienillä alkupään kertaluvuilla. Kuvassa 47 näkyy päällekkäin mittaustulokset normaalin moottorin ja viallisella värinävaimentimella olevan moottorin mittaustulokset. Punaisella viivalla näkyy normaalin moottorin mittaustulos ja mustalla viivalla viallisen värinävaimentimen moottorin mittaustulos. Kuvan mittaustulokset ovat pystysuuntaiselta mittauskanavalta ja täyden tehon kuormituksesta.



Kuva 47. Normaalin moottorin mittaustulos punaisella ja viallisella värinävoimentimella mustalla.

Amplitudiarvot ovat selkeästi suurempia viallisella värinävoimentimella useimmilla alkupään kertaluvuilla puolen kertaluvun välein. Esimerkiksi kertaluvulla 4,5 amplitudiarvo on vikatilanteen tapauksessa moninkertainen normaalin moottorin mittaukseen verrattuna. Myös muillakin kuormitustasoilla ja mittaussuunnilla tulokset ovat samanlaisia eli viallinen värinävoimentin aiheuttaa suurempia amplitudeja etenkin pienillä kertaluvuilla. Testatun moottorityypin mittaustilasto oli vielä niin vähäinen, että mittalaitteen muodostamia toleranssirajoja ei ole mielekästä ottaa huomioon tämän vikatilanteen tarkastelussa. Myöhemmin, kun mittaustilastoa on kertynyt enemmän testauksessa olleesta moottorityypistä, on mahdollista verrata mitattua vikatilannetta jälkikäteen isompaan mittaustilastoon ja tehdä lisää johtopäätöksiä vikatilanteen erottuvuudesta.

5.6 Tulevaisuuden kehitysmahdollisuudet

Työn aiheeseen liittyviä kehitysmahdollisuuksia on suoraan tuotannossa tapahtuvaan koekäytön aikaiseen kunnonvalvontaan ja muita tämän lisäksi kehitettäviä värähtelymittaukseen ja sen data-analytiikkaan liittyviä asioita. Kumpikin kehittämisen osa-alue tukevat toisiaan, mutta kummassakin on erilaiset päätavoitteet.

5.6.1 Kehittäminen tuotannossa

Tuotannon mittaustilannetta voidaan kehittää muun muassa kiihtyvyyssanturin paikkaa vaihtamalla tai anturien määrää lisäämällä. Mikäli havaitaan, että nykyinen anturin sijainti ei ole riittävän hyvä tyypillisten vikojen havaitsemiseksi, voidaan anturille etsiä parempi sijainti motorissa. Jos puolestaan yhtä riittävää mittaustaikaa ei löydy, niin on myös mahdollista ottaa käyttöön mittaaminen useammalla kiihtyvyyssanturilla, jotka voivat olla yksiakselisia tai useampiakselisia kokemuksen tuoman ja suunnittelusta saatavan tietämyksen mukaan. Useimmin samankaltaisissa kunnonvalvonnan mittaustapahtumissa yksi mittaussuunta on riittävä ja todennäköisesti dieselmoottorin tapauksessa kampiakselin tangentiaalisessa suunnassa värähtely on voimakkainta. Tässäkin työssä tarkasteltujen mittaustulosten perusteella voi päätellä vikatilanteiden olevan käytännössä havaittavissa ainoastaan yhtä mittaussuuntaa käyttämällä. Mittauspaikan valinnassa oleellisenä kriteerinä on erityisesti valikoitujen komponenttien värähtelyn mahdollisimman tehokas seuraaminen, mikä saadaan aikaseksi mittaustaikaa mahdollisimman lyhyellä suoralla yhteydellä värähtelyn herätteeseen. Yhtä hyvää anturin sijaintia ei siis välttämättä löydy, mikäli halutaan kohdentaa erityistarkkailua useisiin värähtelyn herätteisiin eri puolilla moottoria. Tällöin useamman anturin käyttöönotto on perusteltua.

