



LUT
Lappeenranta
University of Technology

Tuulivoimamelun ominaispiirteiden määrittäminen

Pekka Härkönen

Pekka Härkönen
Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Tuulivoimamelun ominaispiirteiden määrittäminen

Tarkastaja: TkT Mikko Kuisma

2016

Kandidaatintyö.
36 sivua ja 13 kuvaa.

Hakusanat: tuulivoimamelu, signaalianalyysi, amplitudimodulaatio

Tiivistelmä

Kandidaatinopinäytetyössä tutkittiin tuulivoimaloiden tuottaman melun taajuussisältöä ja analyysimenetelmiä amplitudimodulaation eli äänenvoimakkuuden jaksollisen vaihtelun havaitsemiseen ja voimakkuuden määrittämiseen. Analyysimenetelmiä sovellettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys Suomessa -tutkimushankkeen aikana Lappeenrannan Muukonkankaalla 31.12.2014 - 17.2.2015 toteutettujen mittausten tuottamaan dataan. Aineiston rajaamiseksi tämän työn laajuudessa hallittavaksi, analysoitavat ajankohdat valittiin 10 minuutin ajanjaksoilta, joilta oli 1/3-oktaavikaistoittain 8 Hz näytteistystaajuudella tallennetun datan lisäksi ääninäyte ja havaintopäiväkirjassa havainto kuuluvasta tai häiritsevästä melusta taloudessa, jossa mittauslaitteisto on ollut sillä hetkellä asennettuna. Näillä rajauksilla löydettiin 17 näytettä. Melun taajuussisältöä tutkittiin laskemalla 17 ajankohdan 1/3-oktaavikaistojen A-painotetut ekvivalenttitasot 10 minuutin aikaväleiltä ja vertaamalla tasoja ekvivalenttitasoihin ajankohtana, jolloin voimaloiden tiedettiin olleen pysähdyksissä. Yleisimmät spektrianalyysimenetelmät todettiin huonosti soveltuviksi voimakkuudeltaan nopeasti muuttuvan tuulivoimamelun modulaatiosyvyyden määrittämiseen. Aiemmissä tutkimuksissa ehdotetuissa menetelmissä tuulivoimamelun amplitudimodulaation havaitsemiseksi ja erityisesti modulaatiosyvyyden määrittämiseksi todettiin myös puutteita. Amplitudimodulaatiota paikannettiin 1/3-oktaavikaistojen ja niistä laskettujen A-painotettujen tasojen amplitudispektrejä hyödyntäen. Näyte määriteltiin amplitudimoduloituneeksi mikäli amplitudimodulaatiospektreissä havaittiin piikki odotettavissa olevilla modulaatiotaajuuksilla. Kuudessa näytteessä havaittiin amplitudimodulaatiota vähintään yhdellä 1/3-oktaavikaistalla. Modulaation havaittiin erottuvan selvemmin A-painotetuista ekvivalenttitasoista verrattuna Z-painotettuihin tasoihin ja modulaatio oli voimakkaimmillaan taajuusalueella 125 Hz - 4 kHz. Modulaatiosyvyys määritettiin alipäästösuodatetuista aikatazon signaaleista ja tuloksia vertailtiin aiemmassa tutkimuksessa ehdotetun menetelmän tuotamiin tuloksiin. Havaitut modulaatiosyvyydet olivat suurempia kuin aiemmissä tutkimuksissa on raportoitu. Muutamissa 30 sekunnin näytteissä modulaation luonne vastasi aiemmin julkaistussa kirjallisuudessa voimistuneeksi amplitudimodulaatioksi nimettyä ilmiötä. Käytetyn analyysimenetelmän todettiin soveltuvan jatkokehittäväksi automaattisen, suurista aineistoista amplitudimodulaatiota paikantavan ja modulaatiosyvyyttä määrittävän, analyysialgoritmin toteuttamiseen.

Pekka Härkönen
Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Quantification of Wind Turbine Noise Characteristics

Examiner: D.Sc. (Tech.) Mikko Kuisma

2016

Bachelor's Thesis.
36 pages and 13 figures.

Keywords: wind turbine noise, signal analysis, amplitude modulation

Abstract

In this thesis, analysis methods to quantify frequency content of wind turbine noise and to detect and quantify amplitude modulation of the noise were studied. Developed analysis methods were applied to 1/3-octave data with 8 Hz sampling rate recorded continuously at Muukonkangas, Lappeenranta during time period from 31.12.2014 to 17.2.2015. To keep the amount of data manageable in scope of this study, samples with length of 10 minutes were selected, for which there was also an audio recording and reported observation of audible noise in noise diary kept by a resident in the same dwelling where the measurement equipment was installed. Audio recordings were used to identify the noise source aurally. With the set criteria, 17 samples were found. Frequency content of the noise was quantified by calculating A-weighted equivalent levels from the 1/3-octave data for the 10 minute samples and comparing the levels to a 10 minute sample with the wind turbines at standstill. Spectrum analysis methods based on Fourier analysis were found to be unreliable for quantifying the modulation depth of wind turbine generated modulation, which can change its amplitude in a time scale of 2 - 10 seconds. Also, methods proposed in earlier studies for quantifying the modulation depth were found to be problematic. In this thesis, amplitude modulation was detected by calculating amplitude modulation spectrums from 1/3-octave bands and A-weighted equivalent levels calculated from the raw 1/3-octave data. A sample was considered to be amplitude modulated if there was a peak in the amplitude spectrum on the expected modulation frequency range calculated from the nominal rotation speed of the turbines. In six of the 17 samples, amplitude modulation was detected at least on one 1/3-octave band. The modulation was found to be strongest on the frequency range 125 Hz - 4 kHz and more easily discernible from the A-weighted levels compared to Z-weighted levels both of which were calculated from the 1/3-octave data. The modulation depth was determined from low-pass filtered time domain signal and the results were compared to a method proposed in journal article published in 2011. Observed modulation depths were found to be greater than reported in previous studies. In a few 30 second samples, the characteristics of the modulation were found to be similar to earlier findings defined as enhanced amplitude modulation. The developed analysis method was found to be applicable for development of automatic algorithm capable of detecting amplitude modulation and determining its modulation depth from large amounts of data.

Sisältö

| | |
|---|-----------|
| 1 Johdanto | 7 |
| 1.1 Taustaa | 7 |
| 1.2 Työn tavoitteet | 8 |
| 2 Menetelmät ja aineisto | 9 |
| 2.1 Tutkimusmenetelmät | 9 |
| 2.2 Mittaukset | 9 |
| 2.2.1 Mittauslaitteisto | 9 |
| 2.2.2 Mittauskohteet | 9 |
| 2.2.3 Mittausdata | 10 |
| 2.3 Aineiston rajaus | 10 |
| 3 Määritelmät ja terminologia | 11 |
| 3.1 Määritelmät | 11 |
| 3.1.1 Äänenpaine ja äänenpainetaso | 11 |
| 3.1.2 A-painotus | 12 |
| 3.1.3 1/3-oktaavikaista | 12 |
| 3.2 Äänen ominaispiirteitä kuvaavat käsitteet | 13 |
| 3.2.1 Taajuussisältö | 13 |
| 3.2.2 Amplitudimodulaatio | 13 |
| 4 Tulokset | 15 |
| 4.1 Signaalianalyysin matemaattiset menetelmät | 15 |
| 4.2 Katsaus tuulivoimamelun signaalianalyysimenetelmiin | 18 |
| 4.2.1 Menetelmä 1 | 18 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.2.2 | Menetelmä 2 | 18 |
| 4.2.3 | Menetelmä 3 | 19 |
| 4.2.4 | Edelleen kehitetty menetelmä modulaatiosyvyyden määrittämiseksi | 20 |
| 4.3 | Menetelmien soveltaminen aineistoon | 20 |
| 4.3.1 | Tutkittu aineisto | 20 |
| 4.3.2 | Taajuussisältö | 21 |
| 4.3.3 | Amplitudimodulaatio | 23 |
| 4.3.3.1 | Amplitudimodulaatiohavainnot | 23 |
| 4.3.3.2 | Amplitudimodulaatiospektrien ominaispiirteet | 23 |
| 4.3.3.3 | Modulaatiosyvyyden määrittäminen | 25 |
| 4.3.3.4 | Menetelmän soveltaminen ekvivalenttitasoihin | 28 |
| 4.4 | Johtopäätökset | 29 |
| 4.5 | Pohdintaa | 30 |
| 4.6 | Yhteenveto | 31 |

Lyhenteet

| | |
|--------------|---|
| F | nopea aikavakio 0.125 s |
| S | hidas aikavakio 1 s |
| s | sekunti |
| f | taajuus [Hz] |
| f_s | näytteistystaajuus [Hz] |
| f_{mod} | modulaatiotaajuus [Hz] |
| L | äänenpainetaso |
| $L_{A,eq,T}$ | A-painotettu ekvivalenttitaso (keskiäänitaso) aikavälillä T |
| $L_{eq,T}$ | ekvivalenttitaso aikavälillä T |
| p_0 | Ilmanpaine-eron erotuskyvyn alaraja 20 μPa |
| p_i | hetkellinen ilmanpaine |
| T | aikaväli |
| T_s | näytteistysintervalli [s] |
| CWT | Continuous Wavelet Transform |
| DFT | Discrete Fourier Transform |
| EAM | Enhanced Amplitude Modulation |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| IDFT | Inverse Discrete Fourier Transform |
| IFFT | Inverse Fast Fourier Transform |
| STFT | Short Time Fourier Transform |

Luku 1

Johdanto

1.1 Taustaa

Tuulivoiman kasvaneen kapasiteetin myötä on lisääntynyt myös tuulivoiman vastustus tuulipuistojen lähialueille mahdollisesti aiheutuvien terveys- ja meluhaittojen vuoksi [1]. Myös käytettyjen mallin-
nusmenetelmien soveltuvuudesta tuulivoimalamelun mallintamiseen on esitetty kritiikkiä alan asian-
tuntijoiden toimesta [2]. Meluhaittoja on tutkittu sekä Suomessa että kansainvälisesti, mutta suoria
terveysvaikutuksia ei ole toistaiseksi havaittu [3, 4]. Lähialueiden asukkaat kuitenkin raportoivat melu-
lusta ja erilaisista terveyshaitoista.

Ympäristöministeriön, tuulivoimarakentamista koskeviin lakeihin perustuvassa, ohjeessa tuulivoima-
rakentamisen suunnitteluun todetaan, ettei valtioneuvoston päätöstä melutason ohjearvoista (Vnp
993/92) voida suoraan soveltaa tuulivoimamelun häiritsevyyden arviointiin, johtuen tuulivoimamelun
erityispiirteistä. Ohjeessa suositellaan käytettäväksi muiden maiden kokemuksiin ja siellä käytössä
oleviin ohjearvoihin perustuvia suunnitteluohjearvoja. Ohjearvot on annettu erikseen päivä- (klo 7 -
22) ja yöajalle (klo 22 - 7). Asumiseen käytettävillä alueilla taajamissa ohjearvot ovat 45 dB (päivä)
ja 40 dB (yö) sekä loma-asumiseen käytettävillä alueilla taajamien ulkopuolella 40 dB (päivä) ja 35
dB (yö). Lukemat ovat A-painotettuja keskimääräisiä ulkomelutasoja eli päivääjan taso on keskiar-
votaso 15 tunnin aikaväliltä ja yön osalta keskiarvotaso 9 tunnin aikaväliltä. Mikäli mitattu melu
on tarkastelupisteessä soivaa, selvästi amplitudimoduloitunutta (äänenvoimakkuus vaihtelee ajallises-
ti), impulssimaista tai kapeakaistaista, lisätään laskenta- tai mittaustuloksiin 5 dB ennen vertailua
suunnitteluohjearvoihin. Ohjeessa ei kuitenkaan ole tarkemmin määritetty esimerkiksi amplitudimo-
dulaation havainnon ominaisuuksia, joilla 5 dB lisäykseen päädytään. [5]

Yhdeksi melun häiritsevyyteen vaikuttavaksi tekijäksi on esitetty juuri tuulivoimamelun amplitudimo-
dulaatiota [6, 7]. Amplitudimodulaation syntymekanismi liittyy tuulivoimalan roottorin pyörimisliikkee-
seen ja lapojen synnyttämiin virtausääniin [8]. Yleinen pyörimisnopeus suurille teollisen kokoluokan
tuulivoimaloille on 6 - 18 kierrosta minuutissa, jolloin yksi kolmesta lavasta ohittaa saman pisteen
1.25 - 3.33 sekunnin välein [3]. Muutokset äänenvoimakkuudessa tapahtuvat nopeimmillaan siten alle
5 sekunnin aikaskaalassa. Suunnitteluohjearvoissa käytetyt pitkän aikavälin keskimääräiset melutasot
eivät näin ollen vaikuta sopivilta suureilta kuvaamaan tuulivoimamelulle luonteenomaista amplitudi-
moduloitunutta melua. Modulaation voimakkuus ei tule esille keskimääräisissä tasoissa ja ohjeistuksen
5 dB kompensatio erityisen häiritsevästä äänestä on hyvin suurpiirteinen eikä perustu tuulivoimame-
lun tieteellisesti todennettuihin erityispiirteisiin. Amplitudimodulaation syntymekanismia ja sen vai-
kutusta äänen häiritsevyyteen on tutkittu jossain määrin, mutta edelleen ilmiöön liittyy paljon tunte-
mattomia tekijöitä. Tuulivoimamelun modulaation voimakkuuden määrittämiseen ei ole tiedeyhteisön
hyväksymää metodia, mikä osaltaan selittää viranomaisohjeistuksen määritelmien vajavaisuuksia.

Tuulivoimamelun erityispiirteiden parempi tuntemus myös Suomen vaihtelevissa sääoloissa olisi siten

tärkeää nykyistä täsmällisempien suunnitteluohjeiden laatimiseksi. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan tuulivoimamelun analysointiin soveltuvia signaalianalyysin menetelmiä melun erityispiirteiden kvantifoimiseksi. Lappeenrannan teknillisen yliopiston Etelä-Karjala instituutti aloitti 2014 tutkimushankkeen 'Tuulivoimaloiden äänen häiritsevyys Suomessa', jonka tavoitteena on melun luonteen osalta tutkia äänenvoimakkuuden ja muiden äänen erityispiirteiden yhteyttä ihmisten kokeman äänen häiritsevyyteen. Projektissa on suoritettu mittauksia Työterveyslaitoksen toimesta kevään 2015 aikana kahdessa tuulipuistossa Lappeenrannassa, Muukonkankaalla sekä Merijärvellä, Ristivuorella. Mittausten lisäksi hankkeeseen sisältyy tuulipuistojen lähialueen asukkaiden haastattelututkimusta ja satunnaisesti valitut taloudet raportoivat havainnoistaan täyttämällä havaintopäiväkirjaa.

