

PRO GRADU

# CMaS Spektrianalysoinnin automatisointi

Joonas Kiviniemi



Jyväskylän yliopisto  
Fysiikan laitos



# Alkusanat

Haluaisin kiittää Moventas Wind Oy:ta mielenkiintoisen opinnäytetyön tarjoamisesta. Lisäksi haluan kiittää CMaS- ja instrumentointiryhmää, josta erityisesti kiitän FM Jukka Elfströmiä ja FM Markus Pylvästä heidän avustaan niin työn suurten linjojen kuin myös pienten yksityiskohtien kanssa. Samoin haluan myös kiittää Service-puolen analyysoijia, joista erityisesti DI Petteri Kantolaa hänen opastuksestaan spektrien analysoinnin osalta. Haluan kiittää myös professori Markku Katajaa hyvästä ja tarkasta ohjauksesta. Lopuksi haluan kiittää vielä vanhempiani, ystäviäni sekä opiskelutovereitani heidän tuestaan ja kannustuksestaan.

Jyväskylässä, 2. marraskuuta 2011

Joonas Kiviniemi



# Tiivistelmä

Viimeisien vuosikymmenien aikana maailman sähkönkulutus on noussut tasaisesti. Tähän kehitykseen eri sähköntuottamisen teollisuuden alat ovat joutuneet vastaamaan lisäämällä tuotantokapasiteettiaan. Uusiutuvista energiamuodoista tuulienergia on lisännyt tuotantokapasiteettiaan ehkä eniten. Koko kehityksensä ajan tuulienergian tuotantokapasiteetin lisääntyminen on ollut eksponentiaalista ja tämän kehityksen ennustetaan myös jatkuvan.

Samaan aikaan kilpailu tuuliturbiinien osien valmistajien välillä kiristyy. Erittäin tärkeänä osana kilpailussa on tuotteen mukana myytävät palvelut. Tästä hyvä esimerkki on tuuliturbiinien vaihteiden valmistajan Moventaksen myymä kunnonvalvontajärjestelmä. Kyseisellä kunnonvalvontajärjestelmällä pystytään seuraamaan vaihteiden ja turbiinin muiden osien tilaa reaaliaikaisesti.

Tässä työssä keskityttiin Moventaksen kunnonvalvontajärjestelmän, CMaS:n, värähtelyspektrien analysoinnin automatisoinnin kehittämiseen. Vaihteilta tulevia värähtelyspektrejä tulee päivittäin tuhansia. Aiemmin näitä spektrejä ollaan analysoitu manuaalisesti, mutta on selvää että tällöin ei pystytä analysoida kaikkia. Lisäksi tulevaisuudessa analysoitavien värähtelyspektrien määrän odotetaan kasvavan. Tähän haasteeseen lähdettiin kehittämään algoritmia, joka analysoisi värähtelyspektrit automaattisesti.

Algoritmin kehittämisessä haasteena oli saada algoritmista geneerinen siten, että se toimisi hyvin eri vaihdetyyppien, värähtelyanturien ja spektrityyppien kanssa. Algoritmin toimintaa verrattiin manuaaliseen analysointiin ottamalla erään vaihdetyypin vikaantuneita vaihteita ja katsomalla, kuinka nopeasti algoritmi havaitsee vaihteen vikaantumiseen. Tulokseksi saatiin, että algoritmi reagoi keskimäärin 13,5 päivää aikaisemmin kuin mitä vikaantumisiin on reagoitu manuaalisen analysointityön kautta.

Tulevaisuudessa algoritmia pyritään kehittämään siten, että sen analysoimat spektrit lajiteltaisiin niiden kiinnostavuuden mukaan, jolloin järjestelmä antaisi analysoitsijalle vain merkittävimmät spektrit. Tarkoituksena on sulauttaa kehitetty algoritmi Moventaksen internetselainpohjaiseen CMaS-käyttöliittymään.



# Abstract

The subject of this master's thesis was to automate the analysis of the vibration spectrums measured from gears in wind turbines. The main goal was to develop an algorithm that could analyze automatically over 95% of the phenomenons found from the spectrums by manual analysis.

To make things more complicated the algorithm should work on different types of spectrum's such as velocity, acceleration and envelope spectrums. Also it should be generic in the analysis of the spectrums obtained from different gear types with different types of vibration sensors.

The developed algorithm was implemented into a program called Spectrum Analyzer or Spectrus. The program was first developed to ease the manual analysis of the spectrums and it introduced tools like harmonic and sideband cursors. Still the manual analysing took considerable amounts of work which still was possible to automate.

The algorithm was tested on a specific gear type with gears that had a similar fault in them. The results were that the algorithm caught the faults on average 13,5 days earlier compared to manual analysis.





# Sisältö

Kuvat	xi
Terminologia ja lyhenteet	xiii
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Värähtelyn teoria ja mittaaminen</b>	<b>3</b>
2.1 Värähtelyn synty . . . . .	3
2.2 Kiihtyvyyssanturin perusteet . . . . .	4
2.3 Signaalinkäsittelyn perusteet . . . . .	5
2.3.1 Anturilta vaadittavat ominaisuudet . . . . .	5
2.3.2 Signaalin esikäsittely . . . . .	6
2.3.3 Aikatason mittaus . . . . .	7
2.3.4 Värähtelyspektrin muodostus . . . . .	7
2.3.5 Verhokäyräspektrin muodostus . . . . .	11
<b>3 Vaihteiden kunnonvalvonta värähtelyspektrien avulla</b>	<b>13</b>
3.1 Kunnonvalvontajärjestelmän arkkitehtuuri . . . . .	13
3.2 Tuuliturbiini ja sen vaihteen rakenne . . . . .	14
3.2.1 Tuuliturbiinivaihteet . . . . .	15
3.2.2 Vaihteen rakenne . . . . .	16
3.3 Diagnostiikka värähtelyspektrien perusteella . . . . .	18
3.3.1 Epätasapaino . . . . .	19
3.3.2 Taipunut akseli . . . . .	19
3.3.3 Resonanssi . . . . .	21
3.3.4 Akselin linjausvirhe . . . . .	21
3.3.5 Mekaaninen välitys . . . . .	22
3.3.6 Vierintälaakeriviat . . . . .	23
3.3.7 Hammasvälitysten vikat . . . . .	25
3.3.8 Vikaantuneen värähtelyanturin spektri . . . . .	27
<b>4 Värähtelyspektrin analysoinnin automatisointi</b>	<b>29</b>
4.1 Kehitystyön tavoitteet ja haasteet . . . . .	29
4.1.1 Asetetut tavoitteet . . . . .	29

4.1.2	Tunnistettavat ilmiöt . . . . .	31
4.1.3	Pitkän aikavälin tavoitteet . . . . .	32
4.2	Tietokannan rakenne . . . . .	32
4.3	Algoritmin toiminta . . . . .	35
4.4	Spectrus-ohjelman uusi toiminnallisuus . . . . .	39
4.5	Jatkokehityskohteet . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>45</b>
	<b>Kirjallisuutta</b>	<b>47</b>

# Kuvat

1.1	Tuulivoimaloiden kapasiteetin kasvu nyt ja tulevaisuudessa . . . . .	1
2.1	Kuuden vapausasteen värähtelijä . . . . .	4
2.2	Kiihtyvyyssanturin rakenne . . . . .	5
2.3	Esimerkit Moventaksen käyttämisestä kiihtyvyyssantureista . . . . .	6
2.4	Esimerkki aikatazon signaalista . . . . .	8
2.5	Esimerkki Fourier-sarjan käytöstä . . . . .	9
2.6	Suorakaideaallon spektri . . . . .	9
2.7	Esimerkkikuvaajat erityyppisistä värähtelyspektreistä . . . . .	10
2.8	Esimerkkikuvaajat spektrin erotuskyvyn tärkeydestä . . . . .	11
2.9	Verhokäyräspektrin muodostus . . . . .	12
3.1	Kunnonvalvontajärjestelmän kaaviokuva . . . . .	14
3.2	Tuulivoimalaitoksen pääosat . . . . .	14
3.3	Tuuliturbiinin nacelle ja sen pääosat . . . . .	15
3.4	Esimerkkikuvia tuuliturbiinivaihteista . . . . .	15
3.5	Planeettavaihteen rakennekuva . . . . .	16
3.6	Planeettavaihteen rakenne ylhäältä . . . . .	17
3.7	Värähtelyspektrin piikkien fyysinen selitys . . . . .	18
3.8	Värähtelyspektri epätasapainotilanteesta . . . . .	20
3.9	Värähtelyspektri taipuneen akselin tapauksessa . . . . .	20
3.10	Kielen eri ominaisvärähtelymoodeja . . . . .	21
3.11	Värähtelyspektri kulmalinjausvirheen tapauksessa . . . . .	22
3.12	Värähtelyspektri säteislinjausvirheen tapauksessa . . . . .	22
3.13	Värähtelyspektri löysän kiinnityksen tapauksessa . . . . .	23
3.14	Värähtelyspektri huonon sovituksen tapauksessa . . . . .	23
3.15	Vierintälaakerin rakenne . . . . .	24
3.16	Vierintälaakerin vika värähtelyspektrissä . . . . .	25
3.17	Värähtelyspektri hammaspyörällisen koneen normaalissa toiminnassa . . . . .	25
3.18	Värähtelyspektri hammaspyörän ylikuormitustilanteessa . . . . .	26
3.19	Värähtelyspektri hammaspyörän kuluneiden hampaiden tapauksessa . . . . .	26
3.20	Värähtelyspektri hammaspyörän vian tapauksessa . . . . .	27
3.21	Värähtelyspektri rikkinäisen anturin tapauksessa . . . . .	27
4.1	Alkuperäinen mielikuva algoritmin tulevasta toiminnasta . . . . .	30
4.2	Kehitetyn tietokannan malli . . . . .	34
4.3	Värähtelyspektrin taustatasen määrittäminen . . . . .	36
4.4	Värähtelyn taustatasosta erottuvien taajuuksien tunnistus . . . . .	37

4.5	Kierrosnopeuden kalibrointi värähtelyspektristä . . . . .	37
4.6	Ilmiöiden tunnistus spektristä . . . . .	38
4.7	Spectrus-ohjelman toiminta ennen . . . . .	41
4.8	Spectrus-ohjelma algoritmin implementoinnin jälkeen . . . . .	42

# Terminologia ja lyhenteet

- **CMaS:** Condition Management System
- **CMaS-käyttöliittymä:** Selainpohjainen käyttöliittymä, josta voidaan muun muassa seurata eri suureiden trendejä.
- **HSS:** Nopea porras (High Speed Stage)
- **IMS:** Välinopeuden porras (Intermediate Stage)
- **M\_HSS, M\_IMS, M\_PS:** Eri porrastasojen ryntötaajuutta merkitsevät lyhenteet (M = meshing, ryntö).
- **Merkittävä taajuus:** Spektristä löydetty taajuus, joka on ylittänyt spektrin värähtelyn taustatason. Nämä taajuudet pyritään tunnistamaan spektristä ilmiökirjaston avulla.
- **PS:** Planeettaporras (Planetary Stage)
- **R\_HSS, R\_IMS, R\_PS:** Eri porrastasojen pyörimistaajuutta merkitsevät lyhenteet (R = rotation).
- **Seurattava taajuus:** (engl. *monitored frequency*) vaihdetyyppiin liittyvään ilmiöön liitetty taajuus, jonka avulla ilmiö tunnistetaan spektristä.
- **WWEA:** World Wind Energy Association



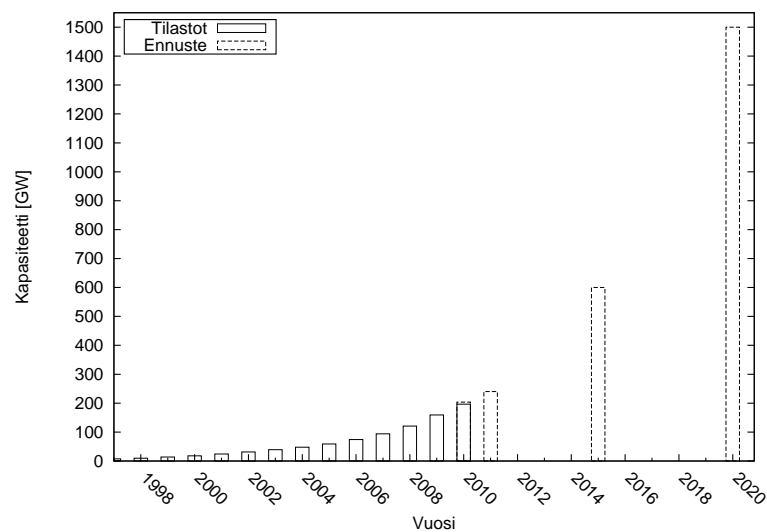
# Luku 1

## Johdanto

Uusiutuvista energianlähteistä tuulivoima on kasvanut ja kehittynyt ehkä eniten. Kuvasta (1.1) nähdään, miten tuulivoiman tuotantokapasiteetti on kasvanut viimeisinä vuosina ja miten sen odotetaan kehittyvän. Kuvasta nähdään myös, miten kehityksen odotetaan olevan jatkossakin eksponentiaalista.

Suorassa suhteessa tuulivoimaloiden lisääntyessä myös alihankkijoiden pitää vastata kasvavaan kysyntään. Eräs kriittinen komponentti tuuliturbiinissa on sen vaihde, joita muun muassa Moventas Wind Oy valmistaa.

Kilpailu tuulivoimalavaihdemarkkinoilla on kovaa ja vaihteiden mukana myytävillä palveluilla on tärkeä osa kilpailukyvyn ylläpitämisessä. Muuan tärkeä palvelu vaihteiden rinnalla on niiden kunnonvalvonta. Vaihteiden koon kasvaessa ja hinnan noustessa niiden



**Kuva 1.1:** Tuulivoimaloiden kapasiteetin kasvu viime vuosina ja sen ennustettu kehittyminen. Tieto kerätty WWEA:n raportista [1].

optimaalisesta käytöstä ollaan kiinnostuneita. Kunnonvalvonnan kautta vaihteen huoltoseisokkeja voidaan lyhentää huomattavasti, kun tiedetään jo ennakolta mikä tai mitkä osat vaihteesta ovat rikkoontumassa ja kaipaavat huoltoa tai vaihtamista.

Vaihteiden määrän lisääntyessä niiltä kerätty mittadata lisääntyy myös huomasti. Eräs tärkeä mittatieto, jolla vaihteiden tilaa seurataan ovat värähtelyspektrit. Yhdellä vaihteella voi olla useampia värähtelyantureita, joilta jokaiselta kerätään spektrit useammassa suunnassa. Pidemmän ajan kuluessa on tullut selväksi, ettei kaikkia värähtelyspektrejä voida käydä läpi käsin. Tämän takia Moventaksella päätettiin ryhtyä jatkokehittämään spektrien selailemisohjelmaa siten, että ohjelma voisi analysoida spektrit automaattisesti ja ilmoittaa kaikista niissä nähtävistä ilmiöistä.

Tässä työssä käydään aluksi läpi värähtelyyn liittyviä perusasioita sekä nykyisin yleisimmän värähtelyanturin, kiihtyvyyssanturin, toimiintaa. Lisäksi tehdään katsaus, miten värähtelyanturien signaaleja joudutaan käsittelemään jotta lopulta saadaan analysoitava värähtelyspektri sekä verhoikärspektri. Seuraavaksi käsitellään tuuliturbiinien ja -vaihteiden rakennetta sekä Moventaksen kunnonvalvontajärjestelmää. Lisäksi käydään läpi yleisesti, minkälaista diagnostiikkaa värähtelyspektreistä voidaan tehdä. Lopussa kerrotaan vielä, miten analysoinnin automatisoiva algoritmi kehitettiin, mitä eri asioita algoritmiin liittyen piti ottaa huomioon ja miltä ohjelma näyttää toimivan algoritmin kanssa.



## Luku 2

# Värähtelyn teoria ja mittaaminen

### 2.1 Värähtelyn synty

Mekaaninen värähtely, jota myös joskus kutsutaan tärinäksi, määritellään jonkin kappaleen jatkuvana liikkeenä tasapainoasemansa ympärillä. Kappaleella voidaan käsittää kone tai koneen osa. Pysyäkseen yllä värähtely tarvitsee voiman, jonka suunta tai suuruus muuttuu. Täten esimerkiksi talon kattoa vasten painava lumi ei aiheuta värähtelyä. Sen sijaan lumen lähtiessä liikkeelle se saattaa aiheuttaa hyvinkin merkittäviä lyhytaikaisia värähtelyitä.

Yksinkertaisimmassa tapauksessa kappale värähtelee vain yhdessä vapausasteessa. Todellisuudessa kuitenkin käsitellään kappaleita, jotka voivat värähdellä vähintään kuudessa eri vapausasteessa (2.1). Värähtelevää systeemiä voidaan kuvailla massan, jousen ja vaimennuksen avulla ja värähtely voidaan tilanteista riippuen jakaa vapaaseen ja pakotettuun värähtelyyn. Vapaassa värähtelyssä värähtelevää systeemiä poikkeutetaan tasapainoasemastaan. Riippuen vaimennuksen voimakkuudesta tai puutteesta systeemi värähtelee eri tavoin. Pakotetussa värähtelyssä sen sijaan systeemiin kohdistuu esimerkiksi harmoninen voima, jolloin systeemi alkaa värähdellä tämän voiman taajuudella [2, s. 3].