Anturityyppi on myös mahdollista vaihtaa kiihtyvyyssanturista esimerkiksi optiseen tai akustiseen värähtelyanturiin. Tämä voi tulla hyväksi vaihtoehdoksi, jos mittaustilannetta kiihtyvyyssanturilla ei saada riittävän laadukkaaksi ja samalla helposti toistettavaksi. Muun tyyppisten anturien hankkiminen todennäköisesti aiheuttaa enemmän kustannuksia, mutta toisaalta voivat myös parantaa mittaustapahtuman laatua ja edelleen tehostaa kunnonvalvonnan toimivuutta. Näiden anturityyppien tuoma etu on esimerkiksi anturien uudelleenkiinnittämisen poisjääminen, jos anturille löytyy sopiva kiinteä paikka koekäyttöhuoneessa, jolloin anturi olisi aina asemoituna samoin ilman uudelleenasettamista.

Samaa kunnonvalvonnan periaatetta voisi käyttää myös hyödyntämällä mikrofonia, jolloin tarkasteltaisiin äänen taajuussisältöä. Mikrofonin käyttämisessä on kuitenkin suurempi riski virheellisille johtopäätöksille, kun mukana saattaa olla häiritsevää taustamelua. Mikrofonia voisi käyttää esimerkiksi jonkin muun anturin tukena, jolloin saataisiin mahdollisesti varmistettua anturin mittauksista tehtyjä johtopäätöksiä vikatilanteista. Värähtelymitta-anturin käyttäminen on kuitenkin ensisijaisesti järkevintä, kun mikrofonilla havaittava ääni syntyy joka tapauksessa moottorin värähtelystä. Mikrofonin asentaminen olisi myös mahdollista kiinteästi koekäyttöhuoneeseen, jolloin sen asentamiseen koekäyttöjä varten ei kuluisi aikaa.

Nykyisellä anturointitavalla tai vastaavalla mekaanisesti kiinnitettävällä anturoinnilla mittauksia jatkettaessa on anturointia kehitettävä robustimmaksi ja paremmin tuotannollisiin olosuhteisiin sopivammaksi. Tällöin anturin johdin ja kiihtyvyyssanturi olisivat ulkoiselle rasiukselle paremmin kestäviä ja näin edelleen voidaan paremmin välttää mittauskaluston vikaantumisesta aiheutuvia mittausvirheitä. Käytössä oleva kiihtyvyyssanturi on mittaustarkkuudeltaan hyvä ja tutkimuskäytössä yleisesti käytetty, mutta tuotannollisessa käytössä voidaan mahdollisesti ottaa käyttöön hieman epätarkempi robusti anturi, jolloin mittaaminen saadaan pidettyä mahdollisimman sujuvana.

Nykyisen koekäyttösyklin aikaisiin värähtelymittauksiin on mahdollista tulla muutoksia riippuen kuormitustilanteen vaikutuksesta tyypillisimpien vikatilanteiden havaitsemiseen. Tässä työssä käsitellyn mittausdatan perusteella voidaan todeta etenkin käymättömän moottorin, täyden tehon ja täyden väännön aikaisten mittausten olevan vikatilanteiden havaitsemisessa oleellisia. Mikäli havaitaan muiden kuormitustilanteiden olevan ylimääräisiä tyypillisten vikatilanteiden havaitsemisessa, voidaan niissä tehdyt värähtelymittaukset poistaa ja yksinkertaistaa näin värähtelymittausyksiä sekä samalla vähentää kerättävän värähtelymittausdatan määrää.

Nokka-akselin signaalin mahdollinen lisääminen kunnonvalvontalaitteen datan käsitteilyyn todennäköisesti mahdollistaisi paremman palotapahtumien herättämän värähtelyn seuraamisen. Tällä saataisiin aikatazon signaali tahdistettua siten, että herätteiden kohdistaminen yksittäisiin sylintereihin mahdollistuisi. Ennen nokka-akselin signaalin käyttöönottamista tulisi kuitenkin tarkastella aikatazon signaalia, jotta voidaan varmistua signaalin käyttöönottamisen tuomista eduista. Signaalista tulisi havainnoida etenkin sen jaksollisuutta eli onko signaalissa havaittavissa toistuvia ilmiöitä, jotka voitaisiin erotella signaalista moottorin työkierron mukaisesti.

Kunnonvalvontalaitteen toiminnasta ja taloudellisesta sekä laadullisesta edusta varmistuttaessa, on sen käyttämistä tuotannossa mahdollista laajentaa muihinkin koekäyttölaitteistoihin. Kaikissa tuotannon koekäyttölaitteistoissa kunnonvalvontalaitetta käyttämällä saadaan aikaseksi erittäin tarkka laadunvalvonta, kun kaikki moottoriyksilöt läpäisevät samanlaisen värähtelymittauksen sisältävän koekäytön. Samalla useista eri koekäyttölaitteistoista kerättävä data voidaan kootusti kerätä yhdelle verkkolevyille, jolloin kaikkien koekäyttölaitteistojen värähtelymittausdata on helposti saatavilla useille eri käyttäjille.