1.2 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on etsiä tuulivoimamelun ominaispiirteiden analysointiin soveltuvia signaalianalyysimenetelmiä sekä soveltaa näitä menetelmiä käytettävissä olevaan dataan. Keväällä 2015 suoritettujen mittausten tuottaman datan pohjalta pyritään vastaamaan seuraaviin tuulivoimaloiden tuottaman äänen luonteeseen ja sen ominaisuuksien määrittämiseen liittyviin tutkimuskysymyksiin:

- Millainen on tuulivoimamelun taajuussisältö ja muut ominaispiirteet?
- Millaisilla signaalianalyysimenetelmillä tuulivoimamelun ominaispiirteitä olisi mahdollista havaita ja kvantifioida?

Luku 2

Menetelmät ja aineisto

2.1 Tutkimusmenetelmät

Tuulivoimamelun analysointiin soveltuvia signaalianalyysimenetelmiä kartoitettiin kirjallisuustutkimuksena tuulivoimamelua ja signaalinkäsittelyn teoriaa käsittelevistä julkaisuista ja kirjallisuudesta. Menetelmiä sovellettiin MATLAB-ohjelmistoa käyttäen Työterveyslaitoksen mittauksista saatuun dataan ja menetelmien soveltuvuutta tuulivoimamelun analysointiin arvioitiin tulosten perusteella.

2.2 Mittaukset

2.2.1 Mittauslaitteisto

Mittaukset toteutettiin Nor 140 äänianalysointilaitteella varustettuna Nor 1217 sade- ja tuulisuojalla. Mittalaite sijoitettiin Nor 1530 suojakoteloon, joka sisältää akun ja verkkoliitännän 230VAC järjestelmään.

2.2.2 Mittauskohteet

Mittauskohteet valitsi Sari Janhunen Lappeenrannan teknillisen yliopiston Etelä-Karjala-instituutista ja mittaukset suoritettiin Työterveyslaitoksen toimesta. Tutkimuspaikat valittiin seuraavilla kriteereillä:

- Tuulipuistojen ympäristössä on asutusta 1,5 km:n etäisyydellä
- Tuotanto teollisessa kokoluokassa
- Turbiineissa on käytetty nykyaikaista teknologiaa

Valintakriteerit täyttäviä tutkimuspaikkoja löytyi kaksi:

1. Lappeenranta, Muukonkangas. Tuulipuistossa on 7 kpl 3 MW:n voimaloita.
2. Merijärvi, Ristivuori. Tuulipuistossa on 6 kpl 2,3 MW:n voimaloita.

Sari Janhunen oli paikalla Lappeenrannan teknillisen yliopiston puolesta jokaisessa mittauskohteessa kun mittalaitteet asennettiin ja mittausjaksot aloitettiin. Kaksi ensimmäistä mittauskohdetta sijaitsevat Lappeenrannan Muukonkankaalla ja mittausjaksot olivat kohteessa 1 31.12.2014 - 22.1.2015 sekä kohteessa 2 22.1.2015 - 17.2.2015. Kohteet 3-5 sijaitsevat Merijärven Ristivuorella ja mittaukset suoritettiin seuraavilla ajanjaksoilla: kohde 3 17.2.2015 - 11.3.2015, kohde 4 11.3.2015 - 1.4.2015 ja kohde 5 1.4.2015 - 29.4.2015.

2.2.3 Mittausdata

Äänenpainetasot L tallennettiin 1/3-oktaavikaistoittain 6.3 Hz – 20 kHz taajuusalueella 8 Hz näytteistystaajuudella ja samanaikaisesti myös A-painotettuina ekvivalenttitasoina $L_{A,eq}$ nopealla aikavälillä $F = 0.125$ s. Mittari oli asennettu kaikissa mittauskohteissa noin 10 cm päähän ulkorakennuksen seinästä.

2.3 Aineiston raja

Tässä työssä analysoitava aineisto valittiin neljään eri vuorokauden aikaan äänitettyjen 10 minuutin ajanjaksojen joukosta niiltä ajankohdilta, joilta asukkaat ovat havaintopäiväkirjoissaan raportoineet kuuluvasta tai häiritsevästä melusta. Äänenpainetasoja tallennettiin ympäri vuorokauden 31.12.2014 - 29.4.2015 toteutettujen mittausten ajan, mutta aineistosta valittiin analysoitavaksi klo. 0.00, 6.00, 12.00 ja 18.00 alkaen tallennetut 10 minuutin aikajaksot, joilta on myös äänitallenne. Äänitallenteita käytettiin melulähteiden tunnistamiseen analysoitavista näytteistä. Lisäksi vaadittiin, että mittauslaitteisto on ollut asennettuna havaintohetkellä havainnon tehneeseen kohteeseen. Tässä työssä tarkastelun ulkopuolelle jätetään äänen luonteen mahdolliset terveysvaikutukset ja ihmisen subjektiivinen kokemus äänen häiritsevyydestä. Aineiston rajaamiseksi edelleen tämän työn laajuudessa hallittavaksi, edellä asetetut kriteerit täyttävät näytteet valittiin Lappeenrannan Muukonkankaalla 31.12.2014 - 17.2.2015 tallennetusta aineistosta.

Luku 3

Määritelmät ja terminologia

Tässä luvussa esitellään akustisissa mittauksissa käytetyt suureet ja niiden määritelmät sekä äänen ominaisuuksia kuvaavat käsitteet.

3.1 Määritelmät

3.1.1 Äänenpaine ja äänenpainetaso

Tässä osassa esiteltävät meluntasojen mittauksissa käytetyt suureet on määritelty Ympäristöministeriön ohjeessa ja äänenpainemittalaitteita koskevassa standardissa [9, 10].

Äänenpaineella tarkoitetaan ääniaallon väliaineessa (tässä työssä ilma) aiheuttaman hetkellisen paineen p_i vaihtelua staattisen paineen suhteen. *Äänenpainetaso* L on logaritminen suure, joka on määritelty yhtälön (3.1) mukaisesti

$$L_i = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^2 \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \text{ dB}, \quad (3.1)$$

jossa p_0 on ihmiskorvan hetkellisen paineenmuutoksen erotuskyvyn alarajaksi määritelty $20 \mu\text{Pa}$ referenssipaine.

Usein hetkellisen äänenpainetason sijaan halutaan tarkastella keskimääräistä äänenpainetasoa jollakin aikavälillä. Desibelin ollessa logaritminen suure, on pidempien aikavälien keskiarvot on laskettava käyttäen logaritmien laskusääntöjä. Merkitään hetkellä t mitattua hetkellisen paineen p_i ja referenssipaineen p_0 osamäärää symbolilla $p(t)$ ja kyseisen hetken äänenpainetasoa symbolilla $L(t)$. Käyttämällä yhteyttä

$$L(t) = 20 \log_{10} (p(t)) \iff p(t) = 10^{L(t)/20} \quad (3.2)$$

saadaan keskimääräinen äänenpainetaso eli *keskiäänitaso* tai *ekvivalenttitaso* aikavälillä T laskettua lausekkeella

$$L_{eq,T} = 20 \log \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L(t)/20} dt \right). \quad (3.3)$$

Modernit äänenpainemittarit laskevat mitatusta datasta ekvivalenttitasot yhtälöä (3.3) soveltaen, käyttäen asetettua aikaväliä T eli näytteistystaajuutta $f_s = 1/T$. Tallentamalla data käyttäen lyhyttä aikaväliä, eli suurta näytteistystaajuutta, voidaan tarkastella myös nopeasti muuttuvia ilmiöitä sekä tarvittaessa laskea ekvivalenttitasoja myös pidemmille aikaväleille. Lyhyen aikavälin 1/3-oktaaveittain tallennetut ekvivalenttitasot ovat tästä syystä akustisissa mittauksissa yleisesti käytetty raakadatan tallennusmuoto.

Äänenpainemittareiden asetuksissa käytetään valitun näytteistystaajuuden lisäksi kahta erilaista aikavakiot: nopea (fast, F) 0.125 s ja hidas (slow, S) 1 s. Aikavakiot viittaavat mittarin reagointiherkkyyteen, ja juontavat juurensa analogisten mittareiden tekniikkaan. Analogisissa mittareissa eri aikavakiot toteutettiin mittarin neulan koolla - pidempi neula reagoi hitaammin kuin lyhyt neula. Analogisten mittareiden aikakaudella määritellyt arvot näille aikavakioille ovat edelleen käytössä äänenpainemittareita koskevilla standardeissa [10].

3.1.2 A-painotus

Ihmiskorvan herkkyys äänen voimakkuudelle vaihtelee äänen taajuuden mukaan. Ihmiskorvan vasteen kompensoimiseksi melumittauksissa käytetään usein IEC 61672-1:2003 standardissa määriteltyä A-painotusta [10]. Painotuksen perustana on viitteen [11] kokeelliset tulokset ihmiskorvan taajuusvasteesta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi hyvin matalataajuuksisten äänten on oltava tasoltaan voimakkaampia verrattuna keskitaajuuksiin (1000 Hz ympäristö). A-painotettu ekvivalenttitaso $L_{A,eq,T}$ aikavälillä T on määritelty yhtälöiden (3.1), (3.2) ja (3.3) avulla

$$L_{A,eq,T} = 20 \log \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_A(t)/20} dt \right) = 20 \log \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A(t) dt \right), \quad (3.4)$$

jossa $L_A(t)$ on A-painotettu äänenpainetaso, $p_A(t)$ A-painotettu äänenpaine ajanhetkellä t ja $T = t_2 - t_1$. Tasaista (flat) 'painotusta' nimitetään IEC 61672-1 standardissa vuodesta lähtien 2003 Z-painotukseksi (zero frequency-weighting)[10].

3.1.3 1/3-oktaavikaista

Oktaavi on kahden sävelen välinen etäisyys eli intervalli, joka vastaa taajuuden kaksinkertaistumista. Esimerkiksi ihmisen kuuloalue 20 Hz - 20 kHz voidaan siten jakaa osiin oktaaveittain ja edelleen oktaavin osiin. Moderneja äänianalysointoreita käytettäessä tämä tarkoittaa, että mitattava taajuusalue jaetaan useisiin kapeampiin taajuusalueisiin eli kaistoihin käyttäen rinnakkaisia digitaalisia suotimia, jolloin mittaukset voidaan tallentaa yhtäaikaaisesti kaistoittain. Akustiikassa kuuloalueen keskitaajuudeksi on määritelty 1000 Hz, jonka avulla koko kuuloalue voidaan jakaa em. kapeampiin kaistoihin. Kaistojen laskentamenetelmät on määritelty taajuuskaistoja koskevassa IEC standardissa [12].

Äänenpainetaso tietyllä ajanhetkellä koko taajuusalueellaan voidaan laskea 1/3-oktaavikaistojen tasoista soveltamalla yhtälöitä (3.1) ja (3.2). Äänenpainetaso ajanhetkellä i voidaan laskea yhtälöstä

$$L_i = 10 \log \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10} \right), \quad (3.5)$$

jossa L_1 on matalimman ja L_n korkeimman taajuuskaistan taso tarkastellulla ajanhetkellä. A-painotettu äänenpainetaso L_A voidaan laskea lisäämällä jokaisen 1/3-oktaavikaistan tasoon yhtälöiden

$$R_A(f) = \frac{12194^2 f^4}{(f^2 + 20.6^2) \sqrt{(f^2 + 107.7^2)(f^2 + 737.9^2)(f^2 + 12194^2)}}, \quad (3.6)$$

ja

$$A(f) = 20 \log(R_A(f)) + 2.00 \quad (3.7)$$

mukaisesti lasketut painotuskertoimet ennen yhtälön (3.5) soveltamista [10].

3.2 Äänen ominaispiirteitä kuvaavat käsitteet

Erilaisista äänilähteistä peräisin olevat äänet voidaan erottaa toisistaan äänen sisältämien taajuuksien ja äänenvoimakkuuden vaihtelun ominaispiirteiden (esim. impulssimaisuus) avulla.

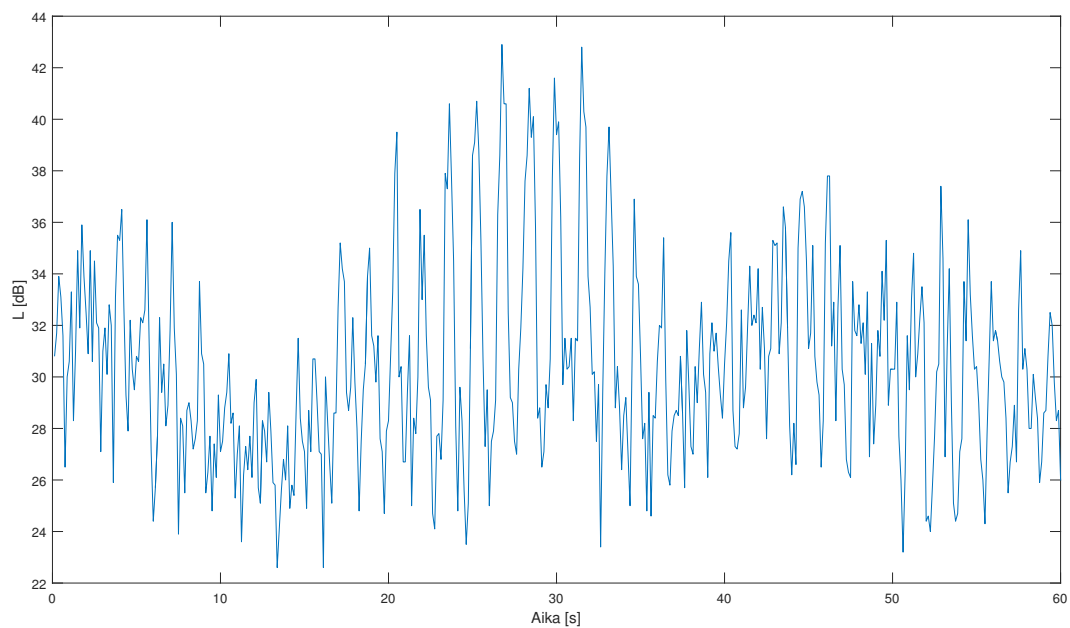
3.2.1 Taajuussisältö

Äänisignaalin *taajuussisällöllä* tai *taajuusjakaumalla* tarkoitetaan sitä, kuinka signaalin energia on jakaantunut eri taajuuksille. Energian keskittyessä koko mittausalueeseen nähden pienelle taajuusalueelle, ääntä voidaan kuvailla *kapeakaistaiseksi*. Vastaavasti äänienergian jakautuessa tasaisesti monille taajuuksille, puhutaan *laajakaistaisesta* äänestä. Satunnaissignaalin taajuussisältöä voidaan tutkia erilaisin spektrinestimointimenetelmin, kuten Fourier-analyysiin pohjautuvan *tehotiheyspektrin* avulla [13, 14]. Tässä työssä analysoitava 1/3-oktaavikaistoittain tallennettua dataa voidaan käyttää kuitenkin suoraan taajuussisällön arviointiin. Kaistojen hetkellisiä tai joltakin ajanjaksolta keskiarvotettuja tasoja eli ekvivalenttitasoja vertailemalla saadaan käsitys äänen taajuusjakaumasta.