Kunnonvalvonnan kannalta värähtelymittauksia tehdään pääasiassa kahdesta syystä: mittauksilla voidaan arvioida pyörivän koneen osien kuntoa ja lisäksi värähtelyn lisääntyminen on yleensä haitallista koneelle, rakenteille sekä tuotantoprosessille. Värähtely voi

- löysyttää rakenteita,
- aiheuttaa meluhaittoja,
- vähentää koneen käyttöikää,

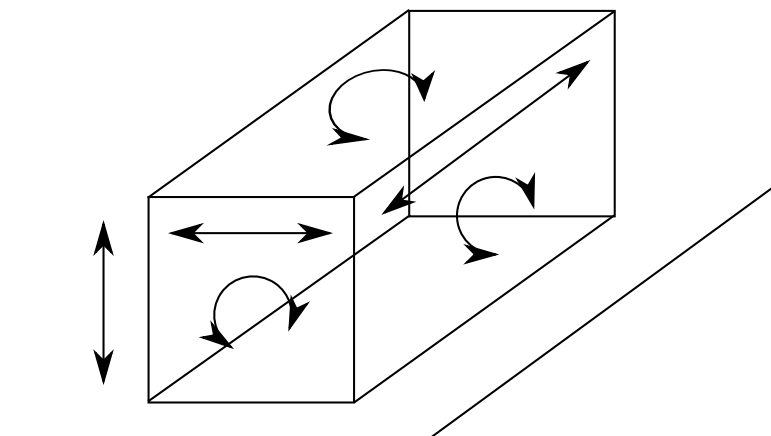
- heikentää lopputuotteen laatua,
- lisää jännityksiä,
- aiheuttaa väsymismurtumia ja
- huonontaa energiatehokkuutta.

Värähtelyä voidaan kuitenkin käyttää myös hyödyksi esimerkiksi seuloissa, tiivistimissä ja kuljettimissa [3, s. 40].

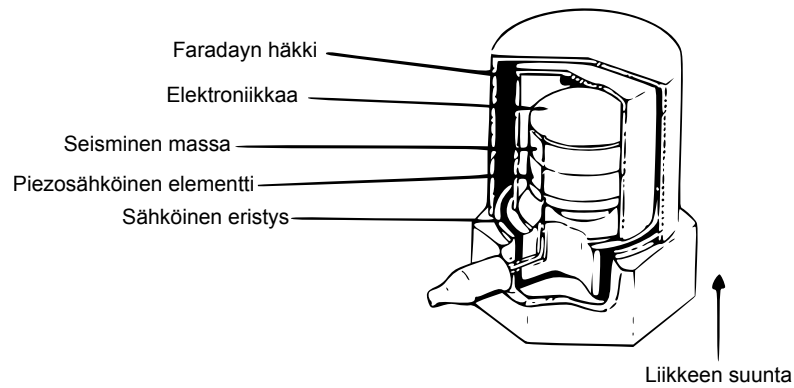
## 2.2 Kiihtyvyyssanturin perusteet

Värähtelyä voidaan kuvata useamman eri suureen avulla. Yleisimmin värähtely esitetään nopeutena tai kiihtyvyytenä, mutta myös siirtymää eli poikkeamaa käytetään varsinkin hyvin hitaasti pyörivien laitteiden kanssa. Kustakin suureesta voidaan saada toinen derivoimalla tai integroimalla sitä [2, s. 12]. Lisäksi kullekin suureelle löytyy omanlaiset anturit, jotka poikkeavat rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan selvästi toisistaan. Tässä käydään vain läpi nykyisin yleisimmin käytetty kiihtyvyyssanturi. Muista antureista perustietoa löytyy [2, s. 8].

Kiihtyvyyssanturin toiminnan kannalta keskeinen komponentti on piezo- eli painesähköinen kide. Kide on sijoitettu anturin sisälle ja siihen on kiinnitetty seisminen massa, joka puristaa kidettä kasaan tai venyttää sitä riippuen värähtelyn suunnasta. Tällöin kiteen vastakkaisten pintojen välille syntyy sähköinen jännite, joka voidaan mitata. Kyseinen jännite on suoraan verrannollinen kiihtyvyyteen. Katso kuva (2.2).



**Kuva 2.1:** Esimerkki kuuden vapausasteen värähtelijästä.



**Kuva 2.2:** Esimerkki yhteen suuntaa mittaavasta kiihtyvyyssanturin rakenteesta. Muokattu Acu-Vib Electronicsin kuvan perusteella [4].

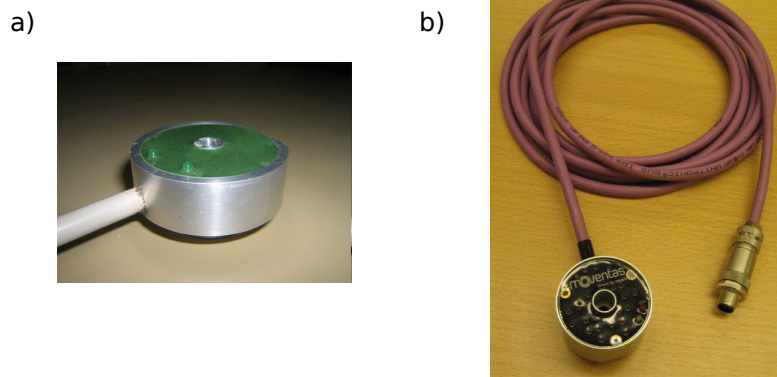
Verrattuna muihin antureihin, kiihtyvyyssanturilla on kaikista laajin taajuusvaste yltäen jopa 20 kHz! Hyvän mittaussignaalin saamiseksi anturin kiinnityksen sekä kiinnityskohdan täytyy olla tarkkaan mietitty. Kiihtyvyyssanturien hyviin puoliin voidaan myös lukea niiden pienen koon ja keveyden sekä edullisuuden. Toisaalta ne ovat alttiita sähköstaattisille häiriöille, vaativat tietyn asettumisajan eikä niillä ole kovin hyvää signaali/kohinasuhdetta [2, s. 9].

Nykyisissä kiihtyvyyssantureissa käytettävät piezosähköiset kiteet ovat hyvin ohuita kalvoja. Tyypillisesti kiteiden paksuus voi olla alle yhden mikrometrin [5, s. 3]. Näitä useampaa apuna käyttäen saadaan mitattua värähtely pysty-, vaaka- ja syvyysuunnassa. Kuitenkin kiteiden ominaisuuksista riippuen niillä voidaan mitata hyvällä resoluutiolla rajallista aluetta. Tämän takia moderneissa antureissa on tapana käyttää esimerkiksi yhtä kiteitä matalien taajuuksien mittaamiseen ja toista korkeampien taajuuksien mittaamiseen. Tärkeänä ominaisuutena nykyaikaisilla antureilla on myös hoitaa muitakin tehtäviä kuin pelkästään mitata kiihtyvyyssignaalia. Anturit voivat laskea itse esimerkiksi värähtelyspektrin ja hoitaa kiihtyvyyssignaalin integroinnin nopeudeksi. Näin säästetään käyttäjäpäässä tarvittavaa laskentatehoa, kun mittaavien värähtelyanturien määrä on suuri. Kuvassa (2.3) on nähtävillä Moventaksen omat kiihtyvyyssanturit.

## 2.3 Signaalinkäsittelyn perusteet

### 2.3.1 Anturilta vaadittavat ominaisuudet

Aikaisemmin mainittiin muun muassa, että anturin paikan ja kiinnitystavan pitää olla hyvin valitut jotta anturi pystyy tuottamaan hyvää värähtelysignaalia. Sen lisäksi anturin ominaisuuksiin liittyy monia muitakin vaatimuksia, jotka täytyy valita oikein jotta



**Kuva 2.3:** Esimerkit Moventaksen käyttämistä kiihtyvyyssantureista. Kuvassa (a) VIB-100 anturi ja kuvassa (b) IVS-20 anturi kaapeleineen ja liittimineen.

mitattavasta kohteesta saadaan hyvää mittaustietoa. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa

- oikeantyyppinen värähtelyanturi (siirtymä-, nopeus- tai kiihtyvyyssanturi)
- hyvä signaali/kohinasuhde
- anturin herkkyys .

Hitaasti pyörivien laitteiden tapauksessa siirtymäanturi saattaisi olla paras vaihtoehto, kun taas nopeasti pyörivien, hammasrattaita sisältävien koneiden kanssa kiihtyvyyssanturi on lähes poikkeuksetta paras valinta värähtelyanturiksi. Signaali/kohinasuhteella tarkoitetaan lyhykäisyydessään sitä, miten suuria kokoluokkaeroja eritaajuisten värähtelyjen amplitudeissa pystytään havaitsemaan anturilla. Vastaavasti anturin herkkyys tulee valita oikein, kun mitataan hyvin heikosti tai vahvasti värähteleviä koneita. Anturi ei pysty tuottamaan hyvää värähtelysignaalia, jos liian suurella herkkyydellä varustettu anturi mittaa hyvin voimakasta värähtelyä ja päinvastoin. Tarkempaa tietoa näistä ominaisuuksista löytyy [2, s. 13-14].

### 2.3.2 Signaalin esikäsittely

Äsken mainittujen anturin ominaisuuksien lisäksi anturille voidaan antaa monia erilaisia mittaussignaleja, jotka täytyy valita oikein jotta anturilta saadaan hyödyllistä mittaussignaalia. Näitä parametrejä ovat muun muassa

- laskostusten suodatus
- näytepituus

- näytteenottotaajuus
- analogi/digitaali-muunnoksen bittien määrä
- mitatun signaalin muutos toisesta värähtelysuureesta toiseksi .

Laskostusten suodatuksella tarkoitetaan hyvin suurien taajuuksien poistamista mittasignaalista. Muussa tapauksessa nämä suuret taajuudet vääristäisivät lopullista mittaustulosta. Näytepituudella käsitetään, miten monella näytepisteellä haluttu värähtelyn aikataso mitataan. Hyvän signaalin saamiseksi täytyy näytteenottotaajuus täytyy olla vähintään kaksi kertaa niin suuri kuin suurin mitattava taajuus [6, s. 109]. Analogi/digitaali-muunnoksessa analogisignaali muutetaan digitaaliseen muotoon ja tässä muunnosbittien lukumäärä määrää, kuinka tarkka tehty muunnos on. Lisäksi mitattua signaalia voidaan integroida tai derivoida toiseksi värähtelysuureiksi jo anturin päässä. Tarkempaa tietoa näistä ominaisuuksista löytyy [2, s. 14-15].

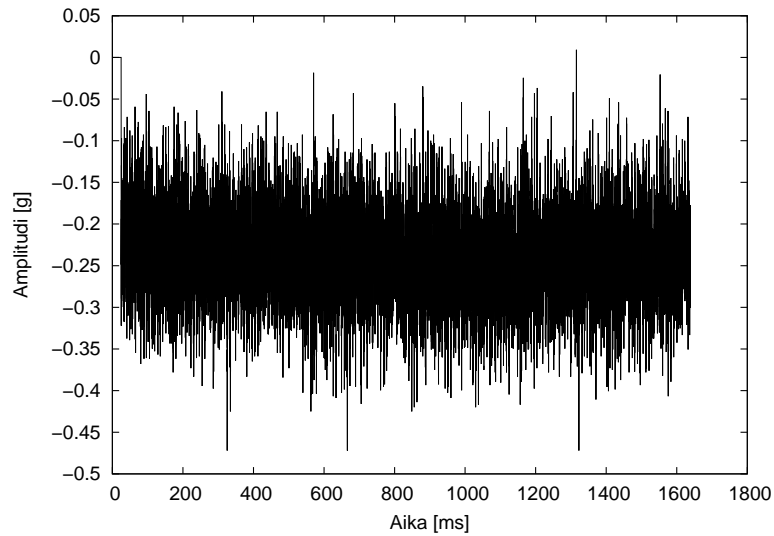
### 2.3.3 Aikatason mittaus

Aikataso on se mittatieto, joka saadaan suoraan anturilta esikäsitteilyn jälkeen. Se kuvaa, miten pinta johon anturi on kiinnitetty käyttäytyy fyysisesti. Aikatasomittausta voidaan käyttää apuna tietyissä kunnonvalvonnassa tehtävissä diagnooseissa, kuten hammaspyörien yksittäisten hampaiden ryntökosketusten mittaamisessa [3, s. 68]. Aikatason pituuteen vaikuttavat näytepisteiden määrä sekä ylärajataajuus: mitä enemmän näytepisteitä on, sitä pitempi aikataso on ja vastaavasti mitä suurempi ylärajataajuus on sitä lyhyempi näyte on ajallisesti. Aikatason pituudella on merkitystä, kun käytettävän muistin määrä on rajallinen tai mitattava kohde ei pyöri tasaisella nopeudella. Kuvassa (2.4) esimerkki z-suunnassa mitatusta aikatasosignaalista.

### 2.3.4 Värähtelyspektrin muodostus

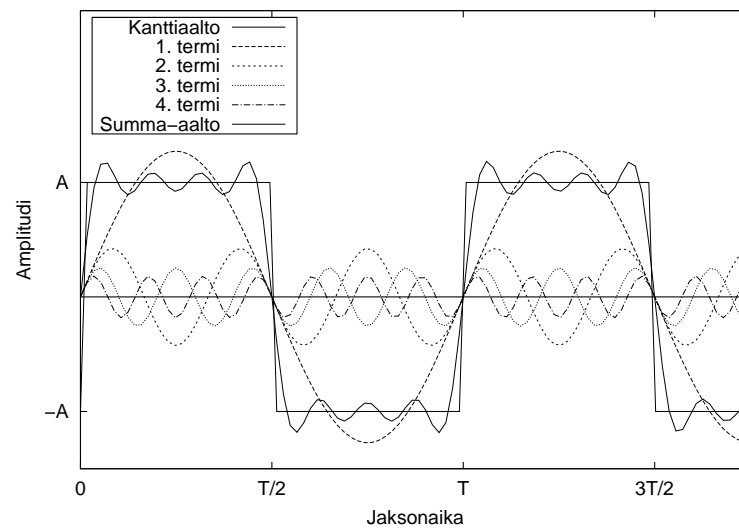
Värähtelyspektrin muodostus perustuu Fourier-sarjojen käyttöön. Näillä sarjoilla voidaan esittää mikä tahansa signaali harmonisten siniaaltojen summana. Esimerkiksi suorakaideaallon Fourier-sarja voidaan kirjoittaa seuraanlaisena summana

$$F(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2\pi fnt), n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.1)$$

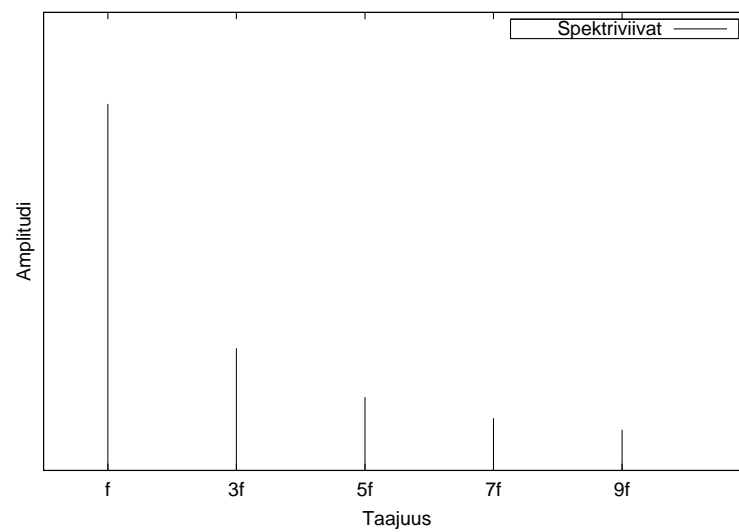


**Kuva 2.4:** Esimerkki aikatason signaalista. Kyseinen signaali on mitattu vaihteen aksiaali- eli z-suunnassa, mikä selittää ettei signaalin keskimääräinen taso ole noin yhtä g:tä, kuten x- tai y-suunnassa olisi.

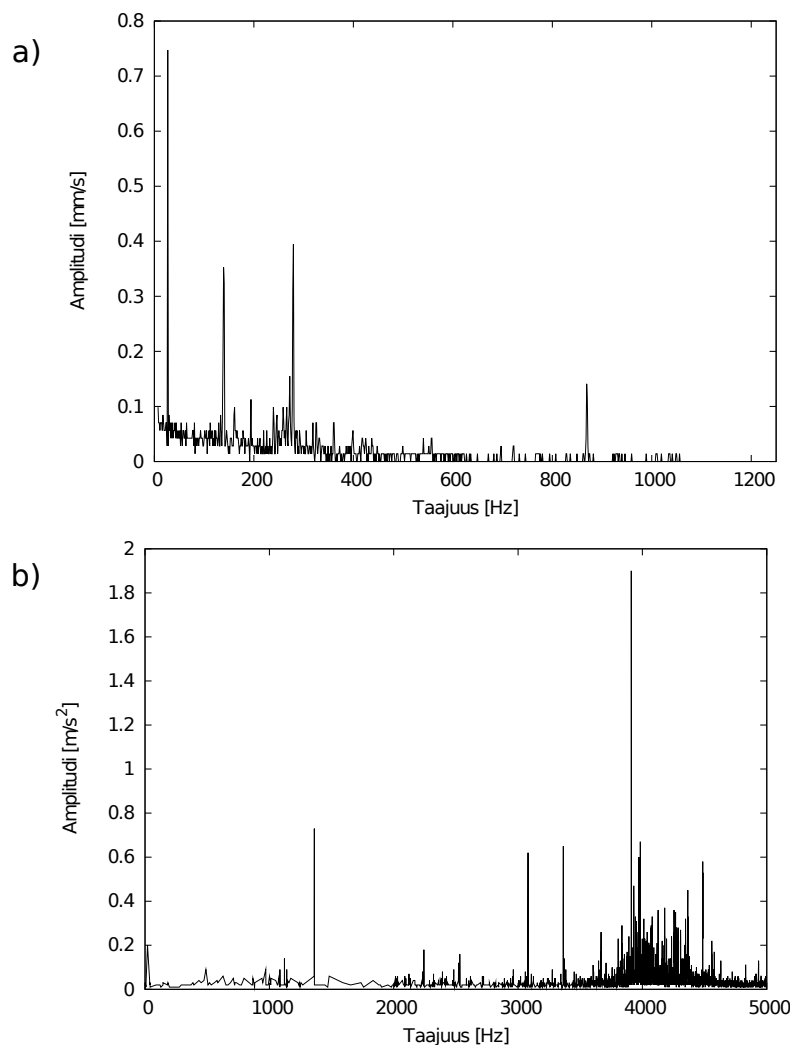
Kuvassa (2.5) on esitetty sarjan neljä ensimmäistä termiä ja näiden summa-aalto sekä itse suorakaideaalto. Kuvasta nähdään, että summa-aalto on jo melko lähellä itse alkuperäistä kanttiaaltoa. Lisätermejä summaamalla saataisiin summa-aalto yhä vain lähemmäs alkuperäistä kanttiaaltoa. Kuvassa (2.6) nähdään Fourier-sarjasta saatava spektri.