Tuotannon päivittäisessä käytössä kunnonvalvontalaitte toimii tuotannon henkilöstön käytössä yksinkertaisesti kertomalla hyväksyykö laite mittauksessa olevan moottorin vai ei. Vikatilanteen vakavuuden ja aiheuttajan kohdistamisen tunnistaminen vaatii kuitenkin

enemmän perehtyneisyyttä laitteen toimintaan ja ymmärrystä mitatusta datasta. Henkilöstöä on mahdollista kouluttaa laitteiston peruskäyttämiseksi, mutta etenkin vikatilanteiden yhteydessä on syytä käyttää tilanteen arvioimisessa osaavaa asiantuntijaa.

Tuotannossa tärkeimpänä tavoitteena on etenkin kaikkien värähtelymittauksilla havaittavien vikatilanteiden täydellinen havaitseminen. Tällöin on mahdollista saada kaikki niihin liittyvät ylimääräiset korjaustoimenpiteet ennen koneen asiakkaalle toimittamista ja ensimmäisten käyttötuntien takuukorjaukset kitkettyä pois. Näin edelleen voidaan suoraan arvioida kunnonvalvonnan vaikutuksia laatuksentannuksiin ja myös mahdollisia vaikutuksia entistä korkeamman laadun maineen lisäämästä koneiden myyntimäärästä.

5.6.2 Muu kehittäminen

Kokemuksen lisääntyessä tyyppisten vikatilanteiden ilmenemisestä ja havaitsemisesta, voidaan alkaa käyttää tekoälyä apuna vikatilanteiden tehokkaassa tunnistamisessa. Tekoälyn käyttämisessä oleellisena asiana on jonkin järjestelmän opettaminen, jollain aineistolla. Opettamiseen käytettävä aineisto tai data on täten oltava varmistetusti halutun laista, jolloin opetettuun tietoon perustuva tekoälyratkaisu toimii varmasti halutulla tavalla. Opetettavan asiayhteyden tai ilmentymän ei siis tarvitse olla tekoälyn yhteydessä monimutkainen kokonaisuus, vaan yksinkertaisen yhteyden löytäminen asioiden välille voi toimia monissa tilanteissa.

Värähtelymittausdatan yhteydessä tekoälyn yhtenä hyödyntämisen mahdollisuutena voisi olla aiemman kuvan 29 tapainen valikoitujen kertalukujen tarkkaileminen sen mukaan, mitkä kertaluvut ovat kokemuksen mukaan vahvasti yhteydessä tyyppisiin vikatilanteisiin. Kertalukukohtaiset hyväksyntärajat muodostuisivat samalla periaatteella, kuin kunnonvalvontalaitteen koko spektriä tarkasteleva toleranssiraja. Hyväksyntäraja muodostuisi täten aiempien mittaustulosten tilaston perusteella. Etuna tässä tavassa verrattuna kunnonvalvontalaitteen tarkastelutapaan olisi mahdollisten virrehälytyksien vähentyminen. Kunnonvalvontalaitteen koko mitattuun spektriin kohdistuva tarkkaileminen saattaa ilmoittaa moottorin olevan viallinen myös tapauksessa, jossa havaittu virhe on mittaustuloksessa taajuusalueella, jolla ei ole merkittäviä komponenttien herätteitä. Valikoitujen kertalukujen seuraaminen samalla tavalla todennäköisesti kohdentaisi paremmin erilaisia virhetilanteita vian aiheuttajiin. Tämä olisi siis mahdollista sen jälkeen, kun saadaan enemmän kokemusta esiintyvistä vioista ja niiden erottuvuudesta mittaustuloksien joukosta.