3.2.2 Amplitudimodulaatio

Amplitudimodulaatio tarkoittaa tuulivoimamelun yhteydessä äänenpainetason jaksollista vaihtelua. Tuulivoimaloiden pyöriävästä liikkeestä johtuen, melun luonne on väistämättä jaksollinen. Kuten tämän työn johdannossa todettiin, amplitudimodulaation voimakkuuden eli modulaatiosyvyyden, joka määritellään tässä työssä tasojen vaihtelun suuruudeksi mitattuna huipusta huippuun, on kuitenkin epäilty olevan yhteydessä äänen häiritsevyyteen [6, 7]. Amplitudimodulaation syntymekanismeihin tuulivoimaloissa ei oteta tässä työssä kantaa, mutta aiheetta on tutkittu esimerkiksi viitteessä [8]. Aiemmissä tutkimuksissa on havaintoja myös voimistuneesta amplitudimodulaatiosta (Enhanced Amplitude Modulation, EAM), joka ei selity ns. tavanomaisilla syntymekanismeilla [15, 16].

Käsityksen ilmiöstä saa helpoiten esimerkin avulla. Kuvassa 3.1 on esitetty 60 sekunnin mittainen ajanjakso yhden 1/3-oktaavikaistan raakadatan. Tasojen vaihtelun jaksollisuus muutaman sekunnin aikaskaalassa näkyy erityisesti aikavälillä 15 s - 35 s, jolloin modulaation amplitudi huipusta huippuun mitattuna on myös suurimmillaan. Kuvasta nähdään myös, että mitatussa signaalissa on merkittävä määrä kohinaa eli modulaatiotaajuutta merkittävästi suuremmista taajuuksista muodostuvaa häiriötä ja toisaalta hitaita, 10 - 20 sekunnin jaksonajoilla tapahtuvia, muutoksia. Näiden ominaispiirteiden perusteella voidaan todeta, että tuulivoimamelun amplitudimodulaation tutkimiseen tarvitaan sekä digitaalisen signaalinkäsittelyn menetelmiä kohinan poistoon mittaustietojen siistimiseksi että signaalianalyysimenetelmiä jaksollisten ilmiöiden havaitsemiseen ja niissä esiintyvien taajuuksien ja modulaatiosyvyyksien määrittämiseen.



Kuva 3.1: Näyte 400 Hz kaistan 8 Hz näytteistystaajuudella tallennetusta raakadatatista, jossa nähdään tuulivoimalan aiheuttamaa äänenpainetason vaihtelua eli amplitudimodulaatiota. Noin 1.7 sekunnin jaksonajalla ilmenevä modulaatio on erotettavissa erityisesti aikavälillä 15 s - 35 s.

Luku 4

Tulokset

Tässä osassa esitellään aluksi digitaalisessa signaalin käsittelyssä yleisesti käytetyt signaalianalyysimenetelmät. Menetelmien soveltuvuutta tuulivoimamelun amplitudimodulaation ominaisuuksien määrittämiseen ja havaitsemiseen arvioitiin menetelmien laskennallisten ominaisuuksien perusteella sekä testaamalla menetelmiä soveltamalla niitä käytettävissä olevaan 1/3-oktaavikaistoittain tallennettuun dataan ja testisignaaleihin joiden taajuussisältö oli tunnettu. Analyysimenetelmistä tehtyjen huomioiden pohjalta arvioitiin kolmen amplitudimodulaation havaitsemista ja sen ominaisuuksien määrittämistä käsittelevän tutkimusartikkelin ja niissä ehdotettujen menetelmien soveltuvuutta datan analysointiin. Lopuksi valittuja menetelmiä sovelletaan tämän työn aineistona olevaan dataan.

4.1 Signaalianalyysin matemaattiset menetelmät

Kuten edellisessä osassa todettiin, tuulivoimamelun taajuussisältöä voidaan tutkia laskemalla 1/3-oktaavikaistoille ekvivalenttitasot valitulla aikavälillä. Taajuussisällön analysointiin edellisessä osassa mainittua tehotiheyspektriä ei voida tämän työn aineistona olevaa dataa analysoidessa käyttää, koska raakadatan tulisi tällöin olla esimerkiksi äänitiedostoina. Tässä työssä analysoiduista 10 minuutin näytteistä äänitiedostot olisivat käytettävissä, mutta koska äänitiedostoihin tukeutuvia menetelmiä ei voida käyttää aineiston analysointiin kokonaisuutena, taajuussisällön tutkimusmenetelmäksi valittiin 1/3-oktaavikaistoista lasketut ekvivalenttitasot.

Amplitudimodulaation ominaisuuksia ovat modulaatiotaajuus ja modulaation voimakkuus eli modulaatiosyvyys. Tällaisten jaksollisten ilmiöiden tutkimuksen perustyökaluihin kuuluvat erilaiset Fourier-analyysiin perustuvat menetelmät. Diskreettejä arvoja saavaan dataan voidaan soveltaa diskreettiä Fourier-muunnosta (DFT), jonka muunnospari on määritelty tässä työssä yhtälöiden

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-i2\pi nk/N} \quad (4.1)$$

ja

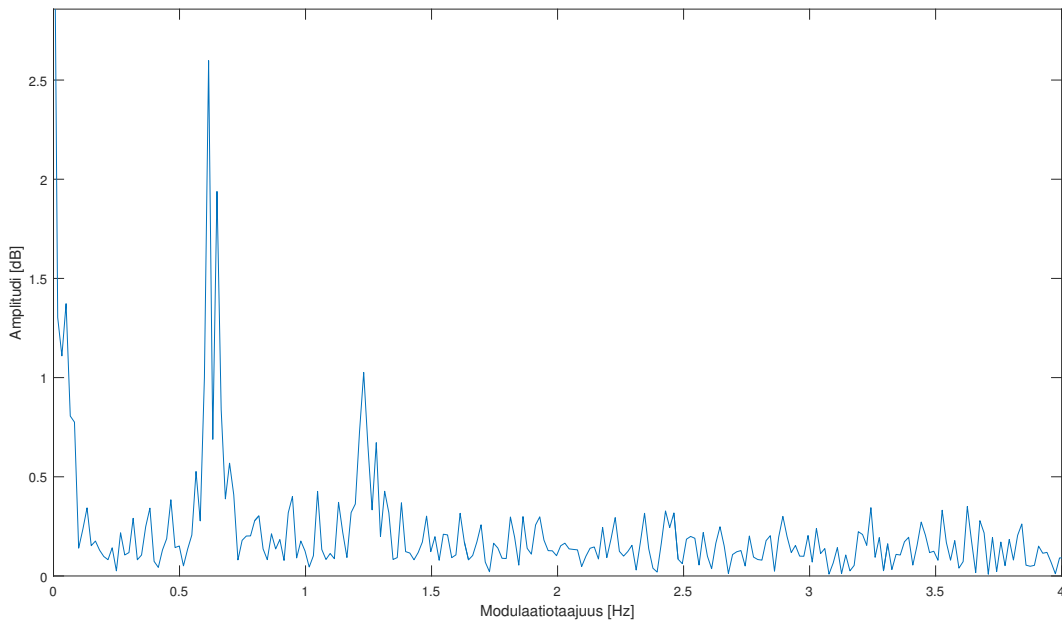
$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{i2\pi nk/N} \quad (4.2)$$

mukaisesti, joissa $x[n]$ signaalivektori, $X[k]$ taajuuskomponenttivektori, N näytteen pituus eli signaalivektorin $x[n]$ alkioiden lukumäärä ja $e^{-i2\pi nk/N}$ diskreettejä arvoja saava kompleksiaalto, jossa

$i = \sqrt{-1}$. Yhtälö (4.1) on siis diskreetti Fourier-muunnos (DFT) aikatasosta taajuustasoon ja yhtälö (4.2) käänteismuunnos (IDFT) takaisin aikatasoon.

Muunnosparin määritelmä eroaa esimerkiksi viitteissä [13] ja [14] esitellyistä määritelmistä kertoimen $1/N$ suhteen. Käyttämällä edellä määriteltyä muunnosparia, saadaan laskettaessa $X[k]$:n itseisarvo taajuuskomponenttien amplitudien summan sijaan taajuuskomponenttien amplitudi tai niiden keskiarvo mikäli amplitudi vaihtelee näytteen aikavälillä. Muunnosparista on käytössä myös määritelmä, jossa sekä DFT:n että IDFT:n kerroin on $1/\sqrt{N}$. MATLAB-ohjelmiston `fft()` funktio käyttää määritelmää, jossa kerroin $1/N$ on käänteismuunnoksen (yhtälö (4.2)) edessä. Yhtälöiden (4.1) ja (4.2) käyttäminen vaatii siten `fft()` funktion tuottaman tuloksen jakamisen N :llä ja `ifft()` funktion tuloksen kertomista N :llä.

DFT:n tuottaman kompleksivektorin avulla voidaan tutkia signaalin jaksollisuutta. Laskemalla DFT kuvassa 3.1 esitetystä raakadatasta FFT-algoritmia soveltaen ja ottamalla tuloksena saadusta kompleksivektorin alkioista itseisarvo, voidaan piirtää kuvassa 4.1 esitetty *amplitudispektri*, josta nähdään signaalin sisältämien taajuuskomponenttien suhteelliset amplitudit [13, 14, 17].



Kuva 4.1: Kuvan 3.1 raakadatasta laskettu amplitudimodulaatiospektri, jossa nähdään piikki noin 0.6 Hz modulaatiotaajuudella, mikä vastaa kuvan 3.1 aikavälillä 15 s - 35 s esiintyvän modulaation 1.7 sekunnin jaksonaikaa. Myös toista harmonista vastaava piikki erottuu spektristä noin 1.2 Hz modulaatiotaajuudella.

Huomionarvoista on, että kuvan 4.1 spektri on käytännössä spektri spektristä, koska raakasignaali, josta amplitudispektri lasketaan, voidaan ajatella jo itsessään olevan ajan funktiona muuttuva spektri eli 400 Hz 'taajuuskomponentin' tason vaihtelu ajan funktiona. Ko. spektrin erottamiseksi äänisignaalin taajuussisältöön viittavasta spektristä, tässä työssä käytetään viitteitä [6], [18] ja [19] mukailien amplitudispektristä nimitystä *amplitudimodulaatiospektri* ja sen taajuuskomponenteista termiä *modulaatiotaajuus* f_{mod} .

Soveltamalla Fourier-muunnosta kuvan 3.1 desibeleinä ilmaistuun satunnaissignaaliin edellä esitetyn suoraviivaisesti, ajaututaan erityisesti signaalin amplitudin arvioinnissa ongelmiin, jotka syntyvät ainakin kolmesta laskuteknisestä syystä.

Ensimmäinen ongelma liittyy DFT:n taustalla olevan Fourier-muunnoksen teoriaan: valitun näytteen oletetaan olevan jaksollinen eli yhdistämällä N alkioita sisältävän näytteen alku ja loppu niin, että alkio $N+1$ on jälleen näytteen ensimmäinen alkio, tuloksena on jatkuva jaksollinen signaali. Käytännössä satunnaisesti valittujen todellisten signaalien ensimmäinen ja viimeinen alkio muodostavat usein epäjatkuvuuden, joka aiheuttaa signaalin energian vuotamista (spectral leakage) taajuuskomponenteille, joita

ei signaalissa todellisuudessa ole. Todellisten taajuuskomponenttien amplitudit ovat siten pienempiä, kuin jos epäjatkuvuutta ei jatkuvuusoletuksen myötä syntyisi. Epäjatkuvuuden vaikutuksia voidaan pienentää kertomalla näyte sopivalla näytteen reunoilta nolaa lähestyvällä ns. ikkunointifunktiolla, mutta tämä tuo mukanaan omat ongelmansa ikkunointifunktion muokatessa lopputuloksena saatavan spektrin taajuusresoluutiota ja taajuuskomponenttien amplitudien suuruutta. [13, 14]

Toisena ongelmana on signaalin amplitudin muuttuminen näytteenpituutta lyhyemmässä aikaskaalassa. DFT:n määritelmän kerroin $1/N$ käytännössä keskiarvottaa taajuuskomponenttien amplitudin, jolloin lyhytkestoiset suurenkin modulaatioamplitudin ilmiöt voivat jäädä havaitsematta. Kuvasta 3.1 nähdään, että modulaation amplitudi muuttuu merkittävästi jo muutamien sekuntien aikaskaalassa.