**Kuva 2.5:** Suorakaideaallon esittäminen Fourier-sarjan avulla. Kuvaajaan piirretty sarjan neljä ensimmäistä termiä ja niiden summa-aalto.



**Kuva 2.6:** Suorakaideaallon Fourier-muunnos eli spektri.



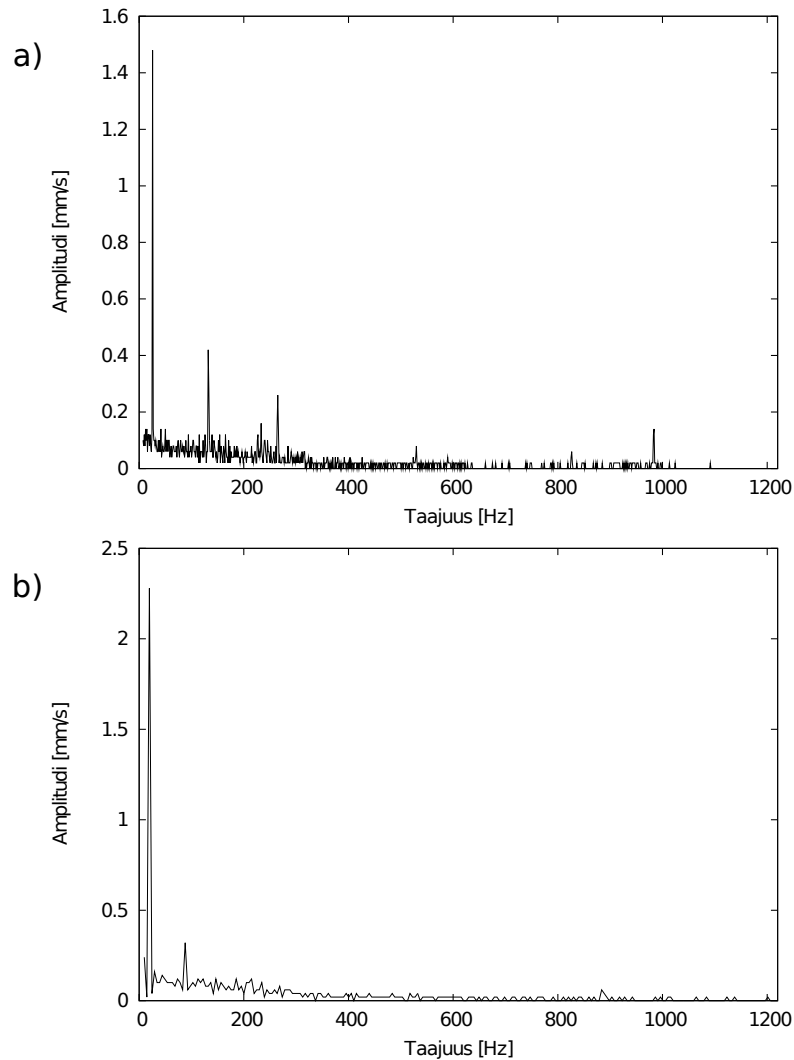
**Kuva 2.7:** Esimerkkejä erityyppisistä värähtelyspektreistä. Ylemmässä kuvassa nopeusspektri ja alemmassa kiihtyvyysspektri.

Vastaavasti värähtelyanturilla mitatusta aikataso-signaalista saadaan tehtyä Fourier-muunnos. Muunnos tehdään nopealla Fourier-muunnoksella eli FFT:llä (Fast Fourier Transformation) [6, 7]. Kuvassa (2.7) löytyy esimerkkejä Fourier-muunnoksella saatavista erityyppisistä spektreistä.

Värähtelyspektriin liittyen on tärkeää tietää, kuinka hyvä spektrin taajuuserotuskyky on. Erotuskyky liittyy siihen, kuinka lähellä toisiaan olevat taajuudet pystytään erottamaan toisistaan. Spektrin spektriviivojen lukumäärä sekä ylärajataajuus määräävät spektrin erotuskyvyn. Kuvassa (2.8) esimerkki värähtelyspektrin erotuskyvyn tärkeydestä.

Muita värähtelyspektrien laskentaan liittyviä ominaisuuksia ovat keskiarvoistustapa, aikataason painotus sekä liipaisu [3, s. 71-73]. Näistä aikataason painotuksella on eniten merkitystä normaaleissa yksittäisissä värähtelymittauksissa. Muut ominaisuudet liittyvät yksityiskohtaisempiin värähtelymittauksiin.



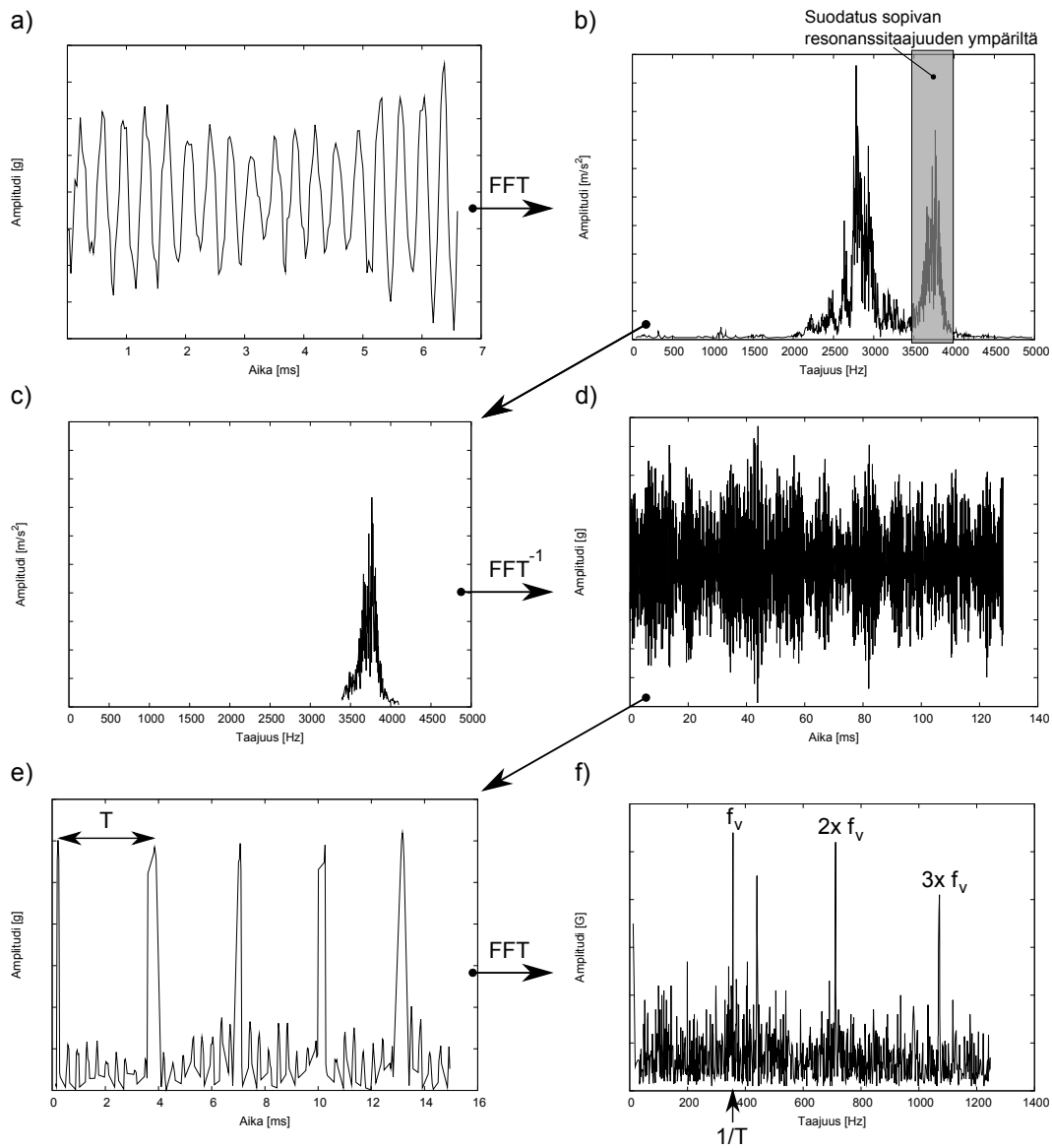


**Kuva 2.8:** Ylemmän spektrin erotuskyky on hyvä ja signaali on hyvin yksityiskohtainen, kun taas alemmassa monien taajuuksien amplitudit ovat summautuneet ja yksityiskohdat hävinneet.

### 2.3.5 Verhokäyräspektrin muodostus

Envelope- eli verhokäyräspektriä käytetään apuna erityisesti alkavia vierintälaakerivaurioita metsästettäessä. Näissä tilanteissa alkavan vaurion aiheuttaman värähtely on niin pientä, että se helposti hukkuu koneen muun värähtelyn sekaan ja siksi sitä on vaikeaa havaita värähtelyspektreillä tai värähtelyn kokonaistason seuraamisella [3, 7]. Alkava vaurio näkyy verhokäyräspektrissä samalla tavalla kuin normaalissa värähtelyspektrissä. Katso kuva (2.9). Kuvassa (b) tehty resonanssitaajuusalueen valinta tehdään aina siten, että esimerkiksi alkavan laakerivaurion tapauksessa alue sisältää laakerin resonanssitaajuuden. Tämän ominaistajuuden on herättänyt alkavan vaurion iskumaiset värähtelyt. Kuvaan (e) tehtävä tasasuuntaus voidaan tehdä ottamalla suodatetusta aikatasosta itseisarvo tai korottamalla se toiseen. Vastaavasti demodulaatio tehdään suodattamalla

saadusta signaalista korkeataajuinen värähtely pois.



**Kuva 2.9:** Verhokäyräspektrin muodostus. Kuvassa (a) alkuperäinen mitattu aikatasosignaali, josta ei vielä nähdä esimerkiksi alkavan laakerivaurion aiheuttamia iskuja. (b)-kuvassa aikatasosta tehty Fourier-muunnos, josta tehdään suodatus sopivan resonanssitaajuuden ympäriltä kuvaan (c). Tästä tehdään käänteinen Fourier-muunnos, jolloin saadaan suodatettu aikatasosignaali kuvaan (d). Tälle puolestaan suoritetaan tasasuuntaus ja demodulointi, jolloin vian aiheuttamat iskut ilmestyvät näkyviin aikatasoon (e). Kuvassa (f) lopullinen saatu envelope-spektri, joka saatiin tekemällä vielä viimeinen Fourier-muunnos. Spektristä nähdään korkeampia amplitudeja vian taajuuden ja sen moninkertojen kohdalla. Kuvissa (a) ja (e) ollaan signaaleja suurennettu paljon, jotta nähdään niiden yksityiskohdat.

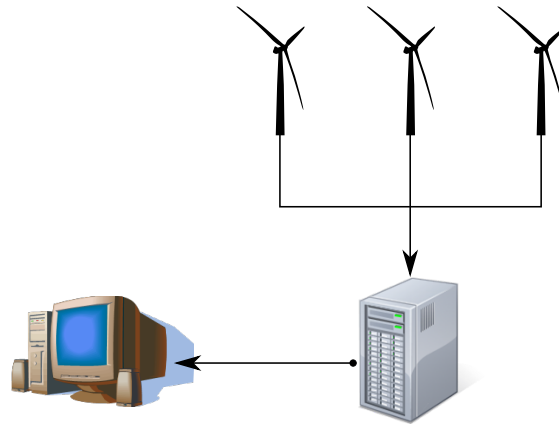
## Luku 3

# Vaihteiden kunnonvalvonta värähtelyspektrien avulla

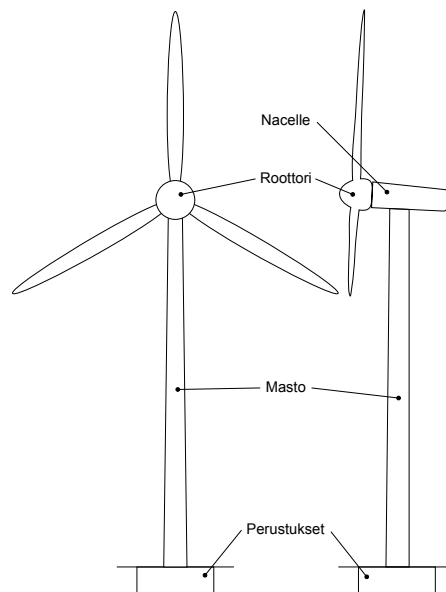
Kunnonvalvonta määritellään prosessiteollisuuden standardoimiskeskuksen mukaan seuraavasti: *kunnonvalvonta on toimintaa, jossa määritellään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan sen kehittyminen mahdollisten vikaantumis-, huolto- ja korjausajankohdan määrittämiseksi* [8, s. 22]. Hyvän kunnonvalvonnan avulla pyritään hyödyntämään koneen toimintaa parhaalla mahdollisella tavalla, jolloin sen tuottavuus pystytään pitämään korkealla. Voidaan helposti kuvitella tilanne, jossa korjaaja lähetetään koneen luo ilman että hänellä on juurikaan mitään tietoa vian aiheuttajasta. Tällöin hän ei voi tietää, mitä varaosia hän kenties tarvitsee tai mitä työkaluja hänen pitää ottaa mukaansa. Koneen huoltoseisokki on huomattavasti lyhyempi tilanteessa, jossa tiedetään jo ennakolta mikä osa on menossa rikki ja koska olisi otollisin hetki korjata tai vaihtaa se. Samalla seisokkiin voidaan suunnitella muitakin toimenpiteitä ja kaikki tarvittavat varaosat ja työkalut voidaan varata valmiiksi koneen luo.

### 3.1 Kunnonvalvontajärjestelmän arkkitehtuuri

Moventaksen kunnonvalvontajärjestelmä koostuu pääpiirteittäin kahdesta komponentista: vaihteessa kiinni olevilta antureilta mittatietoa keräävästä tietokoneyksiköstä sekä MySQL-tietokantapalvelimesta, jonne vaihteilta kerätty mittatieto tallennetaan jatkokäsitteilyä varten. Käyttäjä voi katsoa ja analysoida palvelimelle tallennettua dataa erilaisen Moventaksella kehitettyjen sovellusten avulla. Katso järjestelmää havainnollistava kuva (3.1).



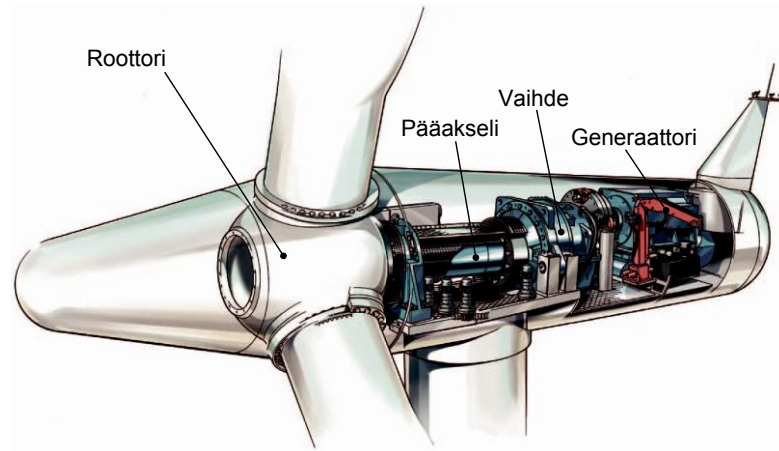
**Kuva 3.1:** Kunnonvalvontajärjestelmää kuvaava kaavio. Tuulivoimaloiden vaihteilta kerätään mittausdataa palvelimelle, josta loppupään käyttäjä pystyy sitä tutkimaan.