Itseorganisoituvan kartan eli SOM:in (Self-Organizing Map) avulla olisi mahdollista ohjaamattomalla oppimisella koettaa tunnistaa yhteneväisyyksiä mittausdatassa. Kartan käyttämisen edellytyksenä on kuitenkin, että tutkittavien asioiden väliltä on olemassa funktio. Datajoukon alkioiden välillä olevat suhteet muutetaan geometrisiksi suhteiksi ja nämä on edelleen mahdollista esittää kartan avulla. Mittausdatan näytteitä käytettäisiin kartan syöteinä, joilla karttaa halutaan opettaa. Kartasta seurattaisiin luokiteltuja yhteneväisyyksiä ja muodostettaisiin hyväksi havaitun mittausdatan perusteella tyypillinen kartta mittausdatalle. Jos esimerkiksi jonkin mittausdata näytteen lisääminen muuttaisi karttaa huomattavasti, voitaisiin todeta sen näytteen olevan viallisesta moottoriyksilöstä.

Pelkän värähtelymittausdatan käyttämisen lisäksi voitaisiin tekoälytarkasteluun liittää myös muuta koekäytön aikaista mittausdataa. Koekäytön aikana mitataan samoilla kuormitustasoilla muun muassa lämpötiloja, paineita ja päästöjä, joten näiden mittaus tulosten ja värähtelymittaus tulosten yhdistämisellä voisi mahdollisesti löytää yhteisiä trendejä, jotka voisivat auttaa vikatilanteiden tunnistamisessa. Yhdistetyillä mittausdatoilla voitaisiin myös käyttää aiemmin mainittua itseorganisoituvaa karttaa tai muita yleisesti käytettyjä neuroverkkoratkaisuja.

Pelkän varsinaisen data-analytiikan lisäksi voisi värähtelymittausdataa käyttää värähtelyn simuloinnin tukena. Mittauspisteestä mitattu värähtely yhdistettäisiin simulointimalliin, jolloin simulointimalliin lisättyjen materiaaliominaisuuksien avulla saadaan mallinnettua myös muiden moottorin sijaintien värähtelyä. Tällöin saataisiin tietoon myös sellaisten kohtien värähtelyä, joista mittaaminen olisi hankalaa tai mahdotonta. Tämä lisäisi tehokkuutta kehitystoimintaan, kun saataisiin yhdistettyä reaaliaikaista mittaus tietoa jo tuotannossa olevista moottoreista. Saataisiin siis suoraan tietoa kehityshaasteiden avuksi ja samalla tuettaisiin entistä laadukkaampien moottorien suunnittelua.

Tekoälyratkaisujen ja värähtelymittauksen yhdistämisen tulevaisuuden tavoitetilana olisi tehokas vikatilojen havaitseminen, mitä voisi hyödyntää reaaliaikaisessa moottorien kunnonvalvonnassa. Värähtelymittausjärjestelmä olisi tällöin käytössä jatkuvasti moottoreita käyttävissä koneissa ja järjestelmä hälyttäisi värähtelymittauksella havaittavan vikatilanteen ilmaantuessa. Tämänlaisella itsestään hälyttävällä järjestelmällä välttyttäisiin moottorin mahdollisilta suuremmilta vahingoilta, kun vikatilanne tulisi tietoon jo mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Ajoissa havaittavan vikatilanteen korjaaminen on todennäköisesti huomattavasti nopeampaa ja halvempaa, kuin vasta moottorin täydellisen toiminnan loppumisen yhteydessä.

Yhtenä tulevaisuuden kunnonvalvonnan ratkaisu voisi olla myös moottorien normaalien huoltojen yhteydessä suoritettava värähtelymittaus, jolla tarkistettaisiin moottorin sisäisten komponenttien kunto. Tässäkin tapauksessa mittaustuloksen analysointi tulisi olla mahdollisimman tehokasta, jolloin arvio moottorin kunnosta saataisiin välittömästi ja ehdotukset tarvittavista korjaustoimenpiteistä. Tämänlainen värähtelymittaustapahtuma varmistaisi mittaustilanteen olevan aina mahdollisimman samanlainen, kun jatkuvassa reaaliaikaisessa mittauksessa olosuhteiden vaihtelevuus monissa käyttötapauksissa asettaa vikatilanteiden tunnistamiseen haasteita. Toisaalta vikatilanteiden havaitseminen on tällöin mahdollista ainoastaan huoltotilanteen yhteydessä eli mahdollisuudet vakavampiin vikoihin kasvavat.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Dieselmoottori käydessään aiheuttaa monia erilaisia värähtelyn herätteitä useilla taajuuksilla. Osa värähtelyn herätteistä voi syntyä samalla taajuudella, jolloin niiden vaikutus summautuu voimistuen tai heikentyen riippuen värähtelyn vaiheesta. Moottorin värähtelyä herättävät pääasiassa liikkuvat osat, palotapahtumiin liittyvät kaasuvoimat ja nesteiden liikehdintä. Värähtely vaimenee osittain moottorin rakenteeseen materiaaliominaisuuksien mukaisesti, jolloin värähtelyn voimakkuus vaihtelee riippuen sijainnista moottorissa. Resonanssitilanne moottorissa on kuitenkin vakavin ja vaurioita aiheuttava, jota tulee mahdollisuuksien mukaan välttää oikeanlaisella komponenttien suunnittelulla. Moottorin värähtelyn herätteitä on siis useita, jotka vaikuttavat kokonaisuutena moottorin värähtelyyn.