Kolmas ongelma syntyy desibeleinä ilmoitettujen äänenpainetasojen eli logaritmisten suureiden käsittelystä. DFT:n määritelmä sisältää summan, joten desibeleinä esitetyt tasot tulisi muuntaa ennen FFT:n laskentaa paineeksi tai paineen ja $20 \mu\text{Pa}$ referenssipaineen suhteeksi p_i/p_0 yhtälöä (3.2) käyttäen. Desibeleinä ilmoitetusta datasta laskettu muunnos tuottaa taajuuskomponenttien amplitudeja pienentävää virhettä ja virhe kertaantuu jos data muunnetaan käänteismuunnoksella vielä takaisin aika- tasoon. Datan muuntaminen ennen FFT:n laskentaa paineeksi tai paineen ja referenssipaineen suhteeksi ja FFT:n tuloksena saadun kompleksivektorin tai siitä lasketun amplitudispektrin muuntaminen takaisin desibeleiksi havaittiin tuottavan myös virheellisen lopputuloksen. Todennäköisimmäksi syyksi tähän epäiltiin sitä, että kymmenkantaisen logaritmin laskeminen ei ole ekvivalentti matemaattinen operaatio aika- ja taajuustasoissa, mutta tarkka syy jäi epäselväksi.

Kuvan 4.1 amplitudimodulaatiospektristä voidaan siten saada luotettava arvio modulaatiotaajuudesta, mutta modulaatiosyvyyttä ei voida arvioida ko. spektrin piikkien amplitudeista, johtuen edellä mainituista kolmesta laskuteknisestä syystä. Käyttämällä tarkoitusta varten luotuja testisignaaleja, merkittävimmän virheen todettiin aiheutuvan näytteen epäjatkuvuudesta ja taajuuskomponenttien amplitudin keskiarvottumisesta, logaritmin suureen käsittelystä johtuvan virheen ollessa kahta ensin mainittua pienempi.

Satunnaissignaalien taajuusanalyysissä sovelletaan usein tehotiheysspektriä, joka on FFT:n avulla lasketun magnitudispektrin neliö. Näin laskettu spektriestimaatti tunnetaan myös nimellä *periodogrammi*. Tehotiheysspektrin taajuuskomponenttien arvot kuvaavat signaalin tehoa näillä taajuuksilla, eivät signaalin sinimuotoisten taajuuskomponenttien amplitudeja. Tehotiheysspektri soveltuu siten jaksollisten ilmiöiden havaitsemiseen ja signaalin tehon jakautumisen määrittämiseen sen eri taajuuskomponenteille, mutta modulaatiosyvyyden määrittäminen ei ole sen avulla mahdollista.

Periaatteellisesti sopivimmaksi vaihtoehdoksi Fourier-analyysin menetelmistä ominaispiirteiltään nopeasti muuttuvan signaalin analysointiin todettiin Short Time Fourier Transform (STFT), jossa näyte jaetaan lyhyisiin, peräkkäisiin tai limittäisiin, osanäytteisiin. Osanäytteet ikkunoidaan sopivilla reunoilta nolaa lähestyvillä funktioilla, niille lasketaan FFT:n avulla amplitudispektri ja tuloksena saadaan ajan funktiona muuttuva amplitudispektri eli graafina esitettynä *spektrogrammi* [14]. STFT:lla voidaan välttää nopeasti muuttuvan signaalin taajuuskomponenttien amplitudin keskiarvoittuminen valitsemalla riittävän lyhyt ikkunan pituus, mutta ongelmaksi muodostuu taajuusresoluution huonontuminen. Esimerkiksi pidemmän näytteen jakaminen kahden sekunnin ikkunoihin antaa taajuusresoluutioksi $1/T_s N = f_s/N = 8/16 = 0.5 \text{ Hz}$ [13]. Resoluutio on sama vaikka näytteistystaajuutta nostettaisiin audiolle tyypilliseen 44.1 kHz:n, koska näytteen pituus N muuttuu samassa suhteessa: $44100/88200 = 0.5 \text{ Hz}$ Tämä on liian karkea resoluutio odotettavissa olevan modulaatiotaajuuden vaihteluvälin ollessa noin 0.3 Hz - 0.8 Hz [3]. Taajuusresoluutiota voidaan parantaa keinotekoisesti pidentämällä näytettä lisäämällä signaalivektoriin nolaksi asetettuja alkioita (zero padding), mutta tämä keinotekoinen resoluution muutos on käytännössä datan interpolointia eikä siten tuo lisäinformaatiota todellisesta spektristä [13].

Wavelet-muunnosta käyttämällä Fourier-analyysiin perustuvissa menetelmissä ilmenevä taajuusresoluutioon liittyvät ongelmat voidaan välttää ja jatkuvaa wavelet-muunnosta (CWT) kokeiltiin lyhyesti datan analysointiin Matlab:n `cwt()` funktiota (vanhempi, R2016 versiota edeltävä funktio) käyttäen

[20]. Wavelet-muunnoksen teoriaan ja ominaisuuksiin perehtyminen tämän työn puitteissa todettiin kuitenkin liian laajaksi aiheeksi. Epäselväksi jäi, millaisen estimaatin CWT antaa modulaatiosyvyydestä eli millaisia virhelähteitä CWT:n taajuuskomponenttien amplitudien laskentaan liittyy.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tuulivoimamelun nopeasti muuttuvan luonteen ja Fourier-muunnoksen laskennallisten ominaisuuksien vuoksi modulaatiosyvyyden täsmällinen määrittäminen on Fourier-analyysiin perustuvilla menetelmillä ongelmallista. Amplitudimodulaation havaitsemiseen ja modulaatiotaajuuksien määrittämiseen em. menetelmät soveltuvat kuitenkin hyvin.

4.2 Katsaus tuulivoimamelun signaalianalyysimenetelmiin

Tässä osassa arvioidaan kolmessa aiemmassa tutkimusartikkelissa ehdotettujen menetelmien soveltuvuutta amplitudimodulaation havaitsemiseen ja modulaatiotaajuuden sekä modulaatiosyvyyden määrittämiseen.

4.2.1 Menetelmä 1

Ruotsissa tehdyn tutkimuksen tavoitteena oli tutkia amplitudimodulaation esiintyvyyden ja erilaisten sääolojen yhteyttä [19]. Mittaukset suoritettiin kahdessa kohteessa yhtäjaksoisesti vuoden ajan. Artikkelissa ehdotetaan myös menetelmää amplitudimodulaation havaitsemiseen 1/3-oktaavikaistoittain 8 Hz näytteistystaajuudella ja 10 Hz - 20 kHz taajuusalueella tallennetusta datasta.

Ehdotetussa menetelmässä lasketaan amplitudimodulaatiospektri (suorakaideikkunalla näytepituudella 15 s) A-painotetuista tasoista, jotka on laskettu käyttäen 1/3-oktaavikaistoja 10 Hz - 630 Hz. Modulaatiosyvyys (AM factor) arvioidaan saadun amplitudispektrin korkeimman piikin arvosta modulaatiotaajuusalueella 0.6 Hz - 1 Hz. Raja-arvoksi havainnolle amplitudimodulaatiosta asetetaan havaintoihin perustuen 0.4 dB(A).

Modulaatiospektrin laskennan tarkempia yksityiskohtia ei artikkelissa kerrota, mutta kerrotuista tiedoista päätellen menetelmässä on modulaatiosyvyyden määrittämisen kannalta laskuteknisiä ongelmia, jotka esiteltiin tämän työn edellisessä osassa. Ensimmäinen epäkohta on FFT:n laskeminen ilman ikkunointia, mikä vaikuttaa modulaatiosyvyyden määrittämiseen edellisessä osassa mainitun spectral leakage ilmiön vuoksi. Toiseksi, modulaatiosyvyys ehtii muuttua menetelmässä käytetyllä 15 sekunnin näytepituudella niin, että modulaatiosyvyydestä saadaan tulokseksi keskiarvo em. aikaväliltä. Lisäksi modulaatiospektri on laskettu muuntamatta tasojäätymiseksi tai hetkellisen paineen ja referenssipaineen suhteeksi, mikä aiheuttaa myös virhettä taajuuskomponenttien amplitudeihin. Modulaatiosyvyyden määrittäminen ei ollut tutkimuksen päätavoite, mutta edellä mainituilla epäkohdilla on merkitystä myös modulaation havaitsemisen kannalta: ikkunoinnin ja modulaatiosyvyyden vaihtelun vuoksi havainnon kriteeriksi asetettu korkeimman piikin arvo on epäluotettava tunnusluku modulaatiohavainnosta, koska sen arvo riippuu siitä millä tavoin signaali käyttäytyy satunnaisesti valikoituvan näyteikkunan alussa ja lopussa sekä ko. 15 sekunnin näytteen aikana.

Ehdotettu menetelmä soveltuu varauksin amplitudimodulaation havaitsemiseen ja modulaatiotaajuuden määrittämiseen, mutta modulaatiosyvyyttä ei voida menetelmällä luotettavasti arvioida.

4.2.2 Menetelmä 2

Australiassa toteutetussa tutkimuksessa tavoitteena oli kehittää automaattinen algoritmi amplitudimodulaation havaitsemiseen ja huipusta huippuun arvon määrittämiseen 1/3-oktaaveittain 10 Hz

näytteistystaajuudella ja 0.8 Hz - 20 kHz taajuusalueella tallennetusta datasta [18]. Paikallisissa vi-ranomaismääräyksissä on artikkelin mukaan asetettu täsmällinen 6 dB huipusta huippuun raja-arvo säännöllisesti esiintyvälle modulaatiolle 1/3-oktaavikaistojen tasoissa.

Menetelmässä modulaatiotaajuus määritetään ensin tehotiheysspektrin avulla ja modulaatiosyvyys eli huipusta huippuun arvot aikatason raakadatasta käyttäen algoritmia, joka pyrkii paikantamaan tuulivoimamelun aiheuttaman sinimuotoiseksi oletetun modulaation huippuarvot havaittua modulaatiotaajuutta hyödyntäen. Idea määrittää modulaatiosyvyys aikatasossa on kehityskelpoinen, koska näin vältetään taajuustason analyysin ongelmat, mutta ehdotettu algoritmi modulaatiosyvyyden määrittämiseksi on kuitenkin melko monimutkainen. Menetelmän ongelmiksi raportoidaan artikkelissa myös muiden melulähteiden aiheuttamat virheelliset amplitudimodulaatiohavainnot ja huippukohtien epäluotettava paikantaminen. Käytettyä algoritmia ei ole julkaisussa myöskään raportoitu yksityiskohtaisesti. Artikkelissa pohditaan myös raakasignaalin alipäästösuodattamista huipusta huippuun arvojen määrittämisen helpottamiseksi ehdotetulla algoritmilla, mutta suodatusta ei kuitenkaan toteutetussa datan analyysissä käytetty.

Suoraan sovellettavaksi tässä tutkimuksessa ehdotettu menetelmä ei sovi, mutta modulaatiosyvyyden määrittäminen aikatasossa ja raakasignaalin alipäästösuodattaminen todettiin hyödyllisiksi ideoiksi.

4.2.3 Menetelmä 3

Japanilaisessa 2011 julkaistussa tutkimuksessa tutkittiin amplitudimodulaation voimakkuuden ja äänen häiritsevyyden yhteyttä kuuntelukokein [6]. Tutkimuksessa ehdotetaan ja käytetään menetelmää modulaatiosyvyyden määrittämiseksi äänitiedostoina tallennetusta datasta, koehenkilöille toistettavien eri tasoista modulaatiota sisältävien koesignaalien generoimiseksi. Menetelmässä äänitiedostoina tallennetusta datasta lasketaan ensin spektrogrammi. Näin aineisto saadaan käytännössä 1/3-oktaavikaistoina tallennettua dataa muistuttavaan muotoon, jossa kaistojen taajuusalueet määräytyvät spektrogrammin laskennassa käytetyn Fourier-muunnoksen taajuusresoluutiosta. Spektrogrammin tuottamille taajuuskaistoille lasketaan seuraavaksi uudestaan FFT (tasot muunnettuna paineeksi) ja mikäli tässä modulaatiospektrissä näkyy piikki, valitaan spektristä modulaation perustaaajuutta vastaava suurin taajuuskomponentti ja keskimääräistä tasoa kuvaava DC-komponentti. Tämän jälkeen kahdesta taajuuskomponentista koostuva signaali käänteismuunnetaan takaisin aikatasoon. Modulaatiosyvyys määritetään aikatasossa sinimuotoisen signaalin huipusta huippuun arvona käyttämällä yhtälöä

$$\Delta L = L_h - L_l = 20 \log(p_h/p_l), \quad (4.3)$$

jossa L_h ja p_h ovat sinimuotoisesti vaihtelevan äänenpainetason ja paineen maksimi-arvoja ja L_l sekä p_l vastaavia minimiarvoja. Menetelmässä melua mallinnetaan siis puhtaasti sinimuotoisena signaalina.

Kuvattu menetelmä olisi sovellettavissa tämän työn aineistona käytettyyn 1/3-oktaavidataan lukuunottamatta ensimmäistä vaihetta eli spektrogrammin laskentaa. Määrittämällä modulaatiosyvyys aikatasossa, vältetään taajuustason menetelmiin liittyvät ongelmat amplitudin määrittämisessä.

Menetelmän soveltaminen tämän työn aineistona olevaan dataan ei kuitenkaan ole täysin ongelmattonta. Kuten aiemmin todettiin, kuvan 4.1 amplitudimodulaatiospektristä nähdään, että merkittävä osa signaalin energiasta on myös toisella harmonisella. Huomioimalla ainoastaan DC-komponentti ja perustaaajuutta vastaava taajuuskomponentti, saataisiin siten todellista pienempi arvio modulaatiosyvyydestä. Toinen harmoninen tulisi siis huomioida käyttämällä yksittäisten taajuuskomponenttien valinnan sijaan esimerkiksi suorakaideikkunaa, joka sisällyttää DC-komponentin ja perustaaajuuden lisäksi myös toisen harmonisen.

Signaalin suodattaminen valitsemalla yksittäisiä taajuuskomponentteja tai ikkunoimalla ja käänteis-

muuntamalla ei ole myöskään signaalinkäsittelyn näkökulmasta ongelmattonta. Suorakaideikkunoinnin (esim. edellä kuvattu perustajuuden ja toisen harmonisen sisältämä suorakaideikkuna) aiheuttaman epäjatkuvuuden vuoksi lopputuloksena saatavassa signaalissa on mukana Gibbsin ilmiön aiheuttamaa värähtelyä [13]. Näin toteutetun 'suotimen' vaste on siten tuntematon. Ennakoitavan ja luotettavan suotimen suunnittelemiseksi tulisi käyttää suodinsuunnittelussa vakiintuneita ja jatkuvia suodinfunktioita [13].