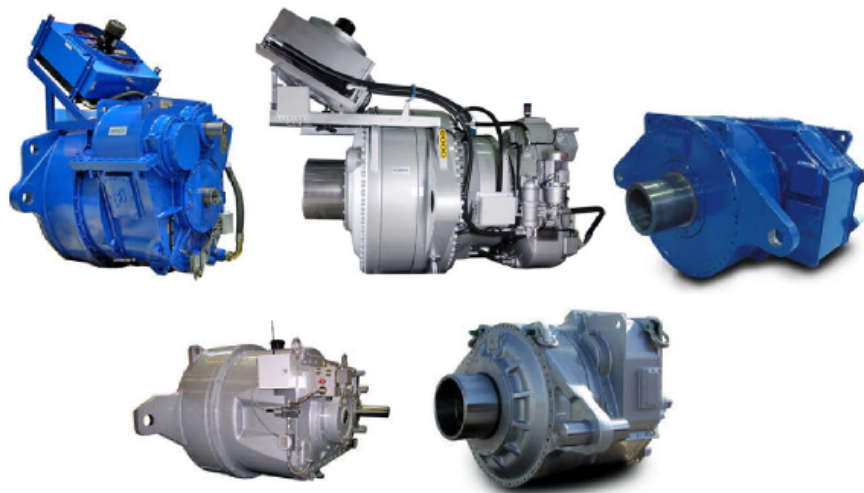
**Kuva 3.2:** Tuuliturbiinin pääosat.

## 3.2 Tuuliturbiini ja sen vaihteen rakenne

Tuuliturbiinin tarkoitus on muuttaa tuulen liike-energia sähköenergiaksi. Tuuliturbiineja on suunniteltu ja tehty monia erimallisia, mutta yleisin pääkomponentteineen on esitetty kuvassa (3.2). Maston päässä sijaitsevan nacellen sisällä löytyvät kaikkein keskeisimmät osat. Itse nacellea käännetään yhdessä roottorin kanssa tuulen suunnan mukaan. Katso kuva (3.3).



**Kuva 3.3:** Tuuliturbiinin nacelle ja sen pääosat. Kuva muokattu Siemensin kuvan perusteella [9].



**Kuva 3.4:** Esimerkkejä Moventaksen valmistamista, eri kokoisista ja mallisista tuuliturbiinivaihteista [11].

### 3.2.1 Tuuliturbiinivaihteet

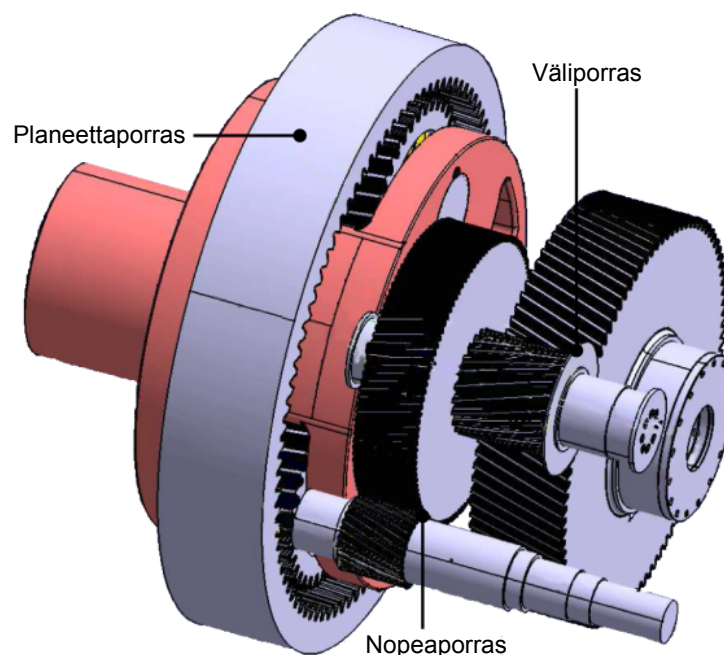
Vaihteen tehtävänä tuuliturbiinissa on muuttaa roottorin hidas pyöriminen nopeammaksi, jotta generaattori pystyy muuttamaan sen sähköksi. Roottori pyörii noin 10-20 kierrosta minuutissa ja vaihde muuttaa sen noin 100 kertaiseksi. Ylennysvaihde muuttaa samalla pyörimisen suuren momentin pieneksi. Kooltaan esimerkiksi 1,5 megawatin vaihde on noin  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ m}$  ja painaa noin 12 - 15 tonnia [10]. Katso kuva (3.4) tyypillisistä Moventaksen valmistamista vaihteista.

### 3.2.2 Vaihteen rakenne

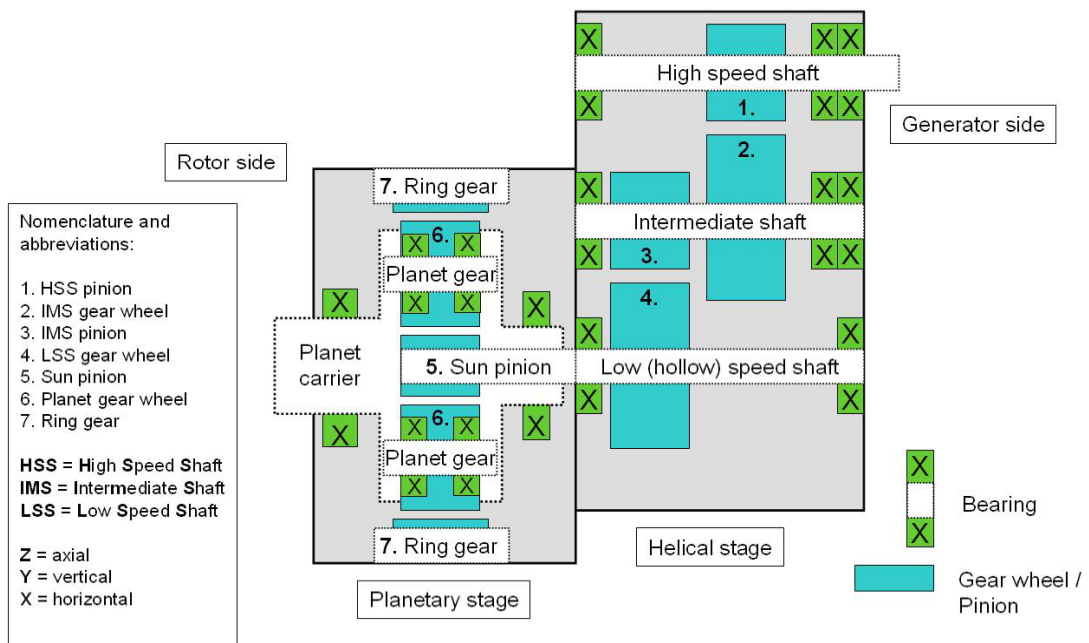
Yleisin vaihdetyyppi tuuliturbiineissa on planeettavaihte. Kyseisessä vaihdetyypissä on tyypillisesti kolme porrasta: planeetta-, väli- ja nopea porras (engl. *planet stage*, *high speed stage* ja *intermediate stage* tai lyhennettynä PS, IMS sekä HSS). Tuuliturbiinin roottori tulee pääakselin myötä kiinni vaihteen planeettaportaalle ja vaihteen nopean puolen akseli yhdistetään generaattorille. Katso kuva (3.5).

Planeettaporras koostuu kehäpyörästä, joka pysyy paikoillaan vaihteen koteloa vasten, ja sen sisällä pyörivistä planeettapyöristä. Näitä puolestaan kannattelee planeetakantaja. Keskellä kantajaa sijaitsee aurinkoakseli, jota planeettapyörät pyörittävät ja siirtävät näin pyörimisen eteenpäin väliportaalle, josta pyörintä siirtyy edelleen nopealle portaalle.

Kuvassa (3.6) nähdään vielä vaihteen rakenne ylhäältä käsin. Kuvassa näkyy hyvin, miten monta hammaspyöräkosketusta vaihteen sisällä on sekä miten paljon laakereita vaihte sisältää.



**Kuva 3.5:** Planeettavaihteen rakennekuva. Kuvaan ei ole merkitty vaihteen laakereita selkeyden vuoksi.

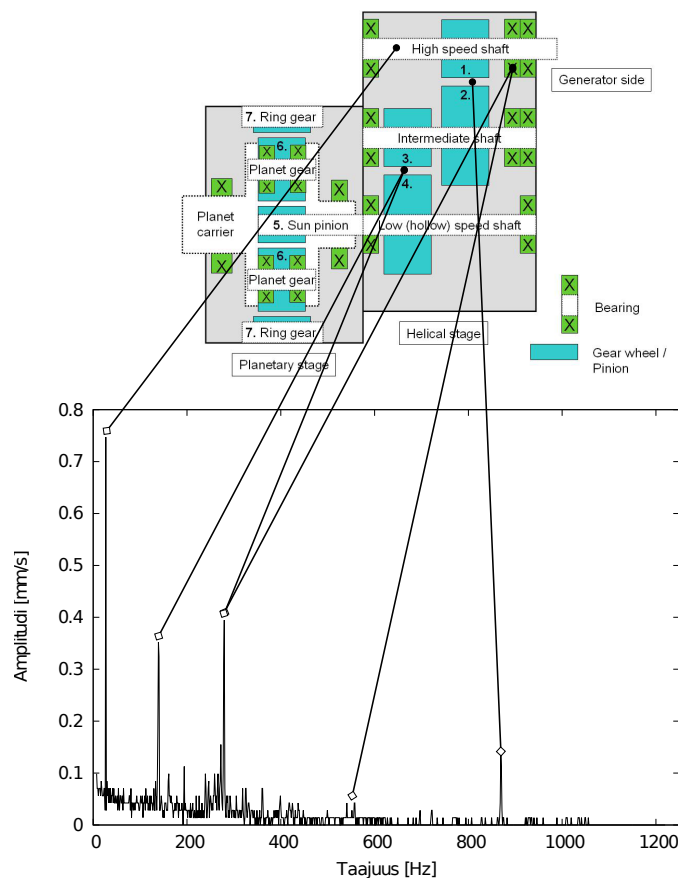


**Kuva 3.6:** Planeettavaihteen rakenne ylhäältä käsin. Kuvasta nähdään hyvin vaihteen eri hammasrattaat ja laakerit. Huomaa, että aikaisempi kuva vaihteen rakenteesta on peilikuva tästä kuvasta.

### 3.3 Diagnostiikka värähtelyspektrien perusteella

Siinä missä värähtelyvalvonnassa värähtelyn kokonaistason seuranta ja kokonaistason nousu kertovat vain, että jotain on vialla tutkittavassa kohteessa saadaan spektrivalvonnalla tietoa koneen eri osien kunnosta erikseen. Spektrivalvonta vaatii kuitenkin analysoijaltaan huomattavasti enemmän kokemusta ja koneiden sekä niiden käyttöympäristön käyttäytymisen ymmärtämistä. Kaikki spektrin piikit, eivätkä edes piikkien amplitudioiden kasvu välttämättä viittaa vikaan mitattavassa kohteessa. Sen sijaan spektrin eri taajuuksien amplitudioiden suhteiden muuttuminen saattaa kertoa viasta. Kuvassa (3.7) esitetty nopeusspektri tietyltä vaihteelta, eikä kyseisessä spektrissä näy mitään vakavaa.

Värähtelyspektrejä analysoitaessa on tärkeää tietää, mikä koneen pyörimisnopeus on ollut spektrin mittaushetkellä. Koneen useimmat värähtelytaajuudet ovat nimittäin suoraan riippuvaisia koneen pyörimisnopeudesta. Samoin olisi myös tärkeää tietää, millälaisessa kuormituksessa kone on ollut spektrin mittaushetkellä sillä monien taajuuksien



**Kuva 3.7:** Esimerkki vaihteen eri osien aiheuttamista piikeistä värähtelyspektrissä. Kuvan spektrissä ei ole nähtävissä mitään taajuuksia, jotka osoittaisivat vaihteessa olevan vika.



amplitudit ovat suoraan verrannollisia kuormitukseen [3, s. 89].

Seuraavaksi käymme läpi joitain tyypillisimpiä vikoja pyörivissä koneissa ja miten ne ideaalisessa tilanteessa näkyvät värähtelyspektrissä. Kaikkissa värähtelyspektreissä värähtelyn amplitudin yksikkönä on käytetty nopeutta  $mm/s$ .

### 3.3.1 Epätasapaino

Jokaisessa pyörivässä koneessa on valmistusepätarkkuuksien rajoissa jonkin verran epätasapainoa. Liiallisen epätasapainon tavallisimpia aiheuttajia ovat

- riittämätön tasapainotus
- epätasainen likaantuminen
- epätasainen kuluminen
- irronneet tasapainotusmassat
- jännitysten laukeaminen .

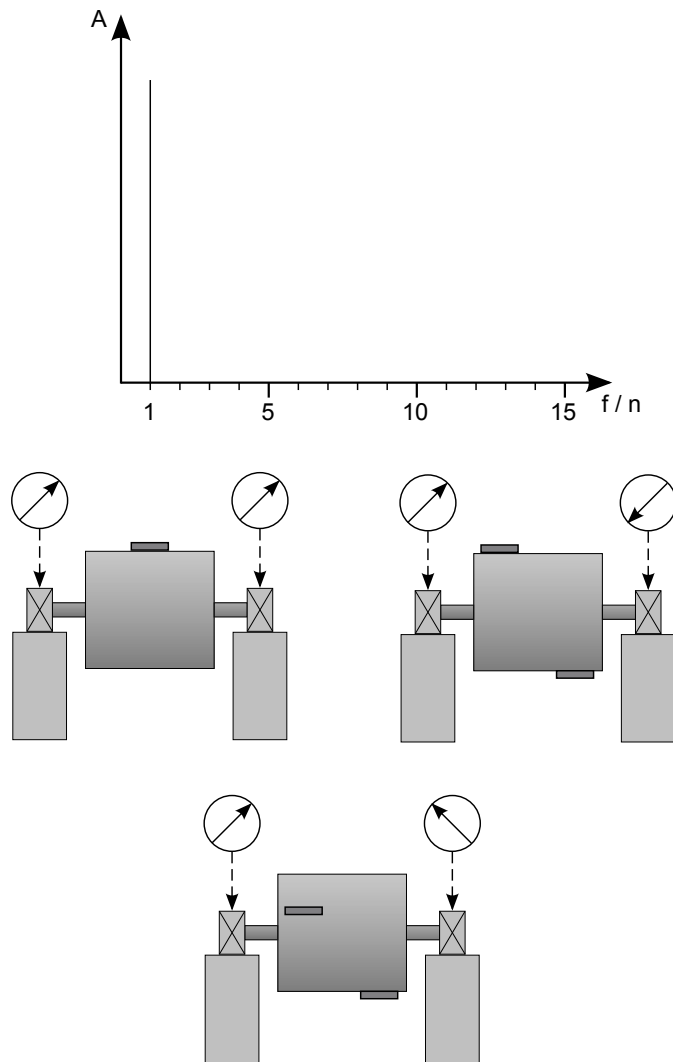
Epätasapaino voi parantuakin, sillä esimerkiksi lian poistaminen tai poistuminen voi parantaa tilannetta [12, s. 71].

Kuvassa (3.8) esitetty kolme eri epätasapainotilannetta ja niissä mitattu värähtelyspektri. Kaikissa tilanteissa värähtelyspektrin vallitsevana taajuutena on laitteen pyörimisnopeus  $n$ .

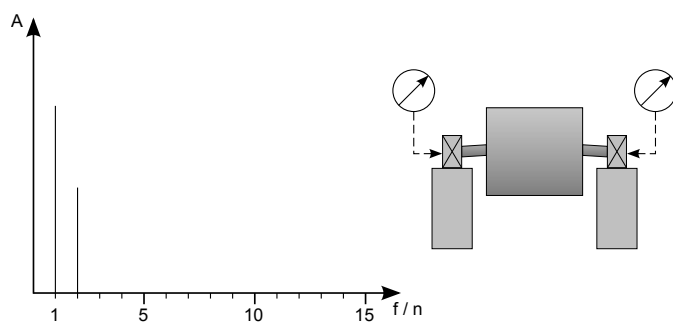
Ensimmäisen kuvan staattisessa epätasapainotilanteessa epätasapainon aiheuttaja sijaitsee yhtä kaukana akselin molemmista tukipisteistä. Dynaamisessa epätasapainossa epätasapainon aiheuttajia voidaan ajatella olevan esimerkiksi kaksi ja ne sijaitsevat akselin vastakkaisilla puolilla yhtä kaukana koneen tukipisteistä. Staattinen ja dynaaminen epätasapaino esiintyvät usein yhdessä, jolloin sitä kutsutaan yhdistelmäepätasapainoksi.

### 3.3.2 Taipunut akseli

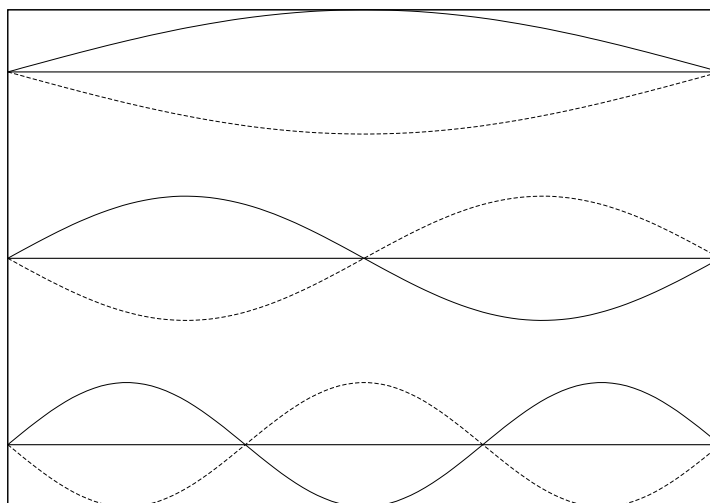
Taipunut akseli aiheuttaa värähtelyä sekä säteittäis- että akselin suunnassa. Laakereilta eri puolilta akselia akselin suunnassa mitattuna signaaleissa nähdään 180 asteen vaiheero. Värähtelyspektrissä vallitseva taajuus on akselin pyörimistaajuus  $n$ , jos akseli on taipunut keskeltä. Jos taipuma on lähellä mittauspistettä, on vallitseva taajuus pyörimistaajuuden ensimmäinen moninkerta  $2n$ . Katso kuva (3.9).