Värähtelyä on mahdollista mitata erilaisilla värähtelymitta-antureilla, joista yleisimmin kunnonvalvonnan yhteydessä käytetään kiihtyvyyssanturia. Kiihtyvyyssanturilla mitattu värähtely on mahdollista muuttaa mittalaitteella myös nopeudeksi, mikäli tarkastelun kohteena oleva taajuusalue on sellainen, jolla nopeuden käyttäminen on suotuisampaa. Moottoriin kiinnitetty kiihtyvyyssanturi muuttaa tuntoelimen avulla värähtelyn sähköiseksi signaaliksi, joka kulkeutuu johdinta pitkin mittalaitteelle.

Värähtelymitta-anturin lisäksi tarvitaan siis mittalaitte, joka tulkitsee ja muokkaa anturilta tulevan signaalin. Mittalaitteita on olemassa useita erilaisia, jotka tyypillisesti tarvitsevat lisäksi tietokoneen mittausdatan tarkastelua varten. Reilhoferin kunnonvalvontalaitte toimii samalla periaatteella, kuin tyypillisetkin mittalaitteet. Kunnonvalvontalaitteessa on lisäksi kunnonvalvontaan erityisesti kehitetty ohjelmisto, jolla mittaustulosten tilastollinen tarkasteleminen on mahdollista. Mittaustulosten tallennus ja niiden tilastollinen tarkastelu on täten kunnonvalvontalaitteessa erilaista verrattuna tyypillisiin mittalaitteistoihin. Usein värähtelymittauksissa hyväksyntärajat asetetaan johonkin hyväksi havaittuihin kiinteisiin arvoihin, mutta kunnonvalvontalaitteen järjestelmässä kyse on tilaston perusteella kehitetyvästä hyväksyntärajusta.

Mittaustulosten tilastollisella tarkastelulla pyritään havaitsemaan mittaustulosten isosta joukosta selkeästi poikkeavia mittaustuloksia. Mittaustuloksen poikkeavuus tilastosta tarkoittaa todennäköisesti mitatun moottorisyksilön olevan viallinen. Vian aiheuttajan löytämiseen käytetään edelleen tietoa komponenttien herättämän värähtelyn taajuuksista,

jotka on mahdollista määrittää, kun tiedetään moottorin pyörimisnopeus. Kun poikkeavuus havaitaan jollain taajuudella tai taajuusalueella, voidaan värähtelyn teoriaan perustuen tehokkaasti rajata poikkeavuuden aiheuttava komponentti tai komponentit. Kunnonvalvonnan peruseriaatteina dieselmoottorien tapauksessa ovat siis poikkeaman havaitseminen ja poikkeaman aiheuttajan tunnistaminen. Reaaliaikaisessa kunnonvalvonnessa kunnonvalvontaprosessin on oltava tehokas, jolloin saadaan nopeasti vialliseksi tunnistettu moottori kunnostettua ennen asiakkaalle toimittamista.

Värähtelymittausdatan yleistä laatua ja ominaisuuksia tarkasteltaessa muodostui muutamia tärkeimpiä havaintoja. Värähtelymittausdatan hajonta suhteessa mittausarvon suuruuden keskiarvoon saattaa olla useilla kertalukualueilla prosentuaalisesti hyvinkin suurta eli se saattaa joillain kertalukualueilla haitata merkittävästi vikatilanteiden tunnistamista. On siis mahdollista, että suuren hajonnan kertalukualueilla vikatilanteet erottuvat heikosti, jolloin vikatilanne voi jäädä täysin havaitsematta. Tämänlaisten epävarmojen kertalukualueiden tunnistaminen vaatii vielä lisää kokemusta tyypillisten vikatilanteiden vastaan tulemisesta, jolloin on mahdollista arvioida ovatko tyypilliset viat vakavuudeltaan voimakkaasti poikkeavaa värähtelyä aiheuttavia. Tilanne voi olla myös sellainen, että vikatilanteen täytyy olla tyypillistä vikatilannetta vakavampi, jotta se on poikkeavana havaittavissa.