Edellä mainitun DFT:n keskiarvoittavan laskennallisen ominaisuuden vuoksi tarkastellulta aikaväliltä saadaan modulaatiosyvyydeksi perustajuuden keskimääräinen huipusta huippuun arvo, joten nopeita muutoksia modulaatiosyvyydessä ei menetelmän avulla voida tarkastella.

Artikkelissa ehdotettu menetelmä todettiin kolmen arvioidun artikkelin menetelmistä parhaiten sovellettavaksi käytössä olevan datan analyysiin. Menetelmää voidaan käyttää amplitudimodulaation havaitsemisen lisäksi myös modulaatiosyvyyden arviointiin, mutta toisen harmonisen huomiotta jättämisen epäiltiin aiheuttavan arvioon liian suurta virhettä. Myös taajuustasossa taajuuskomponentteja valitsemalla toteutettu suodatus todettiin ongelmalliseksi.

4.2.4 Edelleen kehitetty menetelmä modulaatiosyvyyden määrittämiseksi

Viitteen [6] menetelmää (menetelmä 3) kehitettiin edelleen edellä mainittujen ongelmien (toisen harmonisen huomiotta jättäminen ja taajuustason suorakaideikkunoinnin aiheuttama värähtely) välttämiseksi. Tässä työssä sovellettu menetelmä voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

1. jokaisesta 1/3-oktaavikaistasta lasketaan FFT-algoritmia käyttäen amplitudimodulaatiospektri jaksollisuuden havaitsemiseksi ja modulaatiotaajuuden määrittämiseksi
2. mikäli amplitudimodulaatiospektreissä havaitaan ympäristöstään erottuva piikki tuulivoimalan pyörimisnopeutta vastaavalla modulaatiotaajuusalueella, aikatason raakasignaali suodatetaan Matlab:n vaihesiirron poistavalla (zero-phase filtering) `filtfilt()` funktiolla toteutetulla alipäästösuotimella, jonka estotaajuus asetetaan 0.2 Hz odotettavissa olevan toisen harmonisen taajuuden yläpuolelle tuulivoimalan pyöriessä suurimmalla pyörimisnopeudellaan
3. modulaatiosyvyys määritetään manuaalisesti alipäästösuodatetun aikatason signaalin huipusta huippuun arvosta viitteen [6] menetelmää mukaillen.

4.3 Menetelmien soveltaminen aineistoon

Tässä osassa edellä esiteltyjä analyysimenetelmiä sovelletaan työn rajauksessa esitetyt kriteerit täyttävään dataan. Edellisessä osassa (4.2.4) ehdotetun modulaatiosyvyyden määrittämiseen käytettävän menetelmän tuloksia verrataan viitteessä [6] ehdotetun menetelmän (menetelmä 3) tuottamiin tuloksiin.

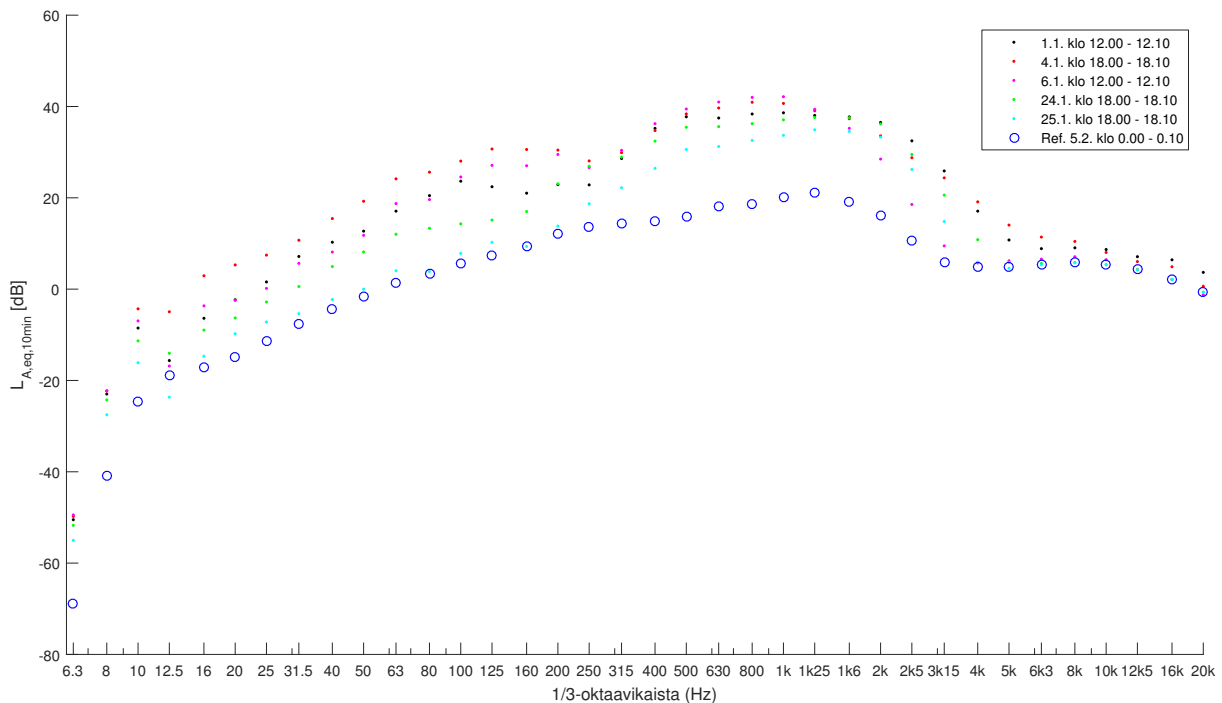
4.3.1 Tutkittu aineisto

Kahdelta ensimmäiseltä mittausjaksolta löydettiin 17 tapausta, jotka täyttävät sivulla 10 esitetyt kriteerit. Näiden 17:sta tapauksen lisäksi aineistoon otettiin mukaan referenssiksi ajankohta, jolloin kaikkien tuulipuiston voimaloiden tiedetään olleen pysähdyksissä.

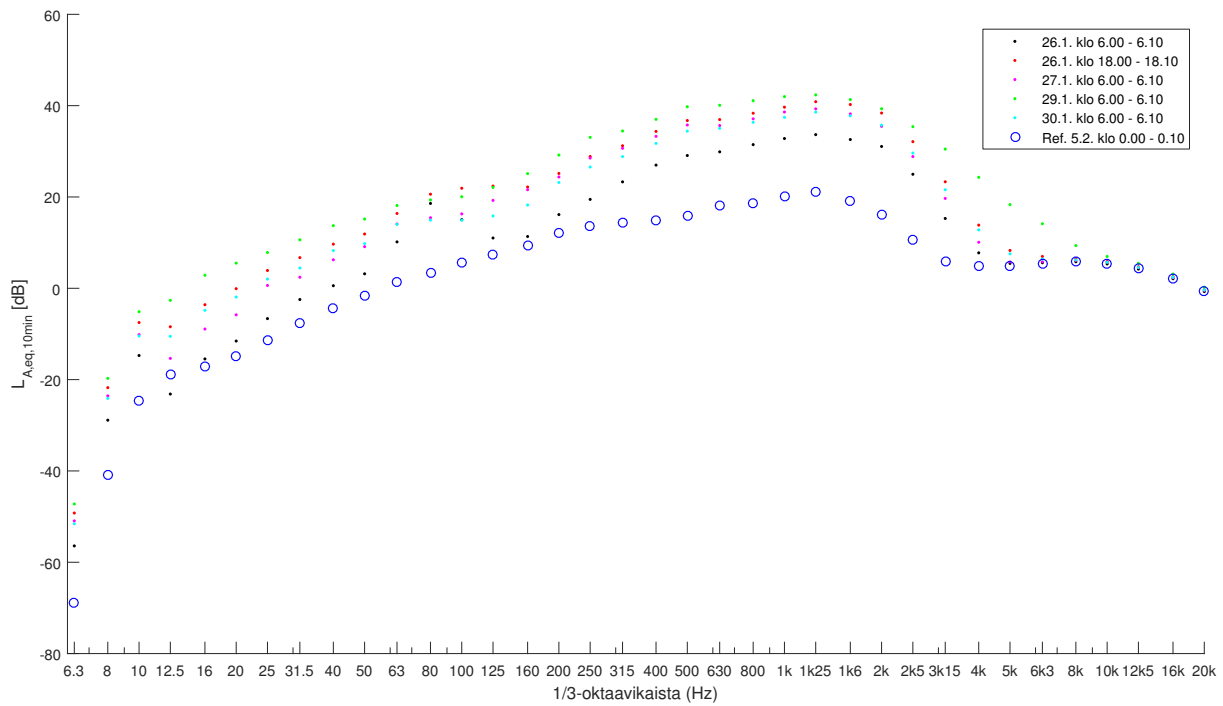
4.3.2 Taajuussisältö

Melun taajuussisältöä arvioitiin laskemalla valittujen 10 minuutin näytteiden 1/3-oktaavikaistadatasta A-painotetut ekvivalenttitasot käyttäen yhtälöitä (3.4), (3.6) ja (3.7). A-painotusta käytettiin, että tuloksia voidaan verrata aiempien tutkimusten havaintoihin. Vastaavat kuvaajat laskettiin myös käyttäen Z-painotusta, koska matalimpia taajuuksia voimakkaasti vaimentavan A-painotuksen käyttämistä tuulivoimamelun mittaamisessa on kritisoitu tarkoitukseen huonosti soveltuvaksi [21]. Z-painotetuista ekvivalenttitasoista ei kuitenkaan todettu saatavan merkittävää lisäinformaatiota. Selkein ero A-painotettuihin tasoihin oli alle 100 Hz kaistojen suhteellisten tasoerojen korostuminen, jolloin taajuusjakauma sai kampsuodinmaisen muodon. Tämän epäiltiin johtuvan mikrofonin sijoittamisesta lähelle rakennuksen seinää, jolloin heijastukset voisivat tuottaa havaitun ilmiön.

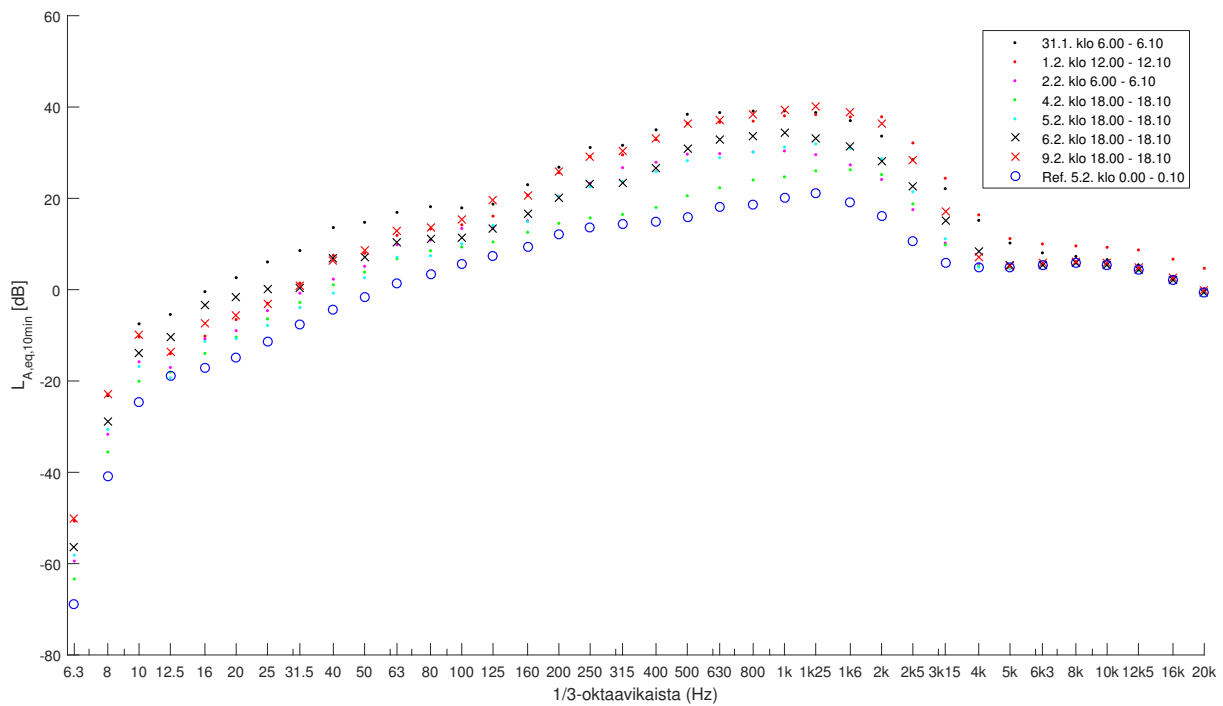
Kuvissa 4.2, 4.3 ja 4.4 on esitetty 17 havaintoajankohdan 1/3-oktaavikaistojen 10 minuutin A-painotetut ekvivalenttitasot $L_{A,eq,10\ min}$ taajuusalueella 6.3 Hz – 20 kHz. Tulokset on jaettu kolmeen erilliseen kuvaan selkeyden vuoksi. Referenssiajankohdan 5.2.2015 klo 0.00 - 0.10, jolloin kaikkien voimaloiden tiedetään olleen pysähdyksissä, A-painotetut ekvivalenttitasot ovat kaikissa kuvissa merkitty sinisellä ympyräsymbolilla.



Kuva 4.2: A-painotetut ekvivalenttitasot $L_{A,eq,10\ min}$ 1/3-oktaavikaistoittain mittausajankohdilta 1.1. - 25.1. ja referenssi 5.2.



Kuva 4.3: A-painotetut ekvivalenttitasot $L_{A,eq,10\ min}$ 1/3-oktaavikaistoittain mittausajankohdilta 26.1. - 30.1. ja referenssi 5.2.



Kuva 4.4: A-painotetut ekvivalenttitasot $L_{A,eq,10\ min}$ 1/3-oktaavikaistoittain mittausajankohdilta 31.1. - 9.2. ja referenssi 5.2.