**Kuva 3.8:** Epätasapainotilanteiden värähtelyspektri. Spektrissä x-akselilla on taajuus esitettynä koneen pyörimistaajuuden kerrannaisina. Spektrin alapuolella esimerkkikuvat staattisesta, dynaamisesta ja yhdistelmäepätasapainosta. Kuviin merkitty lisäksi laakereihin sijoitettujen värähtelyanturien suhteellinen vaihe. Ensimmäisessä kuvassa vaihe-eroa anturien mittaamissa aikatasoissa ei ole, toisessa niiden välillä on 180 asteen vaihe-ero ja viimeisessä vaihe-ero on noin 90 astetta riippuen epätasapainon aiheuttavien massojen sijainnista toisiinsa nähden.



**Kuva 3.9:** Värähtelyspektri taipuneen akselin tapauksessa.



**Kuva 3.10:** Kielen eri ominaisvärähtelymoodeja poikittaissuunnassa.

### 3.3.3 Resonanssi

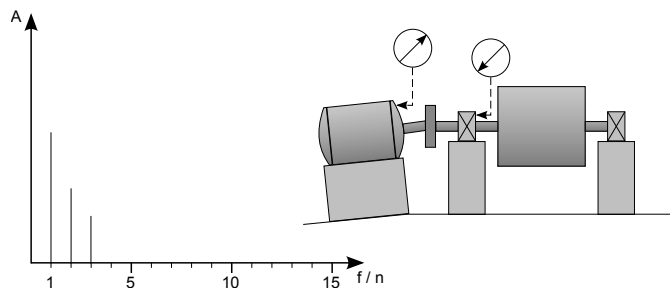
Resonanssia ilmenee, kun esimerkiksi koneen pyörimistaajuus on lähellä koneen jonkin osan ominaistajuutta jolloin kyseisen osan värähtely rupeaa kasvamaan voimakkaasti [2, s. 7]. Hyvä esimerkki rakenteiden ominaistajuuksista on akselin värähteleminen pitkittäissuunnassa kuten kitaran kieli. Katso kuva (3.10). Akseli voi myös värähdellä kiertymällä oman akselinsa ympäri, kuten kiertoheiluri tekee. Resonanssin takia konetta suunniteltaessa on hyvin tärkeää tutkia koneen eri osien ominaistajuudet tarkasti ja tarkastaa ettei mikään niistä ole sama kuin koneen pyörimistaajuus normaalissa tilassaan.

### 3.3.4 Akselin linjausvirhe

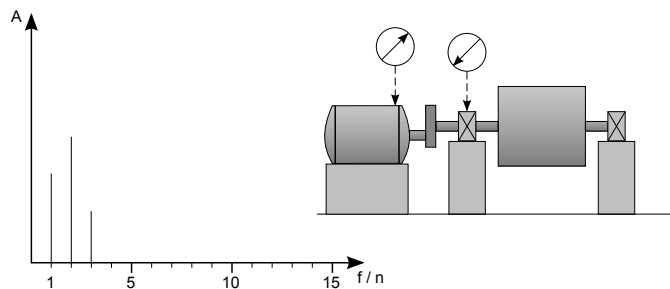
Linjausvirhe on toiseksi yleisin värähtelyn aiheuttaja pyörivissä koneissa [13]. Syynä linjausvirheeseen on yleensä joko asennusvirhe tai lämpöliikkeet. Linjausvirhe ei yleensä huonone ajan saatossa, mutta se saattaa aiheuttaa muita vikoja. Linjausvirheen ollessa vakava saatetaan värähtelyspektrissä nähdä voimakasta värähtelyä pyörimistaajuuden moninkerroilla. Toisin kuin mekaanisen välyksen tapauksessa linjausvirheessä värähtelyspektrin kohinataso ei nouse.

Linjausvirhe voi olla kulma- tai säteislinjausvirhe tai näiden molempien yhdistelmä. Linjausvirheet aiheuttavat muun muassa melua, koneen komponenttien kuten laakereiden eliniän vähenemistä sekä lisääntynyttä energiankulutusta.

Kulmalinjausvirhe aiheuttaa värähtelyä pääasiassa akselin suunnassa. Vaihe-ero kytkennän eri puolilta mitattuna on 180 astetta. Katso kuva (3.11).



**Kuva 3.11:** Värähtelyspektri kulmalinjausvirheen tapauksessa.



**Kuva 3.12:** Värähtelyspektri säteislinjausvirheen tapauksessa.

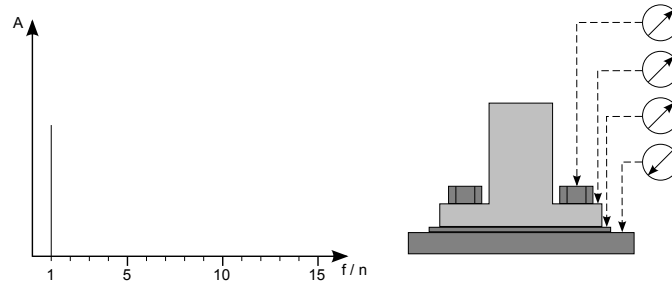
Sen sijaan säteislinjausvirheessä värähtelyä syntyy säteissuunnassa. Samoin kuten kulmalinjausvirheessä vaihe-ero kytkennän eri puolilta mitattuna on 180 astetta. Katso kuva (3.12).

Erona näissä kahdessa tapauksessa on se, että säteislinjausvirheessä pyörimistäajuuden amplitudi on pienempi kuin sen ensimmäisen moninkerran amplitudi.

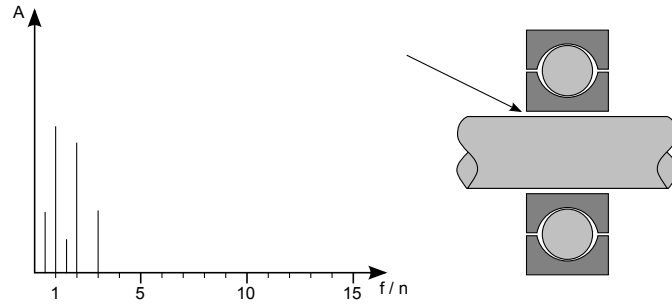
### 3.3.5 Mekaaninen väljys

Mekaaninen väljyys voi aiheuttaa myös epälineaarista värähtelyä suhteessa koneessa esiintyviin dynaamisiin voimiin. Mekaanisen väljyyden oireet heräävät jo suhteellisen pienien pakkovoimien vaikutuksesta. Kuvassa (3.13) nähdään, miten löysä kiinnitys aiheuttaa värähtelyä koneen tai sen osan pyörimistäajudella  $n$ . Syynä voi olla esimerkiksi löysät kiinnityspultit ja tukirakenteissa tai laakerituissa olevat halkeamat [7]. Vertaamalla eri paikoista mitattuja amplitudi- ja vaihe-eroja voidaan väljyyden paikka löytää.

Väljyys aiheuttaa usein värähtelyspektriin aliharmonisia komponentteja ja niiden moninkertoja. Tämä johtuu usein eri osien huonosta sovituksesta, kuten liiallisesta väljydestä liuku- tai vierintälaakerissa. Katso kuva (3.14). Värähtelyjen amplitudit ja vaihe-erot saattavat vaihdella hyvin paljon varsinkin eri kierrosnopeuksilla ja käynnistyskerroilla.



**Kuva 3.13:** Värähtelyspektri koneen tai sen osan löysän kiinnityksen tapauksessa.



**Kuva 3.14:** Värähtelyspektri huonon sovituksen tapauksessa. Huono sovitus voi olla esimerkiksi liiallinen välys vierintälaakerissa. Huomaa, että värähtelyspektriin voi ilmaantua pyörimistäajuuden aliharmonisia komponentteja ja niiden moninkertoja.

### 3.3.6 Vierintälaakeriviat

Kuvassa (3.15) nähdään tyypillisen vierintälaakerin rakenne. Laakeri koostuu neljästä komponentista: ulkokehästä, vierintäelimistä, niiden pitimestä sekä sisäkehästä. Kukin näistä osista voi vaurioitua ja tällöin niiden aiheuttamat sysäystaajuudet voidaan laskea kaavojen (3.1) - (3.4) avulla. Kaavoissa ollaan oletettu, että laakerin ulkokehä on paikoillaan ja sisäkehä pyörii yhdessä akselin kanssa taajuudella  $f_R$ .

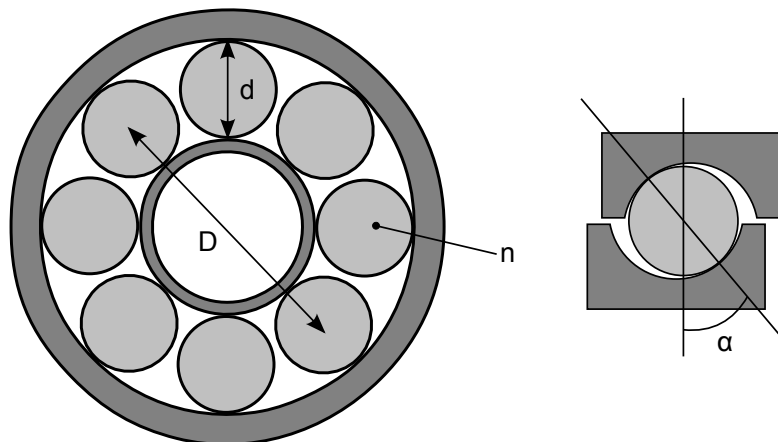
Vierintäelimien ylittäessä ulkokehään syntyneen särön syntyy iskumaista värähtelyä taajuudella

$$f_u = \text{BPFO} = \frac{n}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_R . \quad (3.1)$$

Yhtälössä  $n$  on vierintäelimien lukumäärä,  $d$  niiden halkaisija,  $D$  laakerin halkaisija ja  $\alpha$  vierintäelimen kosketuskulma.

Vastaavalla tavalla myös sisäkehän vauriosta syntyy iskumaista värähtelyä taajuudella

$$f_u = \text{BPFI} = \frac{n}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_R . \quad (3.2)$$



**Kuva 3.15:** Vierinlaakerin rakenne. Vasemmassa kuvassa nähtävissä laakerin ulkokehä, vierintäelimet, joita on  $n$ -kappaletta ja joiden halkaisija on  $d$ . Sisimpänä laakerin sisäkehä. Laakerin halkaisija lasketaan kahden vastakkaisen vierintäelimen keskipisteiden välisenä etäisyytenä  $D$ . Oikeanpuoleisessa, laakerin kourun poikkileikkauksen, kuvassa nähdään, miten laakerin kosketuskulma  $\alpha$  määritellään.

Vierintäelimen vaurioituessa iskumainen värähtely ilmenee taajuudella

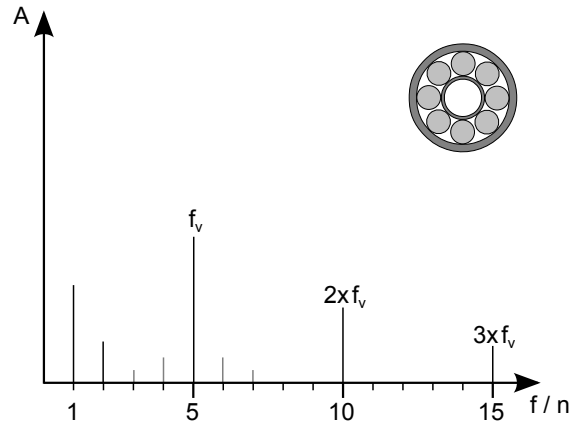
$$f_e = \text{BSF} = \frac{D}{2d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] f_R . \quad (3.3)$$

Vierintäelimen pitimeen tullessa vaurio ilmenee se taajuudella

$$f_p = \text{FTF} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_R . \quad (3.4)$$

Kuten kappaleen (3.2.2) kuvassa (3.6) nähdään, on yhdessä vaihteessa hyvin monta laakeria. Näistä laakereista harvoin mikään on samanlainen, joten jokaisen laakerin kaikki neljä ohitustaajuutta täytyy tietää, jotta värähtelyspektrianalyysi voidaan tehdä luotettavasti. Yleensä laakerivalmistajat ilmoittavat nämä taajuudet.

Vierintälaakerivaurion eteneminen tiedetään nykyään jo hyvin. Aivan vaurion alkuvaiheessa laakeri alkaa ”soida” korkealla taajuudella. Vaurion edetessä spektriin ilmestyy seuraavaksi piikkejä laakerin ominaistajuudella ja sen ympärille sivunauhoja akselin pyörimisnopeudella  $n$ . Kolmannessa vaiheessa itse vian ohitustaajuus  $f_v$  ja sen ensimmäinen moninkerta nähdään spektrissä. Perinteisellä spektrivalvonnalla laakerin vaurio havaitaan tässä vaiheessa. Seuraavassa vaiheessa laakerin vikataajuuden ympärille ilmaantuu sivunauhoja akselin pyörimistaajuudella  $n$ . Jos vikaa ei olla vielä huomattu, nousee spektrissä seuraavaksi akselin pyörimistaajuuden ja sen moninkertojen amplitudit ja lopulta värähtelyn taustatasot laajalti koko spektrissä. Kuvassa (3.16) ollaan kuvattu kolmannen ja neljännen vaiheen nopeusspektri.



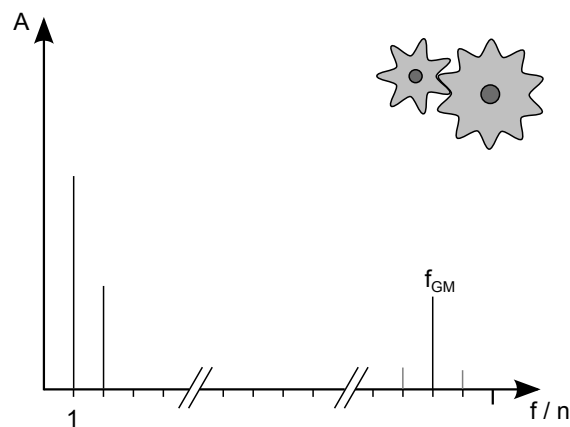
**Kuva 3.16:** Vierintälaakerin vian näkyminen värähtelyspektrissä. Vikataajuus  $f_v$  näkyy harmonisine moninkertoineen ja niiden ympärille voi ilmaantua sivunauhoja akselin pyörimistäajuuden  $n$  välein. Sivunauhat merkitty kuvaan harmailla viivoilla.

### 3.3.7 Hammasvälitysten viat

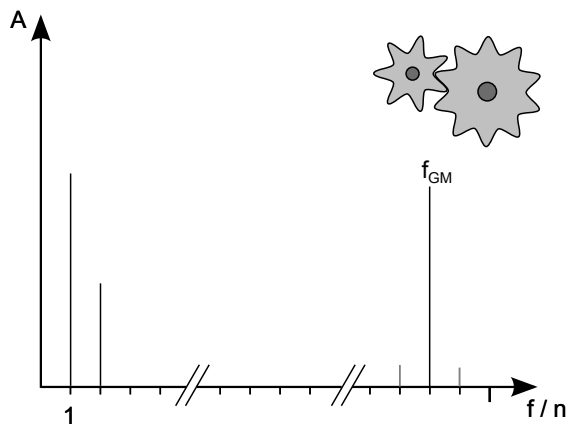
Siinä missä aikaisemminkin mainittujen vikojen ja vaurioiden tapauksessa on tärkeää muistaa, että koneen kuormalla on suuri merkitys amplitudien suuruuteen. Tämä korostuu hammaspyörien vikatapauksissa.

Lievemmissä tapauksissa hammaspyörien hampaat kuluvat pinnaltaan hiukan, mutta äärimmäisissä tapauksissa kulutus voi johtaa hammaspyörän hampaan murtumiseen, useampien hampaiden murtumiseen ja lopulta koko hammaspyörän lohkeamiseen.

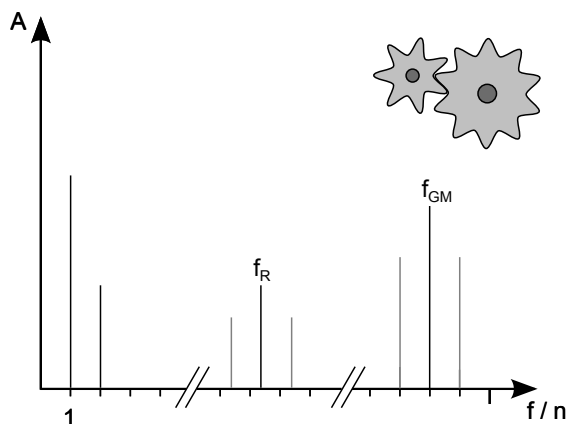
Normaalissa toiminnassa koneen spektrissä on näkyvissä sekä rattaan pyörimisnopeus  $n$  ja mahdollisesti sen moninkertoja sekä hammaspyörän ryntötaajuus  $f_{GM}$ . Katso kuva (3.17).



**Kuva 3.17:** Hammaspyörän värähtelyspektri koneen normaalissa toiminnassa. Spektrissä on nähtävissä hammaspyörän ryntötaajuus  $f_{GM}$  sekä sen ympärillä mahdollisesti sivunauhat akselin pyörimistäajuuden  $n$  välein. Ryntötaajudella tarkoitetaan taajuutta, jolla hammaspyörän hampaat iskevät toisen hammaspyörän hampaisiin.



**Kuva 3.18:** Hammaspyörän värähtelyspektri ylikuormitustilanteessa. Spektrissä nähtävissä ryntötaajuuden amplitudin nousu, mutta myös sen moninkerrat taajuuksilla saattaa amplitudit kasvaa.