Mittausvirheet myös helposti sekoittavat mittaustulosten tilastoa, jos niitä esiintyy liiaksi. Yksittäiset mittausvirheelliset tulokset eivät juurikaan vaikuta esimerkiksi sadan mittaustuloksen tilastossa. Luonnollisesti kuitenkin tilastollinen tarkastelumenetelmä toimii sitä paremmin, mitä vähemmän mittausvirheitä syntyy. Mittaustapahtuman luotettavuuteen on täten syytä kiinnittää erityistä huomiota. Tämän lisäksi tuotannon tasalaatuisuuden parantaminen mahdollisimman hyvälle tasolle edesauttaa tilastollisen tarkastelumenetelmän toimivuutta. Tällöin tuotannon valmistuksen ja kokoonpanon laatuvariaatiot vaikuttavat mittaustulosten vaihtelua kasvattaen mahdollisimman vähäisesti. Kokonaisuudessaan mittaukseen vaikuttavat yhdessä moottorin valmistuksen laatu ja mittaustapahtuman laatu.

Keinotekkoisten vikatilanteiden erottuminen normaalien moottorien mittauksista vaihtelivat vikatilanteesta riippuen. Palotapahtumiin liittyvien vikatilanteiden havaitseminen oli oletettavaa eri kuormitustasoilla pienillä kertaluvuilla puolen kertaluvun välein. Virheellisen venttiiliväläyksen tapauksessa poikkeavuus näkyi selvimmin 0,5 kertaluvulla, jossa värähtelyn amplitudiarvot kasvoivat samalla, kun venttiiliväläystä kasvatettiin. Suurempi venttiiliväläys havaittiin siis voimakkaampana värähtelynä ja edelleen johdonmukaisesti

suurin venttiilivälitys merkittävämpänä vikatilanteena. Muillakin pienillä kertaluvuilla oli havaittavissa osittain poikkeamia eri venttiilivälityksillä, mutta näillä kertaluvuilla amplitudin voimakkuus ei kasvanut yhtä johdonmukaisesti venttiilivälitystä kasvatettaessa. Tämän kokemuksen perusteella voidaan todeta kertaluvun 0,5 olevan mahdollisesti tärkein virheellisten venttiilivälitysten havaitsemisessa.

Poikkeavan ainemäärän ruiskutussuuttimien tapauksessa eroavaisuudet normaaliin verrattuna olivat havaittavissa tässäkin erityisesti 0,5 kertaluvulla. Venttiilivälitysvirheestä poiketen eroavaisuus oli kuitenkin havaittavissa vain täyden väännön kuormitustilanteessa, eikä niinkään muilla kuormitustilanteilla. Molemmilla, pienen ja suuren ainemäärän suuttimilla 0,5 kertaluvun amplitudiarvo oli täyden väännön kuormitustilanteessa selkeästi kasvanut. Ainemäärän suurentamisella tai vähentämisellä ei siis vaikuttaisi olevan merkitystä vian tunnistamisessa, kun molemmat tapaukset tehdyssä kokeessa voimistivat amplitudiarvoa.

Kampiakselin viallisella värinävaimentimella poikkeavuudet olivat havaittavissa tehdyllä kokeella myös pienillä kertaluvuilla. Tämä selittynee normaalin värinävaimentimen ominaisuudella vaimentaa palotapahtumien aiheuttamaa värähtelyä kampiakseliin, jolloin viallisen vaimentimen tapauksessa suurentuneet amplitudit ovat luonnollinen seuraus. Palotapahtumiin liittyviin vikatilanteisiin tarvitaan kuitenkin vielä enemmän kokemusta asian varmistamiseksi ja aikataason signaalin tahdistamisen tuomaa apua on syytä vielä jatkossa tutkia. Aikataason signaalin tahdistamisella voidaan saada tarkemmin havaittua esimerkiksi vikatilanteita sylinterikohtaisessa palamisessa.