Kuvista 4.2, 4.3 ja 4.4 voidaan todeta, että voimaloiden ollessa pysähdyksissä, tasot ovat kaikilla kaistoilla alemmat kuin voimaloiden ollessa käynnissä. Kuvaajista nähdään myös, että voimaloiden ollessa käynnissä tasot nousevat referenssiin verrattuna taajuusalueella 6.3 Hz - 8 kHz suurimpien muutosten tapahtuessa kaistoilla 125 Hz - 2 kHz. Havainto on samansuuntainen aiempien tuulivoimaloiden taajuussisältöä määrittäneiden tutkimusten tulosten kanssa [16, 22].

4.3.3 Amplitudimodulaatio

Tuulivoimaloiden aiheuttamien modulaatiotaajuuksien havaitsemiseksi amplitudimodulaatiospektreistä, odotettavissa olevaa perustaaajuutta arvioitiin tuulipuiston voimalatyypin datalehden perusteella. Kuten aiemmin todettiin, tuulivoimaloiden tuottaman äänen amplitudimodulaation on havaittu aiheutuvan lapojen pyörimisliikkeestä [3, 8]. Muukonkankaan tuulipuiston voimalat ovat Alstom yhtiön ECO 110 tuuliturbiineja ja ECO 100 tuoteperheen datalehdellä ilmoitetaan ECO 110 turbiinin pyörimisnopeudeksi 7.7 - 13.6 r/min [23]. Roottori pyörii siten yhden kierroksen 4.4 - 7.79 sekunnissa ja tällöin yksi kolmesta lavasta ohittaa saman pisteen 1.47 - 2.60 sekunnin välein. Odotettavissa oleva amplitudimodulaation perustaaajuus olisi näin ollen välillä 0.39 - 0.68 Hz.

4.3.3.1 Amplitudimodulaatiohavainnot

Amplitudimodulaatiota sisältävät näytteet pyrittiin tunnistamaan laskemalla 17 ajankohdalta kaikkien 1/3-oktaavikaistojen 10 minuutin amplitudimodulaatiospektrit. Kriteerinä havainnolle tuulivoimaloiden aiheuttamasta modulaatiosta asetettiin amplitudimodulaatiospektreissä visuaalisesti ympäristöstään erottuva piikki modulaatiotaajuusalueella 0.39 - 0.68 Hz useammalla kuin yhdellä kaistalla. Havainnot varmennettiin tuulivoimaloiden aiheuttamiksi kuuntelemalla myös ajankohtien ääninäytteet.

Amplitudimodulaatiota havaittiin spektrien perusteella 17 ajankohdan mittauksista kuudessa tapauksessa. 10 minuutin amplitudimodulaatiospektrien perusteella selkein havainto modulaatiosta todettiin 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 tallennetusta näytteestä, jonka amplitudimodulaatiospektreistä piikit erottuivat useammilla kaistoilla ja ympäristöstään selkeämmin kuin muiden ajankohtien spektreissä. Kyseiseltä ajankohdalta on havaintopäiväkirjamerkintä ulkona kuuluvasta melusta kahdesta tuulipuiston läheisyydessä sijaitsevasta taloudesta. Mittauslaitteisto oli asennettuna kohteessa noin 800 metrin päähän lähimmästä tuulipuiston voimalasta.

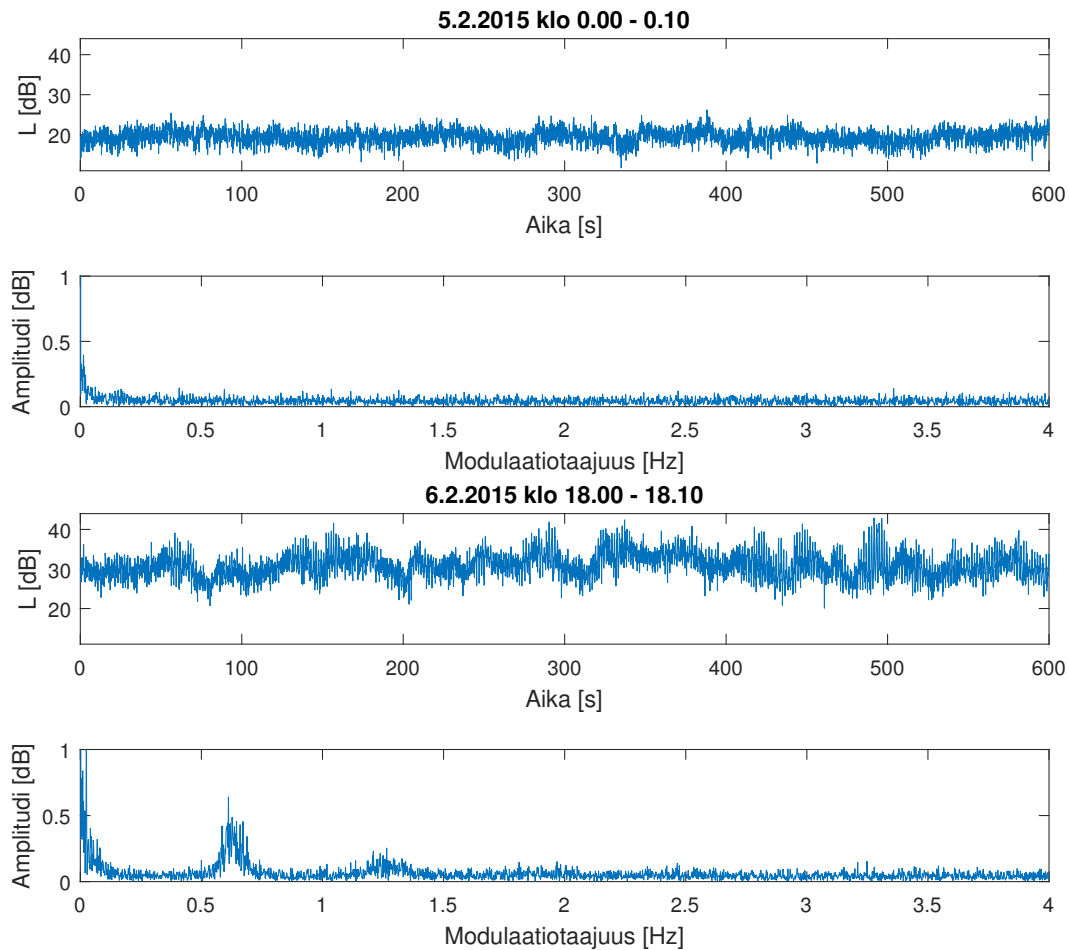
6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 ajankohdan raakadata 400 Hz kaistalta ja sen amplitudimodulaatiospekttri sekä vertailun vuoksi referenssiajankohdan 5.2.2015 klo 0.00 - 0.10 vastaavat kuvaajat on esitetty kuvassa 4.5. Referenssiajankohdan amplitudimodulaatiospektreistä nähdään, ettei odotetulla modulaatiotaajuusalueella 0.39 - 0.68 Hz ole nähtävissä viitteitä jaksollisista ilmiöistä, kun taas havaintoajankohdan spektrissä nähdään selkeästi erottuvat piikit noin 0.62 Hz (perustaaajuus) ja 1.25 Hz (toinen harmoninen) modulaatiotaajuuksien ympäristössä.

Kuuden havaintoajankohdan dataa tutkittiin tarkemmin laskemalla kaistojen amplitudimodulaatiospektrit lyhyemmällä 30 sekunnin näytepituudella modulaation paikantamiseksi täsmällisemmin ja modulaatiotaajuuden määrittämiseksi. Kuvissa 4.10, 4.11 ja 4.12 (sivuilla 32 - 34) on esitetty kaikkien 1/3-oktaavikaistojen 30 sekunnin amplitudimodulaatiospektrit 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 ajankohdalta näytteestä, jolla modulaation havaittiin olevan voimakkainta. Näyte vastaa 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 raakadatan aikaväliä 475 s - 505 s kuvassa 4.5. Kaistojen 125 Hz - 5 kHz spektreissä modulaatiotaajuudella 0.63 Hz erottuva perustaaajuuden piikki vastaa 12.6 r/min pyörimisnopeutta, jonka voidaan olettaa olevan lähellä nimellistehollaan toimivan ECO 110 turbiinin pyörimisnopeutta perustuen edellä esitettyyn laskelmaan odotettavissa olevasta modulointitaajuusalueesta turbiinin datalehden tietojen perusteella.

4.3.3.2 Amplitudimodulaatiospektrien ominaispiirteet

Sekä 10 minuutin että 30 sekunnin amplitudimodulaatiospektreistä havaittiin useita toistuvasti esiintyviä ominaispiirteitä.

Tuulivoimaloiden aiheuttaman modulaation perustaaajuutta vastaavat piikit olivat havaittavissa selvimmän 1/3-oktaavikaistoilla 125 Hz - 4 kHz. Amplitudiltaan suurimmat piikit havaittiin yleisimmin



Kuva 4.5: Ylimmässä kuvaajassa on esitetty referenssiajankohdan 400 Hz kaistan 10 minuutin raakadata ja sen alla sitä vastaava amplitudimodulaatiospektri. Alimmassa kuvaajassa on 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 tallennetun havainnon amplitudimodulaatiospektri ja sen yllä sitä vastaava 400 Hz kaistan raakadata. Referenssiajankohdan yhtälöiden (3.2) ja (3.3) mukaisesti laskettu keskimääräinen taso on 19.6 dB ja 6.2. ajankohdan vastaava taso 31.5 dB. Referenssiajankohdan amplitudimodulaatiospektristä nähdään ettei odotetulla modulaatiotaajuusalueella 0.39 - 0.68 Hz ole nähtävissä viitteitä jaksollisista ilmiöistä kun taas havaintoajankohdan spektrissä nähdään piikit keskittyen noin 0.62 Hz ja 1.25 Hz modulaatiotaajuuksien ympäristöön.

400 Hz kaistalla tai sen ympäristössä. Tämä nähdään myös kuvien 4.11 ja 4.12 amplitudimodulaatiospektreistä, joissa 0.63 Hz modulaatiotaajuuden perustaaajuutta vastaava piikki alkaa erottua 125 Hz kaistalla ja on juuri erotettavissa ympäristöstään 5 kHz kaistalla. Amplitudiltaan suurin piikki on 400 Hz kaistalla.

Tuulivoimaloiden aiheuttaman amplitudimodulaation perustaaajuuden ja toisen harmonisen piikit huomattiin myös ilmenevän useilla vierekkäisillä kaistoilla täsmälleen samalla modulaatiotaajuudella (kuvissa 4.11 ja 4.12 perustaaajuutta vastaavat piikit modulaatiotaajuudella 0.63 Hz), kun muun ympäristömelun aiheuttamat selkeästi erottuvat piikit jakaantuivat eri kaistoilla satunnaisesti modulointitaajuusalueelle 0 - 4 Hz.

Kaistoilla 5 kHz - 20 kHz ei tehty modulaatiohavaintoja tutkituista näytteistä. Kuvassa 4.12 nähdään tyypillinen esimerkki näiden kaistojen havainnoista, joilla ei ole erotettavissa viitteitä jaksollisista ilmiöistä. Kaistat 12.5 Hz - 100 Hz olivat sitä vastoin poikkeuksetta muun ympäristömelun aiheuttaman modulaation 'saastuttamia' siinä määrin ettei piikkejä voitu tällä modulaatiotaajuusalueella erottaa, vaikka kaistojen 6.3 Hz - 10 Hz ja 125 Hz - 4 kHz spektrien perusteella ajankohdalta olisi havainto tuulivoimaloiden aiheuttamasta modulaatiosta. Kuvan 4.10 spektrit ovat kuvaava esimerkki näiden kaistojen havainnoista: spektreistä ei ole erotettavissa piikkejä, jotka olisivat samoilla modulaatiotaajuuksilla useammalla kaistalla, mutta satunnaisilla modulaatiotaajuuksilla nähdään piikkejä

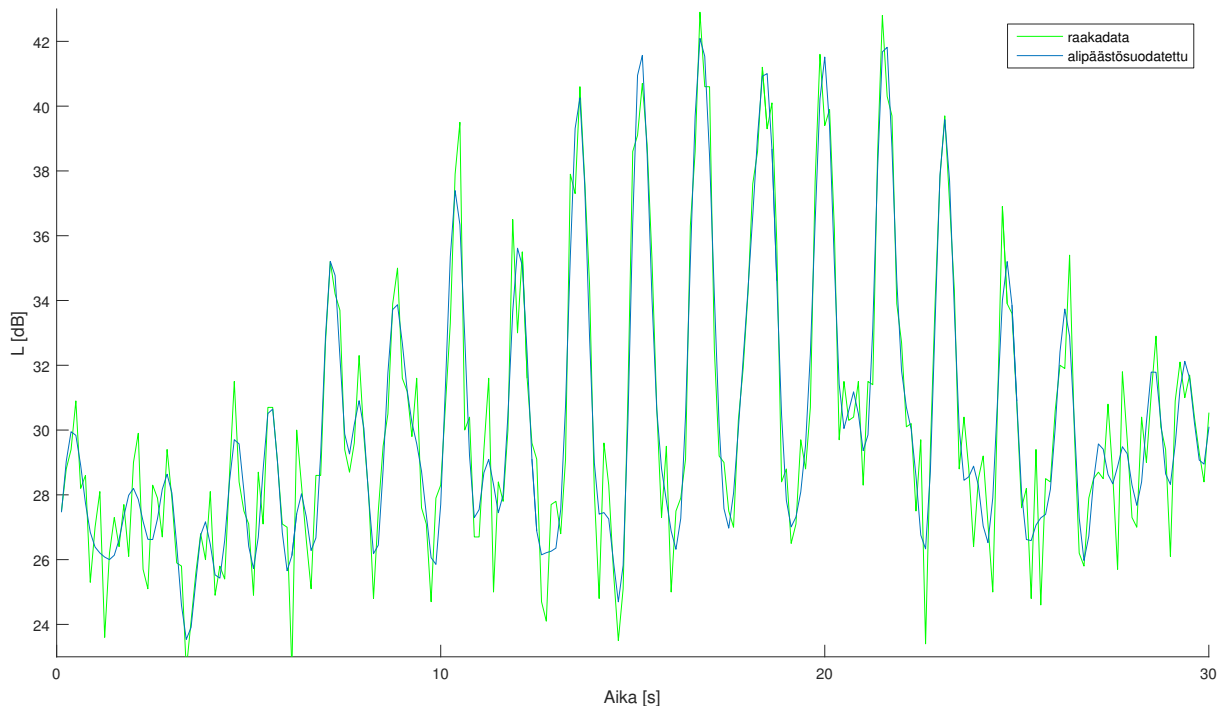
suurillakin amplitudeilla.