**Kuva 3.19:** Hammaspyörän värähtelyspektri kuluneiden hampaiden tapauksessa. Spektrissä nähtävissä hammaspyörän ryntötaajuuden  $f_{GM}$  ja sen ympärillä olevien sivunauhojen amplitudien kasvua. Lisäksi lisääntynyt hammaspyörän värähtely voi herättää toisiohammaspyörän tai koneen muiden osien resonansseja taajuudella  $f_R$  ja myös näillä voi esiintyä sivunauhoja akselin pyörimistaajuuden välein.

Mikäli konetta ajetaan ylikuormalla, näkyy se hammaspyörän ryntötaajuuksien amplitudeissa kasvuna. Lisäksi ryntötaajuuden moninkerrat saattavat herätä. Katso kuva (3.18)

Koneen normaalin käytön aikana hammaspyörät kuluvat. Kulumisen kasvaessa saattaa hammaspyörän ryntötaajuus nousta sivunauhoineen ja lisäksi lisääntynyt ryntötaajuus voi herättää toisiohammaspyörän tai koneen muiden osien ominaistajuuksia. Lisäksi näillä voi esiintyä sivunauhoja akselin pyörimistaajudella. Katso kuva (3.19).

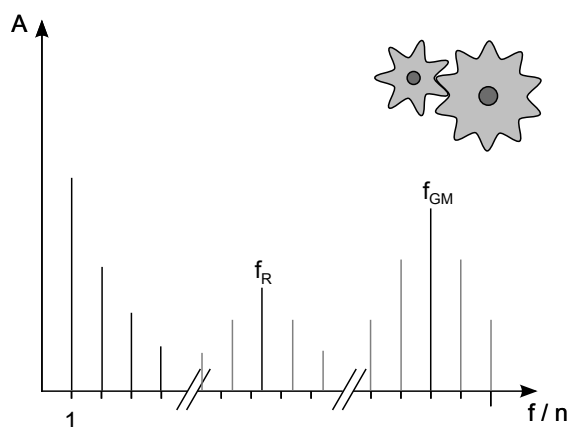
Kun hammaspyörään tulee vika, ilmenee se värähtelyspektrissä hyvin voimakkaina sivunauhoina ryntötaajuuden ja sen takia heränneiden resonanssitaajuuksien ympärillä. Katso kuva (3.20). Hammaspyörien vikoja ovat muun muassa niiden epäkeskisyydet, virheellinen hammasvälitys ja hammaspyörän akselien linjauksivirheet. Hammaspyörän linjauksivirheellä tarkoitetaan, ettei hammaspyörän kuvitteellinen akseli ole yhdensuuntainen sen



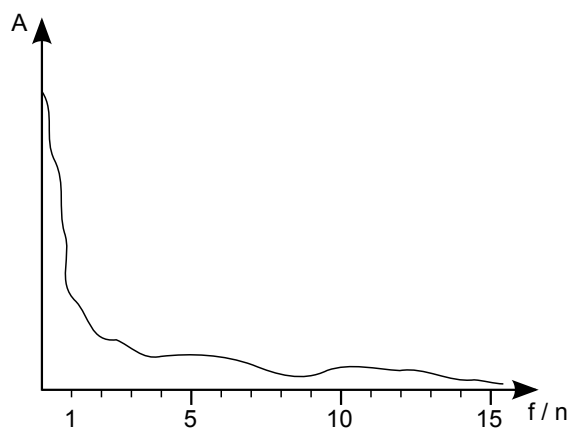
akselin kanssa johon hammaspyörä on kiinnitetty. Linjausvirheen tapauksessa spektrissä näkyvät sivunauhat voivat ilmaantua myös pelkästään akselin pyörimistäajuuden ensimmäisen moninkerran  $2n$  välein.

### 3.3.8 Vikaantuneen värähtelyanturin spektri

Rikkiäisen anturin tapauksessa nähdään tyypillinen värähtelyspektri, jossa värähtely on hyvin korkeaa spektrin alkupäässä ja laskee sitten tasaisesti spektrin loppupäätä kohden. Katso kuva (3.21). Kyseisen spektrin syynä voi olla myös se, että anturi on hyvin suuren värähtelyn alaisena.



**Kuva 3.20:** Värähtelyspektri hammaspyörän vian tapauksessa. Spektrissä nähtävissä hyvin voimakkaita sivunauhoja akselin pyörimistäajuuden  $n$  välein sekä hammaspyörän ryntötaajuuden  $f_{GM}$  että ryntötaajuuden herättämien ominaistuuksien  $f_R$  ympärillä.



**Kuva 3.21:** Vikaantuneen värähtelyanturin antama värähtelyspektri. Kyseisessä tilanteessa värähtelyanturi voi olla rikki tai se voi kokea hyvin voimakasta värähtelyä.



## Luku 4

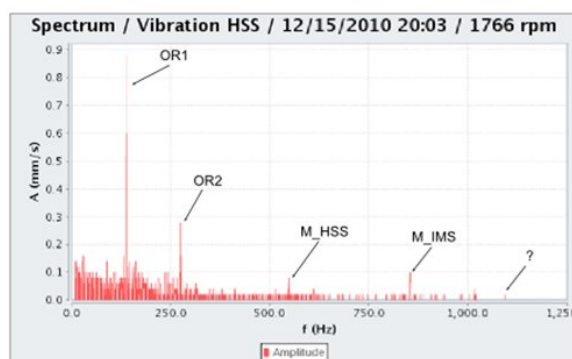
# Värähtelyspektrin analysoinnin automatisointi

Aikaisemmin värähtelyspektrien analysointi hoidettiin CMaS-käyttöliittymän kautta. Kyseisellä selainpohjaisella käyttöliittymällä voidaan selailta tuulivoimavaihteiden tietoja kuten trendejä, aikatasoja ja spektrejä. Spektrien analysointi tehtiin käsin käyttäen apuna Excel-pohjaista taajuuskarttaa, joka laski aina eri kierrosnopeuksille vaihdetyypin eri taajuudet. Tällä tavalla tehtävä analysointi oli hidasta ja vaivalloista. Avuksi kehitettiin spektrianalysointiohjelma, jotta spektrien selaaminen ja analysointi olisi helpompaa. Kehitettyssä ohjelmassa oli muun muassa spektrien hakuehdot kierrosnopeuden mukaan sekä työkalut, joilla pystyttiin tutkimaan löytyykö spektristä harmonisia taajuuksia tai sivunauhoja. Lisäksi ohjelma osasi tunnistaa spektristä rajoittuneessa määrin ennalta, yhdelle vaihdetyypille määriteltäviä taajuuksia. Vaikkakin uusi apu työkalu helpotti analysointia huomattavasti, oli spektrien analysointi vieläkin aikaa vievää. Tarve uusille menetelmille spektrien analysoinnin helpottamiseksi oli selvä.

### 4.1 Kehitystyön tavoitteet ja haasteet

#### 4.1.1 Asetetut tavoitteet

Tavoitteeksi kehitystyöhön asetettiin kehittää algoritmi, joka luokittelee ja tunnistaa värähtelyspektrissä näkyvät ilmiöt automaattisesti ja antaa annetuista ilmiöanalyseista luotettavuusarviot. Lisäksi asetettiin, että algoritmin täytyy luokitella spektrissä näkyvät ilmiöt tärkeysjärjestykseen ja että algoritmi nostaa esille normaalista poikkeavat

**Analysis:**

Phenomenon	Explanation (Reliability)	Frequency [Hz]	Value [mm/s]
N2234 BPFO	Starting bearing failure (70%)	130	0,2
		260	0,15
HSS mesh	normal (90%)	520	0,1
IMS mesh	normal (90%)	125	0,9
Unknown	?	1200	0,2

**Kuva 4.1:** Alkuperäinen mielikuva algoritmin tulevasta toiminnasta. Spektrin lataamisen jälkeen algoritmi tunnistaisi spektrissä näkyvät ilmiöt, merkitsisi ne spektriin näkyviin ja tekisi listauksen kaikista spektrissä näkyvistä ilmiöistä, niiden selityksistä sekä luotettavuusarvioista.

spektrit. Ilmiöiden tunnistamisessa käytettävät tiedot algoritmin täytyy hakea tietokannasta, jonne on tallennettu tietoa eri vaihdetyyppien taajuuksista, ilmiöistä, rakenteesta ja laakereista. Lisäksi asetettiin, että algoritmi täytyy sisällyttää spektrianalysointiohjelmaan. Kuvassa (4.1) on hahmoteltu ensimmäinen mielikuva ohjelman tulevasta toiminnallisuudesta.

Tavoitteeksi asetettiin myös, että algoritmin pitäisi ohjelman kanssa pystyä tunnistamaan yli 95% ilmiöistä, jotka löydetään manuaalisella analysoinnilla. Tätä varten Moventaksen Service-osaston analysoijat määrittivät kaikki tärkeimmät ja yleisimmät ilmiöt, jotka algoritmin on tunnistettava.

Yleisellä tasolla tavoitteeksi asetettiin, että työ pitää olla helposti yleistettävissä eli että algoritmi toteutetaan ensin teknologiariippumattomasti. Algoritmin toiminta voitaisiin siis ensin kuvailla sanallisesti tai lohkokaaaviolla. Lisäksi helposti yleistettävyydellä tarkoitettiin, että tietokantaan on pystyttävä lisäämään uusia vaihdetyyppejä ja näiden ilmiöitä.

Perusteluna sille, että algoritmi käyttää apunaan ulkoiselle palvelimelle tallennettua dataa, on että analysoitsijoita on paljon ja jatkossa tietokannan tietoja saatetaan päivittää useinkin. Näin välttyttäisiin koko ohjelman uudelleen asentamisesta kaikille sen käyttäjille aina vaihdetyyppien, niiden ilmiöiden tai taajuuksien päivittämisen jälkeen.

Lisäksi täytyi ottaa huomioon, että tällä hetkellä spektrin mittaushetkeltä tallennettiin spektrin analysoinnin kannalta tärkeä vaihteen pyörimisnopeus mittauksen alussa, mutta jatkossa käytettävänä saattaisi olla myös pyörimisnopeus mittauksen lopussa sekä vaihteen kuormatieto.

Erittäin tärkeää oli myös, että ohjelma ja algoritmi toimivat molemmilla Moventaksen käyttämällä värähtelyantureilla: VIB-100- ja IVS-20-antureilla. Erityisesti piti ottaa huomioon IVS-20-anturin erityispiirteet, kuten älykäs spektrinsuodatus ja verhoikärspekttrin mittaaminen.

Työn tärkeysjärjestykseksi asetettiin

1. algoritmin kehittäminen ja sen kuvaus,
2. tietokannan hallittavuus ja jatkokehitettävyyden sekä
3. spektrianalysointiohjelman käytettävyyden ja ulkoasun hionta .

#### 4.1.2 Tunnistettavat ilmiöt

Moventaksen Service-osasto, joka hoitaa käytännön kunnonvalvontaa, määritteli työn alussa kaikki yleisimmät ja tärkeimmät ilmiöt, jotka algoritmin täytyy pystyä tunnistamaan. Näitä olivat seuraavat:

- normaalit ilmiöt
  - akselien pyörimistaajuudet
  - hammaspyörien ryntötaajuudet
  - resonanssitaajuudet
    - \* värähtelyanturi
    - \* vaihteen kotelo
- laakeriongelmat
  - sisäkehän vika
  - ulkokehän vika
  - vierintäelimen vika
  - pitimen vika
- hammastettujen osien ongelmat
  - yksittäisen hampaan vikat

- hampaiden kuluminen
- hammaskosketuksen muutos
- vinossa oleva hammaspyörä (harvinainen)
- pyörimistajuiset ongelmat
  - epätasapaino
  - linjausvirheet
  - mekaaniset välykset
  - vinoon asennetut laakerit (harvinainen)
- viallinen värähtelyanturi
  - lehmänhäntäilmiö

### 4.1.3 Pitkän aikavälin tavoitteet

Pitemmällä aikavälillä haluttiin pystyä sulauttamaan kehitetty algoritmi CMaS-käyttöliittymään. Tällöin tulee tärkeäksi, että kehitettyä tietokantaa pystytään muokkaamaan käyttöliittymän kautta ja että algoritmi on kuvailtu teknologiariippumattomasti.

Eriytyisen tärkeää oli myös kehittää algoritmi niin, että se nostaisi poikkeavat spektrit esiin. Tästä hyödyttäisiin jatkossa siten, että esimerkiksi CMaS-käyttöliittymään voitaisiin nostaa vain kaikkein mielenkiintoisimmat spektrit. Tällöin analysoijan ei tarvitsisi käydä läpi kuin tärkeimmät spektrit.

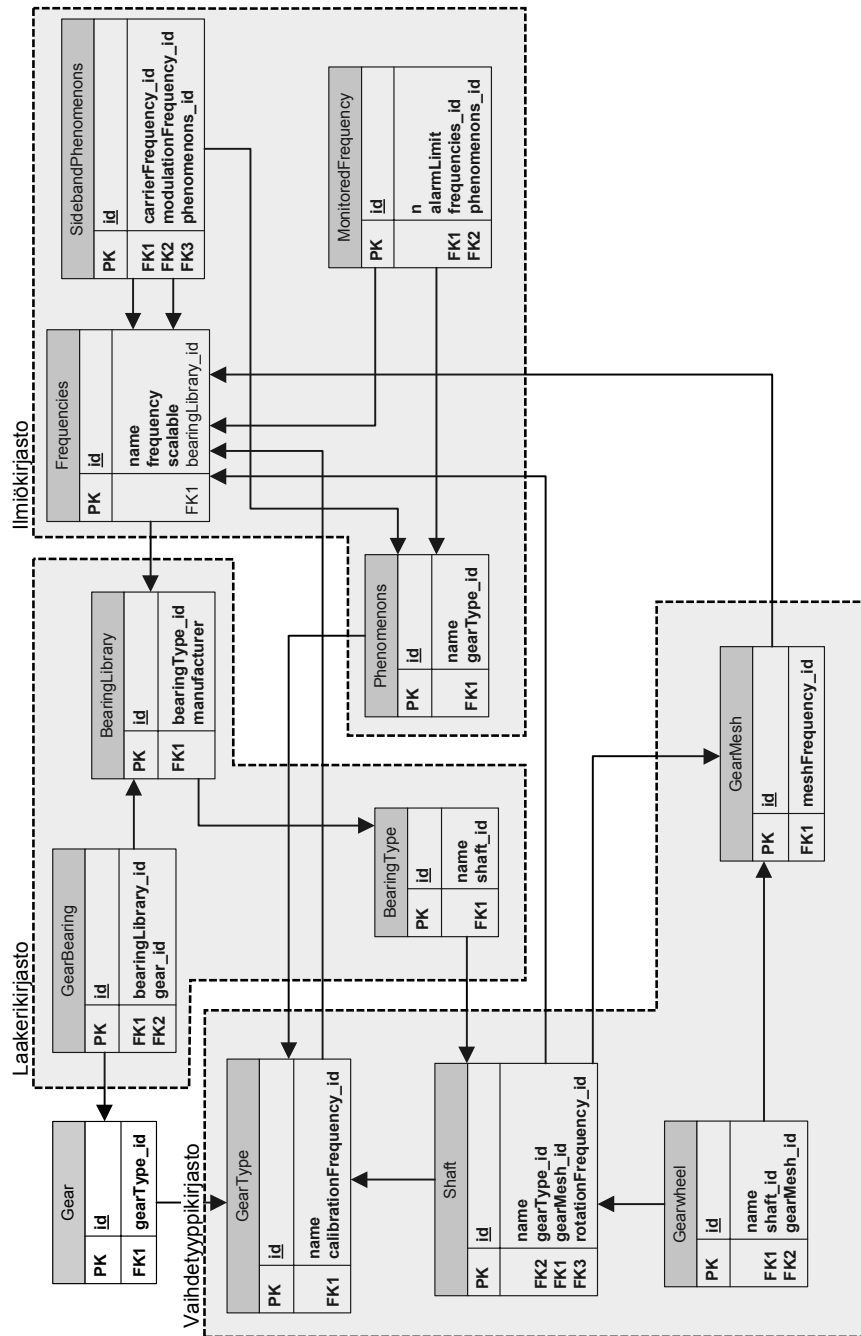
## 4.2 Tietokannan rakenne

Tietokannan kehityksen kannalta aluksi mietittiin tarkkaan, mitä kaikkia tietoja tietokantaa joudutaan tallettamaan. Tietokannan täytyi pystyä mallintamaan kaikkien erityyppisten vaihteiden rakennetta, vaihteilla ilmeneviä ilmiöitä sekä seurattavia taajuuksia. Lisäksi yhden vaihdetyypin sisällä eri vaihteiden laakerikonfiguraatio vaihteli paljon, joten tämä täytyi ottaa huomioon. Lopulta tietokannan kehitystyö johti siihen, että tietokanta piti sisällään vaihdetyyppi-, laakeri- ja ilmiökirjastot. Katso kuva (4.2).

Vaihdetyyppikirjasto pitää sisällään tiedon eri vaihdetyyppien rakenteesta: mitä akseleita, hammasrattaita, laakerityyppisiä vaihdetyypillä on ja mitkä osat liittyvät toisiinsa. Lisäksi kirjaston komponenttitauluissa on viitteet taajuuskirjastoon, jolloin saadaan tallennettua tieto, mikä taajuus tulee mistäkin komponentista.