Vikatilanteista selkeimmin havaittavia olivat hammaspyöriin liittyvät vikatilanteet, jotka näyttäytyivät teorian mukaan tyypillisellä tavalla. Molemmilla hammaspyöriin liittyvillä vikatilanteilla poikkeavuudet olivat havaittavissa etenkin käymättömän moottorin pyörittämisen aikaisesta mittauksesta. Tällöin aikataason signaalissa oli havaittavissa normaalin moottorin mittausta enemmän piikikkyyttä kummassakin tapauksessa. Lisäksi aikataason signaalista muodostettuja kurtoosi kuvaajia tarkastelemalla oli mahdollista saada tukea vaihtelun kasvun muodostumiselle. Kurtoosi arvot olivat useissa kohdissa selkeästi nousseet eli kurtoosi arvoa seuraamalla voisi olla hyvinkin mahdollista havaita hammaspyöriin liittyviä vikatilanteita.

Öljypumpun virheellisen hammaspyörän välityksen tilanteessa ryntötaajuuden sivunnauhojen voimistuminen oli havaittavissa, mikä on tyypillinen ilmiö hammaskosketuksen vikatilanteissa. Ryntötaajuuden kertaluvun amplitudiarvo puolestaan oli laskenut eli energiaa oli jakautunut ryntötaajuuden sivunauhoille. Hammavian tilanteessa ryntötaajuus-

den ja sen sivunauhojen voimakkuudesta ei puolestaan pystynyt päättämään vikatilanteesta, mutta merkittävimpänä havaintona amplitudien ilmestyminen tyhjästä kertaluville ryntötaajuuden lähelle. Muutamia amplitudeja ilmestyi sellaisten kertalukujen kohtiin, joissa ei aiemmin ollut ollenkaan värähtelyä. Hammaskolhun tilanteessa kertalukuesityksen tarkkaileminen ei ole yhtä hyvä tapa havaita vikoja, kuin aikatason signaalin tai kurtoosi arvon tarkkaileminen. Ryntötaajuuden sivunauhoja seuraamalla puolestaan on tehdyn kokeen perusteella mahdollista havaita merkittävimpiä hammaskosketuksen vikoja. Käynnissä olevan moottorin mittauksissa saattaa toisaalta hammaspyörien vikatilanteiden havaitseminen vaikeutua palotapahtumien aiheuttaman lisääntyneen värähtelyn takia.

Värähtelymittaukseen perustuvalla kunnonvalvontalaitteella mittausten jatkaminen on tämän työn tutkimuksen perusteella mielekästä. Kokemuksen lisääntyessä mittaamisesta voidaan edelleen kehittää mittaustapahtumaa luotettavampaan suuntaan ja sellaiseksi, että tyypillisimmät vikatilanteet havaittaisiin mahdollisimman tehokkaasti. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi mittauspaikan muutosta ja mahdollisesti useamman mittauspaikan käyttöönottamista yhden mittauspaikan sijasta. Lisäksi yksittäisen mittauspisteen mittaussuuntien määrä voidaan mahdollisesti vähentää, mikäli havaitaan pidemmällä aikavälillä, että mittauspisteen eri mittaussuuntien käyttäytyminen on samankaltaista. Useiden mittaussuuntien käyttäminen olisi käytännössä hyödytöntä, mikäli havaitaan eroavaisuuksien olevan jokaisessa tilanteessa pientä kanavien välillä.

Tulevaisuuden kehitysmahdollisuuksia työn aiheeseen liittyen on etenkin tekoälyratkaisujen kehittämisessä data-analytiikan tehostamiseksi. Mittaustuloksia kertyy ajan kuluessa suuresta määrästä moottoreja, joten mittaustulosten tilastot kasvavat nopeasti hyvin suuriksi. Tallennetun värähtelymittausdatan tehokas prosessointi tuo myös varmasti muita etuja vikatilanteiden löytämisen lisäksi. Ennakoivaan huoltoon liittyvät jatkuvat värähtelymittaukset ovat myös yksi mahdollinen kehityskohde, joka toisi etua asiakkaan käytön aikaiseen toimintaan huollon tarpeen arvioimisessa.