Modulaatiohavaintojen erottumisesta spektreistä selkeimmin keskitaajuuksilla ja piikkien ilmenemisestä samalla modulaatiotaajuudella useilla kaistoilla on raportoitu myös viitteessä [18], jossa modulaatiotaajuuden luotettavan määrittämisen kannalta oleellisimmiksi todetaan kaistat 250 Hz - 1 kHz. Havaintoa on käytetty viitteen algoritmissa tuulivoimaloiden aiheuttaman amplitudimodulaation tunnistamiseksi muun ympäristömelun aiheuttamasta modulaatiosta.

Amplitudimodulaatiota havaittiin 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 tallennetun näytteen spektreistä myös kolmella alimmalla kaistalla. Kuvan 4.10 kaistojen 6.3 Hz, 8 Hz ja 10 Hz spektreistä nähdään, että perustaaajuuden piikki on samalla 0.63 Hz taajuudella, kuin kaistoilla 125 Hz - 4 kHz. Perustaaajuutta ja toista harmonista vastaavien piikkien lisäksi 8 Hz kaistalla nähdään myös kolmas harmoninen taajuudella 1.89 Hz sekä alimmalla 6.3 Hz kaistalla harmoniset erottuvat jopa kuudenteen harmoniseen saakka. Modulaation ja korkeiden harmonisten erottuminen selkeästi näin matalalla taajuudella oli yllättävä tulos, koska aiemmissa tutkimuksissa ei ole raportoitu havaintoja näin matalilla taajuuksilla ilmenevästä modulaatiosta [7]. Toisaalta kolmen alimman kaistan tasot ovat reilusti kuulokynnyksen alapuolella, kuten kuvien 4.2, 4.3 ja 4.4 ekvivalenttitasoista nähtiin. Kolmella alimmalla kaistalla amplitudimodulaatiota havaittiin tutkitusta 17 tapauksesta kahden muun ajankohdan datasta eli kolmessa kuudesta amplitudimodulaatiohavainnosta.

4.3.3.3 Modulaatiosyvyyden määrittäminen

Modulaatiosyvyys määritettiin osassa 4.2.4 kuvatun menetelmän mukaisesti alipäästösodatetusta aikatazon signaalista. Esimerkkinä menetelmästä modulaatiosyvyyden määrittämiseen käytetään 30 sekunnin näytettä 400 Hz kaistalta, jolta on laskettu myös kuvissa 4.10, 4.11 ja 4.12 esitetyt amplitudimodulaatiospektrit.



Kuva 4.6: 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 ajankohdan 400 Hz kaistan raakadata ja alipäästösodatettu data vastaten kuvien 4.5 ja 4.7 aikaväliä 475 s - 505 s. Suurin hetkellinen huipusta huippuun arvo on 17.2 dB. Keskimääräinen modulaatiosyvyys aikavälillä on 11.1 dB ja 12 sekunnin aikavälillä 13 s - 25 s, jolla modulaatio on voimakkaimmillaan, keskimääräisen modulaatiosyvyyden määritettiin olevan 14.2 dB.

Suodin suunniteltiin MATLAB:n `fdesign()` ja `design()` funktioilla ja suodatus toteutettiin `filtfilt()` funktiolla seuraavilla parametreillä:

- vaste: Type II Chebyshev
- ylempi päästötaajuus: 1.45 Hz
- ylempi estotaajuus: 1.6 Hz
- estokaistojen vaimennus: 30 dB
- päästökaistan rippeli: 1 dB

400 Hz kaistan raakadata ja alipäästösuodatettu data on esitetty kuvassa 4.6. Modulaatiosyvyys määritettiin suodatetun signaalin kuvaajasta manuaalisesti ja suurimmaksi huipusta huippuun arvoksi saatiin 17.2 dB. Keskimääräinen modulaatiosyvyys 30 sekunnin aikavälillä laskettiin olevan 11.1 dB. Lyhyemmällä 12 sekunnin aikavälillä 13 s - 25 s, jolla modulaatio on voimakkaimmillaan, keskimääräisen modulaatiosyvyyden määritettiin olevan 14.2 dB. Keskiarvot laskettiin käyttämällä yhtälöä (3.3) ottamatta huomioon alle 1.5 dB huipusta huippuun arvoja, jotka aiheutuvat suodatuksesta huolimatta jäljelle jääneestä kohinasta.

Samaan 30 sekunnin näytteeseen sovellettiin vertailun vuoksi viitteen [6] menetelmää. Menetelmän soveltaminen käsitti seuraavat vaiheet:

1. näyte $s(t)$ muunnettiin äänenpainetasoista paineeksi ratkaisemalla yhtälö (3.1) hetkellisen paineen p_i suhteen eli $p_i = p_0 10^{L_i/20}$
2. näytteestä laskettiin Fourier muunnos $S(f_{mod})$ FFT algoritmilla
3. ja magnitudispektri $|S(f_{mod})|$
4. magnitudispektrin perusteella vektorista $S(f_{mod})$ valittiin DC komponenttia ja perustaaajuutta vastaavat alkiot asettamalla vektorin muut alkiot nollassi
5. 'suodatetusta' vektorista $S'(f_{mod})$ laskettiin IFFT
6. käänteismuunnettu vektori $s'(t)$ muunnettiin takaisin äänenpainetasoiksi yhtälön (3.2) mukaisesti
7. modulaatiosyvyys määritettiin sinimuotoisen signaalin $s'(t)$ huipusta huippuun arvosta.

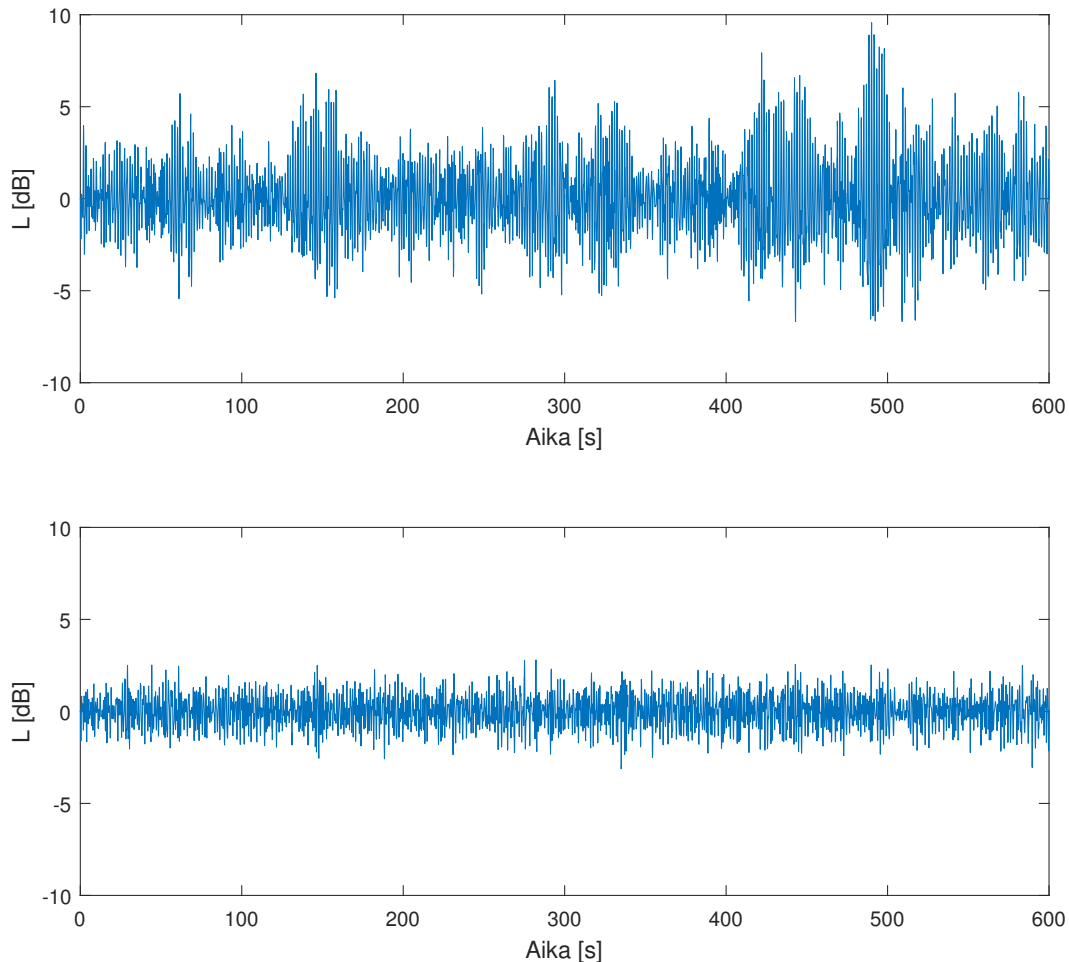
Kuten osassa 4.2.3 todettiin, tuloksena saadut modulaatiosyvyydet ovat menetelmän luonteesta johtuen valitun aikavälin keskimääräisiä modulaatiosyvyyksiä. 30 sekunnin aikavälin keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi saatiin 9.7 dB. Laskenta toistettiin lyhyemmälle 13 s - 25 s voimakkaan modulaation aikavälille, jolle keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi saatiin 16.5 dB.

Menetelmien tuottamien tulosten 1.4 dB eroavaisuus 30 sekunnin aikälin keskimääräisessä modulaatiosyvyydessä on melko pieni ja selitettävissä tämän työn alipäästösuodattamista hyödyntävässä menetelmässä toisen harmonisen sisällyttämisellä signaaliin. Erot 12 sekunnin aikavälillä ovat sen sijaan epäloogiset viitteen [6] menetelmän antaessa keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi suuremman lue-man kuin alipäästösuodatetussa signaalissa ja vastaten lähes sen hetkellistä huippuarvoa. Menetelmien 12 sekunnin aikavälille tuottamien tulosten eroavaisuudelle ei löydetty selittävää tekijää.

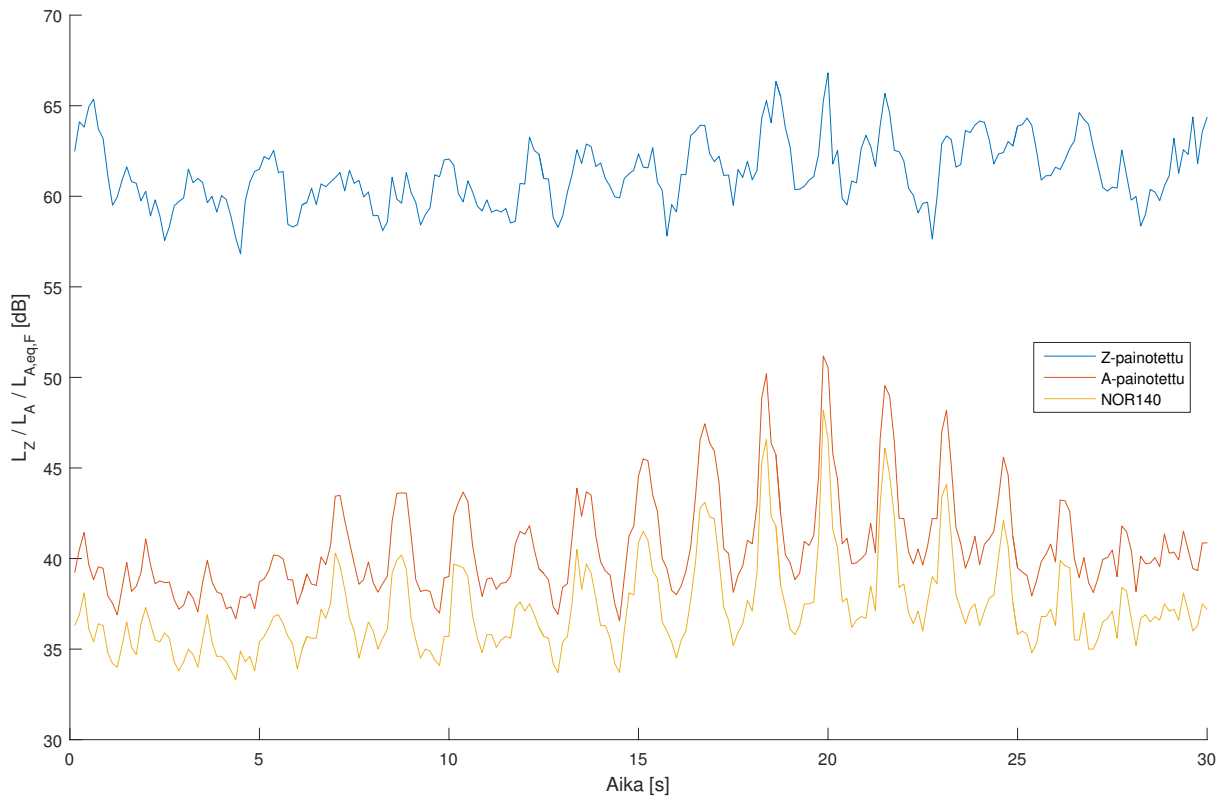
Kuvasta 4.6 nähdään myös amplitudimodulaation luonne muutamien kymmenien sekuntien aikaskaalassa voimistuvana ja vaimentuvana ilmiönä. Modulaatiosyvyyden satunnainen voimistuminen ja vaimentuminen pidemmällä aikavälillä saadaan näkyviin datasta kaistanpäästösuodattamalla 10 minuutin raakadastasta korkeataajuinen kohina ja tasojen hitaat muutokset. Kaistanpäästösuodin toteutettiin kuten edellä MATLAB:n `fdesign()`, `design()` ja `filtfilt()` funktiolla seuraavilla parametreillä:

- vaste: Type II Chebyshev
- alempi estotaajuus: 0.35 Hz
- alempi päästötaajuus: 0.39 Hz
- ylempi estotaajuus: 1.4 Hz
- ylempi päästötaajuus: 1.45 Hz
- estokaistojen vaimennus: 30 dB
- päästökaistan rippeli: 1 dB

Kaistanpäästösuodatettu data referenssiajankohdalta ja 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10 havaintoajankohdalta on esitetty kuvassa 4.7. Havaintoajankohdan modulaatiosyvyyden stokastinen luonne sopii aiempien tutkimusten kuvauksiin voimistuneesta amplitudimodulaatiosta (EAM) [15, 16]. 800 metrin etäisyyteen nähden suuret modulaatiosyvyydet edellä käsitellyllä 30 sekunnin aikavälillä tukevat EAM havaintoa, mutta toisaalta tuulen vaikutus melun kantautumiseen mittauspisteeseen voi olla selittävä tekijä modulaatiosyvyyden satunnaiselle vaihtelulle.