Vaikkakin vaihdetyypin sisällä kaikilla vaihteilla on samat laakerityypit, vaihtelee laakerityyppien valmistajat paljon. Eri laakerivalmistajien saman tyyppin laakereilla eri vika-taajuudet voivat vaihdella merkittävästi, jolloin tämä täytyy ottaa huomioon spektrejä analysoidessa. Tämän takia vaihdetyyppitietojen lisäksi tarvitaan tietokantaan tieto jokaisen yksilöllisen vaihteen laakerivalmistajakonfiguraatiosta. Tämä tieto tallennetaan osana laakerikirjastoa, minne on yleisesti tallennettuna kaikki käytetyt laakerit tyyppineen ja valmistajineen kaikissa eri vaihdetyypeissä.

Ilmiökirjastoon on määritelty kaikki eri vaihdetyyppien ilmiöt sekä näiden seurattavat taajuudet ja seurattavien taajuuksien hälytysrajat. Ilmiökirjasto pitää sisällään myös taajuuskirjaston, johon on tallennettuna kaikki eri taajuudet, mitä kaikilla eri vaihdetyypeillä on. Taajuudet on tallennettu referenssikierrosnopeudella, joka jo aiemmissa sovelluksissa on valittu 1000 kierrokseksi minuutissa. Lisäksi taajuuksissa on pitänyt ottaa huomioon, että resonanssitaaajuudet eivät skaalaudu lineaarisesti kierrosnopeuden mukaan. Siksi taajuden mukana pitää tallentaa tieto skaalautuuko taajuus kierrosnopeuden mukaan vai ei. Taajuuskirjastoon ei tallenneta taajuuksien kerrannaisia, vaan ainoastaan perus-



**Kuva 4.2:** Kehitetyn tietokannan malli. Kuvaan merkitty tietokannan eri kirjasto-osat: vaihdetyyppi-, laakeri- ja ilmiökirjasto. Lisäksi merkitty, miten eri taulut viittaavat toisiinsa.



taajuudet. Harmoniset taajuudet määritellään seurattaviin taajuuksiin.

### 4.3 Algoritmin toiminta

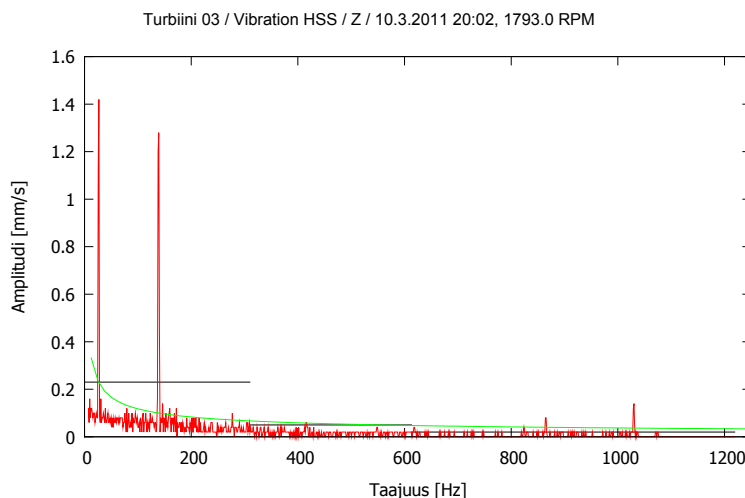
Algoritmin kehityksen alussa tutkittiin yleisesti, minkälaisia värähtelyspektrejä VIB-100- ja IVS-20-anturi ovat mitanneet. Näistä spektreistä etsittiin erilaisia vikaantumistilanteita sekä muita ilmiöitä. Lisäksi etsittiin spektrejä, joissa oli hyvin paljon piikkejä ja pyrittiin tunnistamaan manuaalisella työllä kaikki spektrin piikit. Apuna käytettiin vaihdetyypin Excel-pohjaista taajuuskarttaa. Näin saatiin peruskäsitys, miten ihminen analysoi spektrejä ja minkälaisiin asioihin hän kiinnittää huomiota.

Tämän ajatusprosessin kautta lähdettiin kehittämään algoritmin ensimmäisiä versioita. Aluksi pyrittiin tekemään pelkästään sanallinen versio, jonka avulla ihminen voisi analysoida hänelle annetun spektrin. Ensimmäinen versio algoritmista oli seuraavanlainen:

1. Laske värähtelyn taustan taso eri taajuusalueille
2. Merkitse muistiin spektrin taustatasosta erottuvat taajuudet
3. Kalibroi kierrosnopeus
4. Lataa tietokannasta kyseisen vaihdetyypin ilmiöt ja näiden seurattavat taajuudet sekä hälytysrajat
5. Tunnista muistiin merkityt taajuudet ilmiöiden seurattavien taajuuksien perusteella
6. Vertaa spektrin taajuuksien amplitudeja hälytysrajoihin ja laske luottamusarvio sekä ilmiön vaihe
7. Tulosta analyysin tulokset .

Jotta algoritmi osaa erottaa spektristä merkittävät piikit, päätettiin määrittää analysoitavalle spektrille värähtelyn taustataso. Tämän jälkeen algoritmin kohdassa kaksi merkitään ylös kaikki spektrin korkeat amplitudit, jotka ylittävät värähtelyn taustatason.

Värähtelyn taustatasolla tarkoitetaan muun muassa sitä, että koko nacelle heiluu maston päässä kovalla tuulella ja tätäkin värähtelyä vaihteessa kiinni olevat anturit joutuvat mittaamaan. Lisäksi värähtelyspektreissä näkyvä värähtelyn taustataso johtuu värähtelyanturin kohinasta, jota tulee signaalin vahvistamisesta vaaleanpunaisena kohinana ( $1/f$ -kohinana) sekä integrointikohinana [14–16]. Värähtelyn taustataso on nähtävissä hyvin



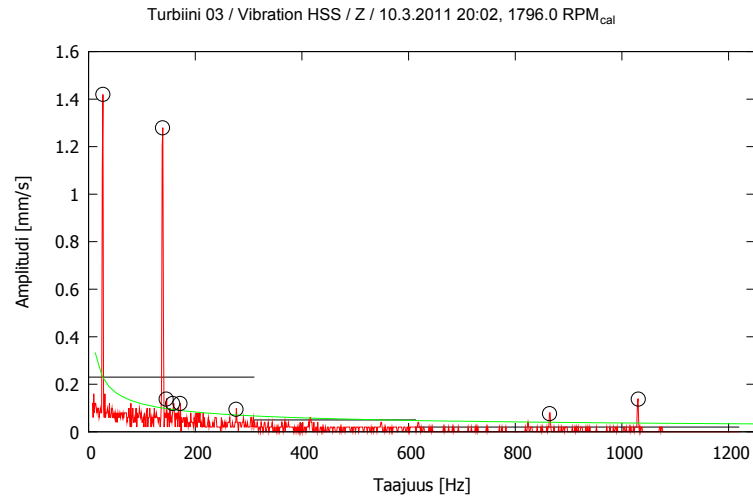
**Kuva 4.3:** Värähtelyspektrin taustatason määrittäminen. Vihreällä viivalla on merkitty  $1/f$ -funktion sovitus ja mustilla poikkiviivoilla on merkitty määritetty taustataso keskiarvolla laskettuna.

esimerkiksi kuvassa (4.1). Spektrin alussa värähtelyn taustaa on paljon, mutta se laskee tasaisesti mitä korkeammille taajuuslukeille spektrissä mennään.

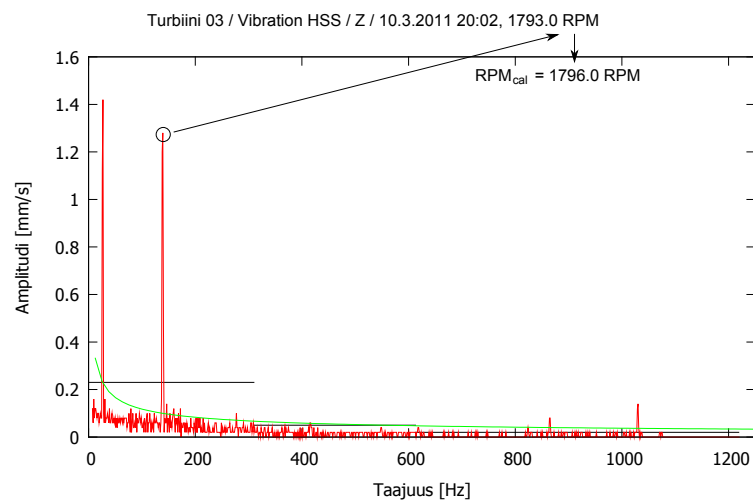
Värähtelyn taustatason määrittäminen oltaisiin voitu tehdä hyvin ja tarkasti sovittamalla spektrin mittapisteisiin  $1/f$ -funktio ja kertomalla tätä sopivalla vakiolla. Alkutesteissä tämä toimi hyvin, mutta ongelmaksi syntyi menetelmän toteuttaminen Java-kielellä jo olemassaolevaan spektrianalysointiohjelmaan. Tästä syystä päädyttiin tekemään taustatason määrittäminen toisella tavalla. Siinä jaetaan aluksi spektri esimerkiksi kymmeneen osa-alueeseen, mistä jokaisesta lasketaan värähtelyn amplitudien keskiarvo. Tätä keskiarvoa kerrotaan vielä sopivalla vakiolla. Kuvassa (4.3) nähdään määritetyt taustatasot molemmilla tavoilla ja kuvassa (4.4) merkitään ylös spektrissä merkittävästi erottuvat taajuudet.

Spektrien manuaalisen analysoinnin aikana huomattiin, että spektrin mittaamisen alussa mitattu kierrosnopeus ei antanut parasta mahdollista analysointitulosta vaan sitä jouduttiin paremman analyysin toivossa nostamaan tai laskemaan hiukan. Tällöin ajateltiin, että kierrosnopeus voitaisiin kalibroida jonkin spektriipiikin avulla. Usein spektreissä on nimittäin nähtävänä joku voimakasamplitudinen taajuus, joka liittyy vaihteen normaaliin toimintaan. Käyttämällä hyödyksi spektrin mittaamisen alussa mitattua kierrosnopeutta, voidaan tämä voimakasamplitudinen taajuus paikantaa spektristä ja laskea sen avulla uusi kierrosnopeus. Tätä varten jokaiselle vaihdetyypille määriteltiin tietokantaan oma kalibrointitaajuus. Katso kuva (4.5) esimerkkinä kierrosnopeuden kalibroinnista.

Algoritmin neljännessä vaiheessa ladataan senhetkisen vaihdetyypin ilmiöt ilmiökirjastosta sekä näiden seurattavat taajuudet sekä hälytysrajat. Seurattavat taajuudet muutetaan vastaamaan spektrin mukaista kierrosnopeustilannetta ja algoritmin viidennessä



**Kuva 4.4:** Värähtelyn taustatasosta erottuvien taajuuksien tunnistus. Tässä spektrissä tunnistus tehty  $1/f$ -sovituksen mukaan.

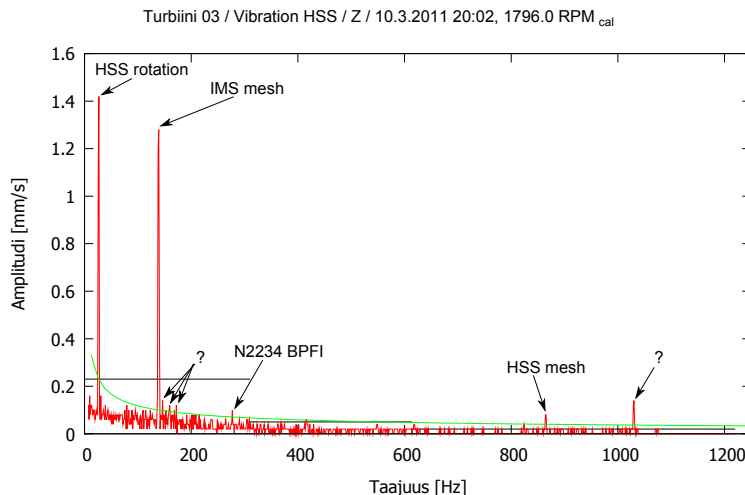


**Kuva 4.5:** Kierrosnopeuden kalibrointi värähtelyspektristä. Alunperin mitatun kierrosnopeuden avulla etsitään tietokantaan vaihdetyypille määritelty kalibrointitaajuutta vastaava voimakasamplitudinen taajuus spektristä ja sillä lasketaan kalibroitu kierrosnopeus.

vaiheessa taustatason ylittäneet taajuudet pyritään tunnistamaan näiden avulla. Ne merkittävät taajuudet, joita ei tunnistettu merkitään ylös tuntemattomiksi ilmiöiksi. Katso kuva (4.6).

Lopuksi verrataan vielä tunnistettujen ilmiöiden amplitudeja tietokantaan määritettyihin hälytysrajoihin. Näin määritetään ilmiön luottamusarvio eli kuinka luotettava algoritmin antama analyysi ilmiöstä on. Lisäksi samalla määritetään ilmiön vaihe.

Määritetään esimerkin vuoksi laakerin ulkokehän vaurion tilaa spektristä. Tietokantaan on määritetty ulkokehän vauriotapauksen seurattaviksi taajuuksiksi sen perustaaajuus ja



**Kuva 4.6:** Ilmiöiden tunnistus spektristä. Osia taustatasosta erottuvia taajuuksia ei olla voitu tunnistaa, joten ne merkitään tuntemattomiksi ilmiöiksi.

kaksi harmonista taajuutta ja näille on asetettu tietyt hälytysrajat. Oletetaan, että tutkittavasta spektristä löytyy laakerin ulkokehän perustaaajuus ja ensimmäinen harmoninen taajuus muttei toista. Oletetaan, että asetetut hälytysrajat ja spektrissä löydettyjen taajuuksien amplitudit ovat kuten on merkitty taulukkoon (4.1). Tällöin laakerin ulkokehän vaurioilmiön luottamusarvio saadaan seuraavan yhtälön avulla

$$\frac{\sum_{i=1}^N \min \left[ \frac{A(f_i)}{AL(f_i)}, 1 \right]}{N}. \quad (4.1)$$

Tässä  $A(f_i)$  on taajuuden spektristä löytynyt amplitudi, joka on nolla jos taajuuden amplitudi ei ole ylittänyt määriteltyä värähtelyn taustatasoa.  $AL(f_i)$  on puolestaan tietokantaan määrittelyyn vastaavan taajuuden hälytysraja ja  $N$  on ilmiöön määriteltyjen seurattavien taajuuksien lukumäärä. Yhtälössä määritellään, ettei yhden seurattavan taajuuden osuus luottamusarvion laskemisessa voi olla yli yhtä.

**Taulukko 4.1:** Esimerkkiarvot luottamusarvion laskemiseen laakerin ulkokehän vaurion tapauksessa. Ulkokehän toisen moninkerran amplitudi ei ole ylittänyt värähtelyn taustatasoa.

Suure	Hälytysraja [mm/s]	Amplitudi spektrissä [mm/s]
Laakerin BPFO	0,35	0,40
Laakerin BPFO $\times 2$	0,25	0,10
Laakerin BPFO $\times 3$	0,15	-

Tällöin esimerkkiarvoilla luottamusarvioksi saadaan

$$\frac{\min\left(\frac{0,40}{0,35}, 1\right) + \frac{0,1}{0,25} + \frac{0}{0,15}}{3} \approx 47\% .$$

Ensimmäisessä mielikuvassa algoritmin toiminnassa kuvassa (4.1) määriteltiin, että myös ilmiön vaihe halutaan määrittää ja kertoa analysoijalle. Ilmiön vaihe sovittiin olevan joko normaali, alkava vika tai vika. Kun ilmiölle on laskettu luottamusarvio, määritellään ilmiön vaihe tästä seuraavasti

- ilmiö on normaali, kun luottamusarvio  $< 60\%$
- ilmiö on alkava vaurio, kun  $60\% \leq$  luottamusarvio  $< 100\%$
- ilmiö on vaurio, kun luottamusarvio  $= 100\%$  .

Huomattavasti poikkeavien tai merkittävien spektrien erottamiseksi normaaleista spektreistä kehitettiin algoritmiin spektrin kiinnostavuusluvun laskeminen. Kiinnostavuusluku ottaa huomioon spektrin värähtelyn kokonaistason, spektrissä esiintyvien ilmiöiden vaiheet eli vika nostaa kiinnostavuuslukua samoin kuin alkava vika. Haasteena kuitenkin kiinnostavuusluvun laskemisessa on se, että se olisi yleinen kaikille eri spektrityypeille ja molemmille värähtelyantureille. Tuntemattomien ilmiöiden vaikutus kiinnostavuusluvun laskussa on otettu huomioon siten, että hyvin suuriamplitudiset tuntemattomat taajuudet vaikuttavat enemmän kiinnostavuuslukuun. Lisäksi myös niiden lukumäärän ylittäessä tietty raja lisätään kiinnostavuuslukuun tietty paino.

Lyhykäisyydessään algoritmin ensimmäinen versio toimii, kuten selitettiin äsken. Kuitenkin toimintaa hiottiin huomattavasti. Paljon tarkempi selitys algoritmin toiminnasta on poistettu Moventaksen pyynnöstä.