Tekoälyratkaisujen käyttöönottaminen ei kuitenkaan vielä välittömästi ole välttämättä kannattavaa, kun kokemus kunnonvalvontalaitteen käyttämisestä on vielä vähäistä. Hie- man pidemmällä ajanjaksolla, kun on mahdollista havaita värähtelymittalaitteen käyttöönottamisen vaikutukset käytännön laatuun. Tämän jälkeen, kun osataan arvioida todelliset vaikutukset ja nähdään jääkö laatuun vielä parannettavaa takuutapauksien perusteella. Mikäli vielä edelleen nähdään taloudellisesti kannattavana jatkaa laadun parantamista, on todennäköisesti hyödyllistä tutkia tekoälyratkaisujen tuomaa lisäetua

moottorien kunnonvalvontaan liittyen. Tekoälyn käyttäminen katsotaan yleensä järkeväksi siinä vaiheessa, kun perinteisimpien tapojen käyttäminen ei ole enää mahdollista esimerkiksi erittäin suuren datamäärän takia.

Kaiken kaikkiaan värähtelymittauksista saatavan datan hyödyntämisessä on varmasti vielä kehitettävää ja mahdollista tehdä uusia löydöksiä. Tämä työ antaa lähtökohtia jatkotutkimukselle ja tutkimusta on mahdollista jatkaa monella eri suuntauksella riippuen yrityksen kannalta oleellisimmista päämääristä.

LÄHTEET

ADAMS, M.L., 2010. *Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting*. 2nd edn. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Taylor & Francis. 442 s.

AUMALA, O., IHALAINEN, H., JOKINEN, H. ja KORTELAINEN, J., 1998. *Mittaussignaalien käsittely*. 3. uud. p. edn. Tampere: Pressus. 323 s.

GIRDHAR, P. and SCHEFFER, C., 2004. *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Burlington, MA; Amsterdam; Boston: Elsevier. 255 s.

GRENIER, K., 2016. *What is a Frequency Response Function (FRF)?* Saatavissa: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/What-is-a-Frequency-Response-Function-FRF/ta-p/354778>. Viitattu: 2.4.2019.

HORVATH, P. and EGERT, J., 2015. *Stress Analysis and Weight Reduction of a One-Cylinder Engine Crankshaft*. Hungary: Acta Technica Jaurinensis.

KINSLER, J., 2016. *What's an Order?* Saatavissa: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/What-s-an-Order/ta-p/355020>. Viitattu: 5.3.2019.

MELLIN, I., 2006. *Tilastolliset menetelmät*. Saatavissa: <https://math.aalto.fi/opetus/sov-toda/oppikirja/Johdanto.pdf> Viitattu: 20.5.2019.

MERCER, C., 2001. *High Pass Filtering And Tacho Signals*. Saatavissa: <http://blog.prosig.com/2001/06/06/high-pass-filtering-and-tacho-signals>. Viitattu: 14.6.2019

MOLLENHAUER, K., TSCHÖKE, H. and JOHNSON, K.G.E., 2010. *Handbook of Diesel Engines*. 1st edn. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. 636 s.

PCB PIEZOTRONICS, a-last update. *General Piezoelectric Theory*. Saatavissa: https://www.pcb.com/Resources/Technical-information/tech_gen. Viitattu: 24.4.2019.

PCB PIEZOTRONICS, b-last update. *Introduction to ICP® Accelerometers*. Saatavissa: https://www.pcb.com/Resources/Technical-information/Tech_Accel. Viitattu: 24.4.2019.

PSK5707, 2011. *Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys*. PSK Standardisointi.

REILHOFER KG, 2016. *Eol analyser v2 manual*.

REILHOFER KG, last update. *Acoustic laser*. Saatavissa: https://www.rhf.de/_downloads_EN/acousticLaser-e.pdf. Viitattu: 6.8.2019.

SALMI, T., 2003. *Teknillisen mekaniikan perusteet: statiikka, lujuusoppi ja dynamiikka*. 2. edn. Tampere: Pressus. 464 s.

SINHA, A., 2010. *Vibration of mechanical systems*. New York: Cambridge University Press.

THOMSON, W.T., 1989. *Theory of vibration: with applications*. 3. ed., 2. impr edn. London: Unwin Hyman. 467 s.

TIENHAARA, H., 2004. *Guidelines to engine dynamics and vibration*. Wärtsilä Corporation.

TIKKANEN, S., 2017. *IHA-2240 Teholähteet - Luentoesitys*. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: https://moodle2.tut.fi/pluginfile.php/546263/mod_resource/content/1/teholähteet_luento2_2017.pdf. Viitattu: 15.3.2019.