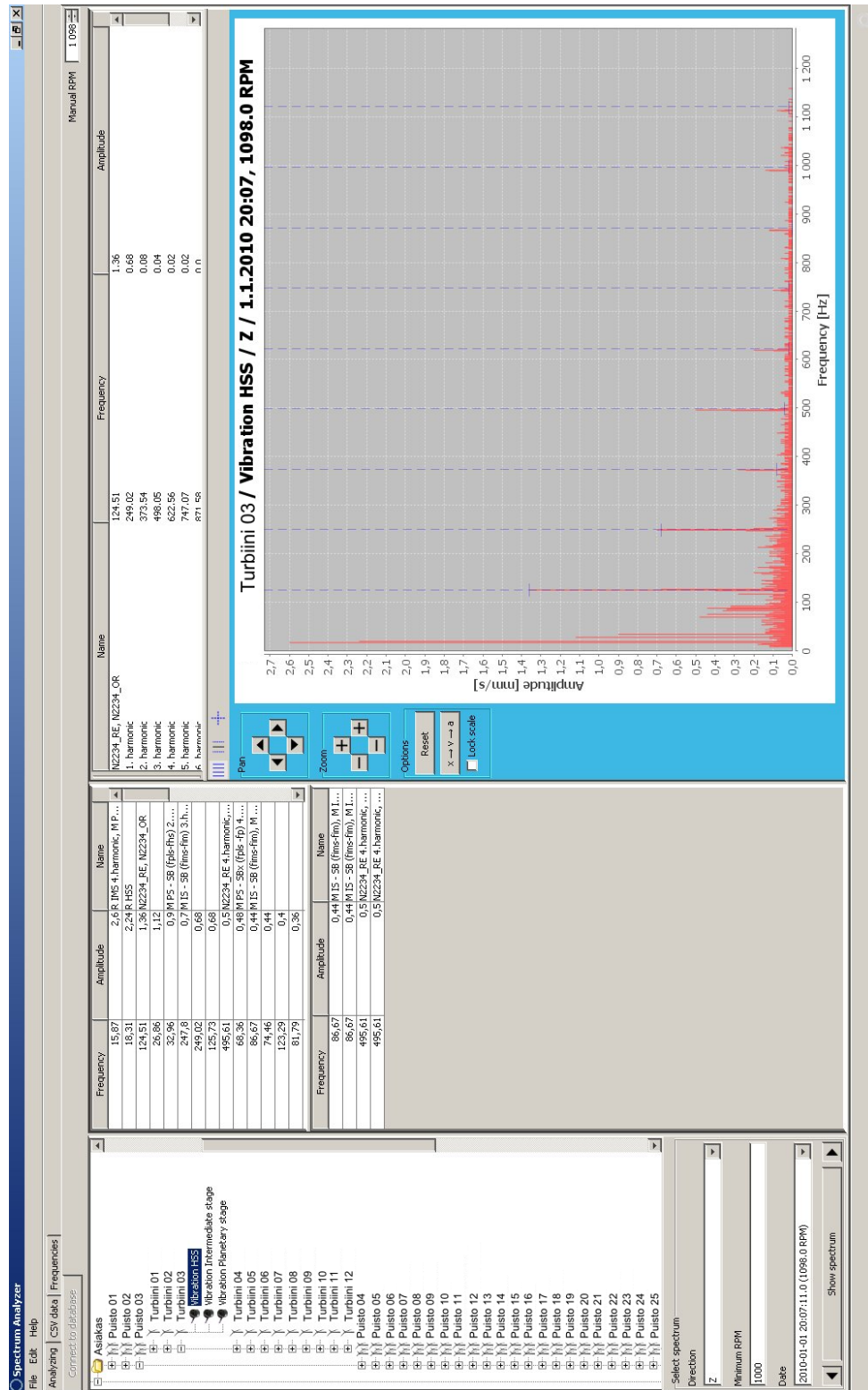
#### 4.4 Spectrus-ohjelman uusi toiminnallisuus

Spektrianalysointiohjelma eli lyhyemmin Spectrus oli ennen algoritmin kehittämistä ulkoasultaan ja toiminnaltaan kuten kuvassa (4.7). Vasemmalla nähdään puurakenne, mistä löytyvät kaikki eri asiakkaat, asiakkaiden puistot, puistossa olevat turbiinit ja lopulta vaihteessa kiinni olevat värähtelyanturit. Anturin valitsemisen jälkeen puurakenteen alapuolelta voidaan valita näytettävä spektri. Parametreinä voidaan valita haluttu värähtelysuunta sekä pienin kierrosnopeus, jolla spektrejä näytetään. Spektrin lataamisen jälkeen spektrin taajuus-amplitudipareja voitiin tutkia eri työkalujen, kuten harmoniset taajuudet ja sivunauhat-työkalujen, avulla. Lisäksi ohjelmaan pystyttiin määrittämään

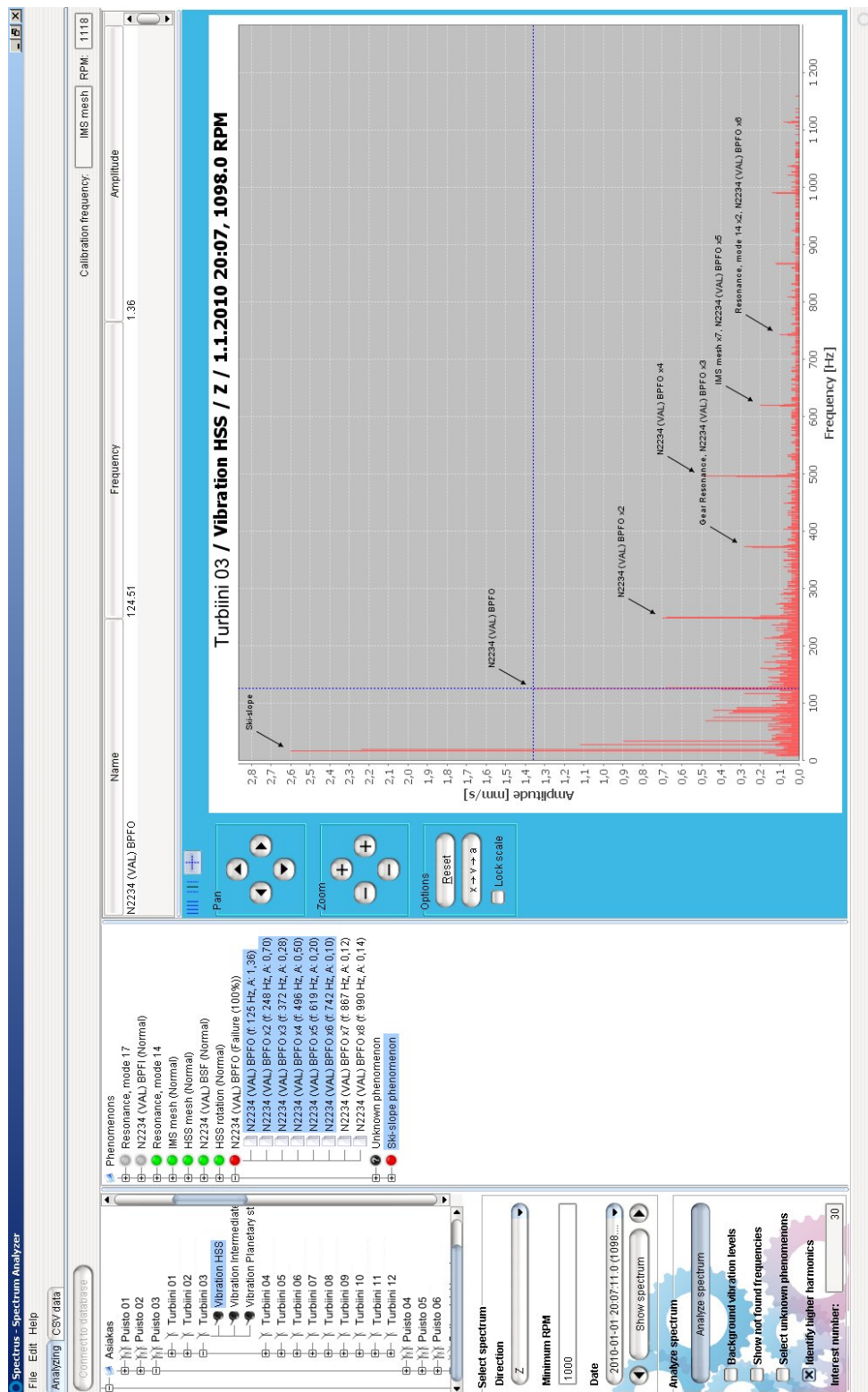
taajuuksia, jotka se paikantaa spektristä, mutta tällöin ei voitu erottaa eri vaihdetyyppejä toisistaan ja paikantamislogiikka oli muutenkin rajallista. Ohjelma myös listasi käyttöliittymänsä keskelle taulukkoon taajuudet, joiden amplitudit olivat isoimmat.

Spectruksen uusi toiminnallisuus on esitetty kuvassa (4.8). Ulkoasu on hiukan muuttunut edelliseen versioon verrattuna. Vasemmalla alhaalla spektrin analysointiin liittyvät parametrit. Samaan paikkaan tulostetaan myös spektrin kiinnostavuusluku. Tärkeimpänä uudistuksena ulkoasussa nähdään ilmiöpuu, jossa näytetään kaikki ilmiöt mitkä kyseiseen vaihteeseen liittyvät. Puurakenteessa nähdään eri ilmiöiden nimet ja suluissa on nähtävissä niiden vaihe (normaali, alkava vika tai vika) sekä analyysin luotettavuusluku prosentteina. Ilmiön vaihe merkitään myös siten, että normaalit ilmiöt merkitään vihreällä pallolla, alkavat viat oranssilla, viat punaisella sekä tuntemattomat ilmiöt mustalla pallolla. Ilmiöt, jotka on määritelty tietokantaan, mutta joita ei löydetty spektristä, merkitään ilmiöpuuhun harmaalla pallolla. Puurakenteen ilmiöitä valitsemalla ohjelma näyttää spektristä, mitkä taajuudet liittyvät ilmiöön. Analysointiparametreista voidaan valita näyttääkö ohjelma määritellyt värähtelyn taustatasot ja tarkistaako se myöskin suuremmat harmoniset taajuudet kuin mitä tietokantaan on merkitty. Lisäksi voidaan valita näyttääkö ohjelma niiden taajuuksien paikat spektristä, joita ei löydetty analysoinnin aikana. Oikealle ylhäälle ohjelma merkitsee, mikä on kierrosnopeuden kalibrointiin käytetty taajuus sekä mikä on uusi kalibroitu kierrosnopeus.

Ohjelman uutta toimintaa testattiin erääseen vaihdetyyppiin. Testaamisessa haluttiin vertailla, miten hyvin ohjelma poimii vaihteen vikaantumiset verrattuna manuaaliseen analysointiin. Toiminta testattiin 26 vaihteen kanssa. Kaikkissa tapauksista vikaantuminen jäi kiinni. Neljässä tapauksessa ohjelma reagoi vikaantumiseen keskimäärin 1,8 päivää manuaalista analysointia jäljessä. Kaikenkaikkiaan ohjelma sai viat kiinni keskimäärin 13,5 päivää manuaalista analysointityötä aikaisemmin.



Kuva 4.7: Spectrus-ohjelman toiminta ennen. Spektrissä näkyvissä erään laakerin ulkokehän vika, joka näkyy useammalla harmonisella taajuudella.



**Kuva 4.8:** Spectrus-ohjelma algoritmin implementoinnin jälkeen. Ohjelma merkitsee nyt spektriin tunnistetut ilmiöt. Kuvaan on valittu näytettäväksi erään laakerin ulkokehän vaurio sen monine harmosine taajuuksineen sekä lehmähäntäilmiö. Ilmiöpuuhun spektrin vasemmalle puolen merkitään vihreillä pallolla ilmiöt, jotka on löydetty spektristä, mutta jotka ovat normaalin toiminnan rajoissa. Punaisella pallolla merkitään ilmiöt, jotka viittaavat vikaan. Harmaalla puolestaan ne, joita ei löydetty spektristä tällä kertaa. Lisäksi alkavat viat merkittäisiin oranssilla pallolla, mutta tässä spektrissä sellaista ei nähdä.



## 4.5 Jatkokehityskohteet

Tärkeimpänä jatkokehityskohteena esiin nousi kuormariippuvainen hälytysraja. Käytännössä algoritmin kannalta tämä olisi kohtuullisen helppo lisätä, mutta mittatietoa kuormasta ei ole tällä hetkellä saatavilla.

Vierekkäisten spektrien vertaileminen saattaisi myös tuoda analyysituloksia, mutta tämäkin vaatisi kuormatietoja. Toisaalta myös spektrien mittaamisen sykli pitäisi olla tasaisempi.

Tällä hetkellä ohjelmassa ei tunnisteta sivunauhailmiöitä. Tämä johtuu siitä, että tietokanta johon spektrin ilmiöt tallennetaan olisi joutunut olemaan huomattavasti monimutkaisempi ja ajan säästämiseksi rakenteen muokkaamisesta luovuttiin.

Värähtelyn taustatason määrittämisessä VIB-100-anturin nopeusspektreissä paremmin toimisi  $1/f$ -funktion sovittaminen mittatietoon, mutta toisaalta se ei toimisi saman anturin kiihtyvyysspektrien kanssa eikä myöskään suurimmaksi osaksi IVS-20-anturin spektrien kanssa.

Lisäksi pienenä kosmeettisena parannusehdotuksena olisi ilmiöiden merkitseminen spektriin älykkäämmin kuin tällä hetkellä. Mikäli ilmiöitä on paljon ja kaikki ilmiöt halutaan nähdä yhtäaikaan spektrissä, saattaa osa merkinnöistä mennä päällekkäin ja tätä ohjelma ei osaa päätellä tai korjata.



## Luku 5

# Yhteenveto

Kunnonvalvonnan tarpeet tulevat kasvamaan vaihteiden määrän lisääntyessä. Lisäksi vaihteiden vikoja halutaan havaita aikaisempaa aiemmin, jotta huoltotoimenpiteitä pystytään suunnittelemaan entistä tehokkaammin. Tähän kehitykseen ollaan vastaamassa monilla eri työkaluilla, joista tässä työssä käsitelty spektrianalysointilaitte Spectrus on yksi. Spectruksen ensimmäinen versio auttoi analyysejä työssään jo paljon, mutta parantamisen varaa oli. Spektrien automaattisen analysoinnin kehittäminen oli jälleen harppaus eteenpäin. Haasteena kehitystyössä oli algoritmin tekeminen generiseksi sekä eri vaihtetyypeille että eri antureille ja spektrityypeille.

Tässä onnistuttiin työssä hyvin ja käyttökokemukset Moventaksen Service-osaston analysointilaitteilla ovat olleet hyviä. Algoritmin toiminnan hyvyydestä kertoo myös eräälle vaihtetyypin vaihteille tehty testi, jossa otettiin vikaantuneita vaihteita ja verrattiin, miten hyvin algoritmi poimi vikoja verrattuna manuaaliseen analysointityöhön. Tulokset olivat hyviä ja algoritmi reagoi vikaantumiseen keskimäärin 13,5 päivää ennen manuaalista analysointia.

Tulevaisuudessa tässä työssä kehitettyä algoritmia pyritään sulauttamaan CMaS-käyttöliittymään. Samalla kehitetään mielenkiintoisten spektrien automaattista esiintuomista. Mielikuvana olisi, että valitsemalla puisto tai vaihde käyttöliittymästä päästään selämään spektrejä, joissa algoritmin mukaan olisi jotain merkittävää analysoitavaa.



# Kirjallisuutta

- [1] WWEA. World wind energy report 2010. [http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010\\_s.pdf](http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf). [Internet; haettu 29.06.2011].
- [2] Joonas Kiviniemi. *Tuuliturbiinien vaihteiden kunnonvalvonta värähtelymittauksin sekä tilastollisin menetelmin*. Erikoistyö, Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, 2011.
- [3] Petri Nohynek and Veli Erkki Lumme. *Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset*. Kunnossapitoyhdisty ry, 2007.
- [4] Acu-Vib Electronics. Kiihtyvyyssanturi. <http://www.acu-vib.com.au/images/accelerometer1.jpg>. [Internet; haettu 21.10.2010].
- [5] Measurement Specialties. Piezo film sensors technical manual. <http://www.media.mit.edu/resenv/classes/MAS836/Readings/MSI-techman.pdf>. [Internet; haettu 21.10.2010].
- [6] Antti Niemi. *Fourier-analyysi ja Laplace-muunnos*. Opetushallitus, 1997.
- [7] Henry Mikkonen et al. *Kuntoon perustuva kunnossapito*. Kunnossapitoyhdistys Promaint, 2009.
- [8] PSK Standardisointi. *PSK 6210. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät*. PSK Standardisointiyhdistys ry, 2003.
- [9] Siemens. Nacellen pääosat. <http://scruss.com/talks/02006/bcs/pics/siemens-bonus2300-nacelle.jpg>. [Internet; haettu 1.11.2010].
- [10] Markus Pylvanen. *Tiedonlouhintamenetelmien hyödyntöminen vaihteiden kunnonvalvonnassa*. Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Tietotekniikan laitos, 2009.
- [11] Moventas Oy. Tuuliturbiinivaihteita. <http://www.moventas.com/what-we-do/service/wind-gear-finder>. [Internet; haettu 4.7.2011].
- [12] PSK Standardisointi. *PSK 5707. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmäärittäminen*. PSK Standardisointiyhdistys ry, 2004.

- 
- [13] Wowk V. *Machinery vibration measurement and analysis*. McGraw-Hill Inc., 1991.
- [14] Keskustelu Elfströmin Jukan kanssa. [keskustelu käyty 23.3.2011].
- [15] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld. Self-organized criticality - An explanation of 1/f noise. *Physical Review Letters*, 59:381–384, July 1987. doi: 10.1103/PhysRevLett.59.381.
- [16] M. B. Weissman. 1/f noise and other slow, nonexponential kinetics in condensed matter. *Reviews of Modern Physics*, 60:537–571, April 1988. doi: 10.1103/RevModPhys.60.537.