Kuva 4.7: Ylemmässä kuvaajassa kaistanpäästösuodatettu näyte ajankohdalta 6.2.2015 klo 18.00 - 18.10, jolta on havainto amplitudimodulaatiosta. Alla vastaavalla tavoin suodatettu näyte referenssiajankohdalta 5.2.2015 klo 6.00 - 6.10, jolloin voimaloiden tiedetään olleen pysähdyksissä. Ylemmästä kuvasta nähdään modulaation voimakkuuden luonne satunnaisesti voimistuvana ja vaimentuvana ilmiönä.



Kuva 4.8: 1/3-oktaavikaistoista lasketut Z- ja A-painotetut sekä Nor140 tallentamat $L_{A,eq,F}$ tasot kuvia 4.6, 4.10, 4.11 ja 4.12 vastaavalta 30 sekunnin aikaväliltä. Yksittäisillä 1/3-oktaavikaistoilla (kuva 4.6) ja $L_{A,eq}$ tasoissa havaittava sinimuotoinen modulaatio ei erotu yhtä selkeästi Z-painotetuista tasoista.

4.3.3.4 Menetelmän soveltaminen ekvivalenttitasoihin

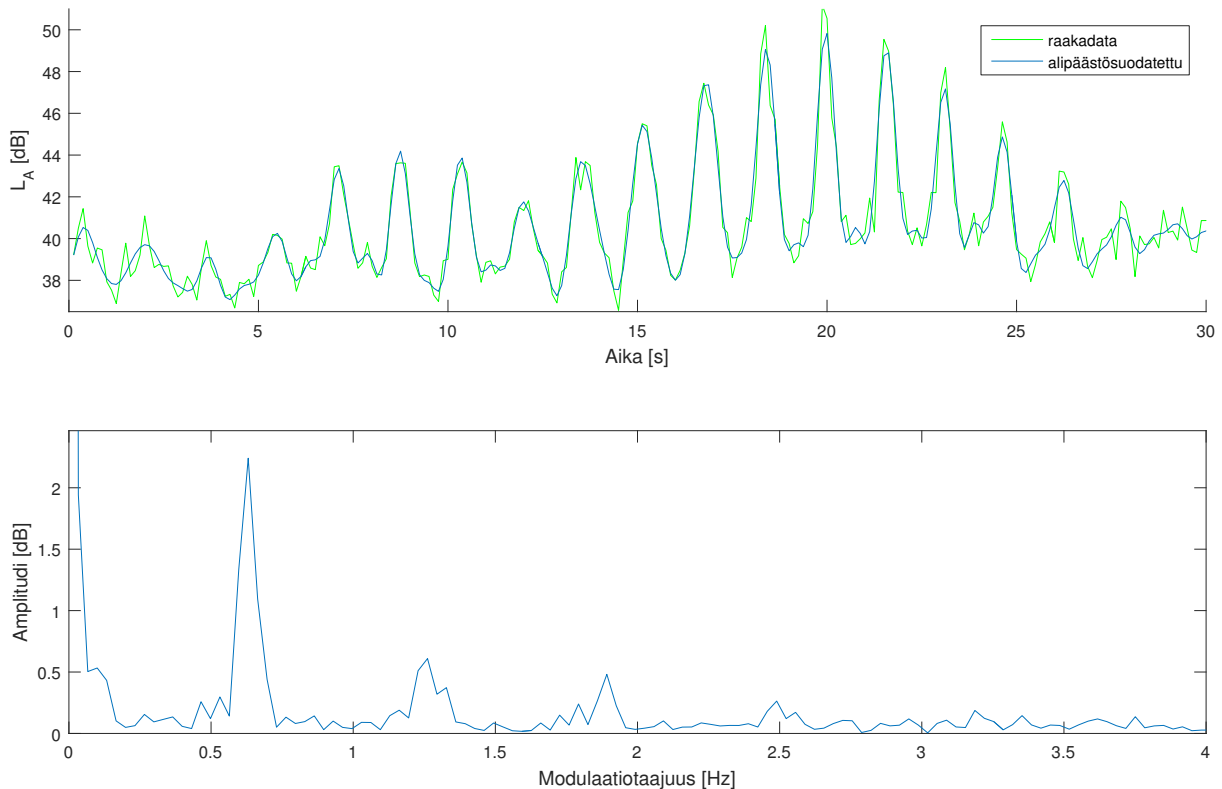
Edellä käsiteltyä modulaatiosyvyyttä yksittäisellä 1/3-oktaavikaistalla ei voida käyttää modulaatiosyvyyden arviointiin äänessä kokonaisuutena. Modulaatiosyvyyden määrittämiseksi koko mitatulla taajuusalueella 6.3 Hz - 20 kHz, 1/3-oktaavikaistoina tallennetusta raakadatasta laskettiin A-painotetut äänenpainetasot L_A edellä tarkastellulta 30 sekunnin aikaväliltä soveltaen yhtälöitä (3.5), (3.6) ja (3.7). Vertailun vuoksi laskettiin myös Z-painotetut (eli painottamaton) tasot ko. aikaväliltä eli hetkellisiin 1/3-oktaavikaistojen tasoihin sovellettiin suoraan yhtälöä (3.5). Lasketut A- ja Z-painotetut tasot on esitetty kuvassa 4.8, jossa on vertailun vuoksi myös Nor140 aikavakiolla F tallentama $L_{A,eq,F}$ taso.

Z-painotetut tasot ovat odotetusti huomattavasti korkeammat, mutta huomionarvoista on se, ettei sinimuotoinen modulaatio ole selvästi erotettavissa Z-painotetuista tasoista. Sitä vastoin A-painotetuista tasoista modulaatio erottuu samantyyppisesti kuin yksittäisten 1/3-oktaavikaistojen tapauksessa, kuten edellä kuvan 4.1 400 Hz kaistan raakadataan vertaamalla nähdään. Havaintoa voisi selittää se, että A-painotuksella voimakkaimman modulaation taajuusalue 125 Hz - 4 kHz korostuu vaimennuksen ollessa huomattavasti pienempää (1 kHz taajuudella vaimennus 0 dB) kuin matalilla taajuuksilla 10 Hz - 100 Hz, joilla amplitudispektreistä (kuvat 4.10, 4.11 ja 4.12) ei voitu erottaa tuulivoimaloiden aiheuttamaa jaksollisuutta muun ympäristömelun aiheuttamasta modulaatiosta. Z-painotettuna matalien taajuuksien tasot ovat keskitaajuuksia suuremmat maksimin ollessa tutkituissa näytteissä 10 Hz kaistalla. Eroavaisuus Nor140 tallentamien $L_{A,eq,F}$ ja lasketujen L_A tasojen välillä johtuu mittariin seinän läheisyyden vuoksi asetetusta -6 dB kompensaatiosuodattimen vaikutuksen eliminoimiseksi.

Modulaatiosyvyydet määritettiin L_A tasoista soveltamalla tässä työssä ehdotettua menetelmää ja viitteen [6] menetelmää samoin kuin edellä yksittäiselle 1/3-oktaavikaistalle. Kuvassa 4.9 on esitetty L_A tasoista laskettu amplitudimodulaatiospektri ja alipäästösuodatettu sekä raakadata. Modulaatiosyvyys määritettiin alipäästösuodatetun datan huipusta huippuun arvoista ja keskimääräiset modulaa-

tiosyvydet laskettiin 30 sekunnin aikavälille ja voimakkaimman modulaation 12 sekunnin aikavälille (13 s - 25 s) kuten edellä 400 Hz kaistan tapauksessa. Suurimmaksi huipusta huippuun arvoksi saatiin 10.5 dB ja keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi 30 sekunnin aikavälillä 6.6 dB. Lyhyemmällä 12 sekunnin voimakkaimman modulaation aikavälillä keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi saatiin 8.4 dB. Keskiarvot laskettiin käyttämällä yhtälöä (3.3) ottamatta huomioon alle 1.5 dB huipusta huippuun arvoja, jotka aiheutuvat suodatuksesta huolimatta jäljelle jääneestä kohinasta. Poistamalla kohinan vaikutusta keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi saatiin 30 sekunnin aikavälille 5.5 dB ja 12 sekunnin aikavälille 7.1 dB.

Viitteen [6] menetelmää soveltamalla 30 sekunnin aikavälin keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi saatiin 5.6 dB ja 12 sekunnin aikavälille 9.2 dB. Eroavaisuudet menetelmien tuottamien tulosten välillä ovat samanlaiset kuin yksittäisen 1/3-oktaavikaistan tapauksessa. 30 sekunnin aikavälillä alipäästösodatetusta signaalista saadaan hieman tarkempi arvio modulaatiosyvyydestä, mutta 12 sekunnin aikavälillä tulokset eivät ole loogisia.



Kuva 4.9: Alemmassa kuvaajassa on esitetty L_A tasoista laskettu amplitudimodulaatiospektri ja ylemmässä kuvaajassa 30 sekunnin aikavälin raakadata ja alipäästösodatettu data. Amplitudimodulaatiospektrissä nähdään piikit samoilla modulaatiotaajuuksilla kuin kaistoilla 125 Hz - 4 kHz kuvissa 4.11 ja 4.12 eli perustaaajuudella 0.63 Hz ja toisella harmonisella 1.26 Hz. 1/3-oktaavikaistojen spektreistä poiketen erottuu heikosti myös kolmas harmoninen modulaatiotaajuudella 2.5 Hz. Suodatetun datan kuvaajasta suurimmaksi huipusta huippuun arvoksi saatiin 10.5 dB ja keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi 30 sekunnin aikavälillä 6.6 dB. Lyhyemmällä 12 sekunnin voimakkaimman modulaation aikavälillä (13 s - 25 s) keskimääräiseksi modulaatiosyvyydeksi saatiin 8.4 dB.

4.4 Johtopäätökset

1/3-oktaavikaistojen raakadatasta lasketuista 10 minuutin A-painotetuista ekvivalenttitasoista voitiin todeta, että selkein muutos tasoissa tapahtuu voimaloiden ollessa käynnissä taajuusalueella 6.3 Hz - 5 kHz suurimpien tason muutosten tapahtuessa kaistoilla 125 Hz - 2 kHz. Havainto tukee aiempien tuulivoimaloiden taajuussisältöä määrittäneiden tutkimusten tuloksia [22].

Käytetty analyysimenetelmä amplitudimodulaation havaitsemiseen ja modulaatiosyvyyden määrittämiseen todettiin tulosten perusteella periaatteiltaan toimivaksi. Menetelmä antaa 30 sekunnin aikavälillä hieman tarkemman arvion modulaatiosyvyydestä kuin viitteen [6] ainoastaan perustajuuden huomioiva menetelmä. Lyhyemmällä 12 sekunnin aikavälillä menetelmien tuottamat tulokset poikkesivat toisistaan jopa niin että, viitteen [6] antamaa tulosta voisi luonnehtia virheelliseksi. Toisen harmonisen sisällyttämisen tuoma pienehkö parannus keskimääräisten modulaatiosyvyyksien tarkkuudessa pidemmällä aikavälillä voi kuitenkin olla merkityksetön. Mikäli alle 1.5 dB huipusta huippuun arvot sisällytetään keskiarvon laskentaan, menetelmien tuottamien tulosten ero oli esimerkkinä käytetyn 30 sekunnin näytteessä vain 0.1 dB. Toisaalta asetetun raja-arvon alittavien huipusta huippuun arvojen poistaminen ennen keskiarvon laskentaa on toteutettavissa myös automaattisissa algoritmissa. Tässä työssä ehdotetun menetelmän etuna on kuitenkin myös mahdollisuus tutkia amplitudimodulaation luonnetta yksityiskohtaisemmin.

Kokonaisuuden näkökulmasta on selvää, ettei hetkellisiä tai keskimääräisiä modulaatiosyvyyksiä yksittäisillä kaistoilla voida käyttää suoraan suurena äänen häiritsevyyden arvioinnissa tai suunnitteluohjearvojen pohjana. Viitteessä [6] eri kaistoilta mitattuja modulaatiosyvyyksiä hyödynnetään testisignaalien generoinnissa moduloimalla eri taajuusalueita eri voimakkuudella, mutta esimerkiksi helposti sovellettavien suunnitteluohjearvojen laatimiseksi yksittäisten kaistojen modulaatiosyvyydet eivät vaikuta käytännöllisiltä. A-painotetuista ekvivalenttitasoista menetelmällä saadaan kuitenkin myös tuloksia, joita voisi olla mahdollista hyödyntää häiritsevyyden arvioinnissa ja suunnitteluohjearvojen pohjana. Vaikka A-painotuksen käyttöä tuulivoimamelun yhteydessä on kritisoitu [21], tämän työn tulosten perusteella näyttää siltä, että amplitudimodulaatio on voimakkainta keskitajuuksilla, joilla ihmisen kuuloaisti on herkimmillään [11]. Näin ollen jatkotutkimus amplitudimodulaation merkityksestä tuulivoimamelun häiritsevyydessä olisi perusteltua.

Menetelmän automatisointi on edellytys sille, että sitä voitaisiin käyttää amplitudimodulaation havaitsemiseen ja modulaatiotaajuuden ja modulaatiosyvyyden määrittämiseen suuresta aineistosta. Amplitudimodulaation yleisyyttä ei voida tämän työn pohjalta arvioida, koska analysoitu, asetetut valintakriteerit täyttävä, aineisto kattaa hyvin lyhyen ajanjakson. Todetut amplitudimodulaatiospektrien ominaispiirteet, kuten modulaation erottuminen selkeimmin kaistoilla 125 Hz - 4 kHz, ovat kuitenkin hyödyllisiä havaintoja algoritmin kehittämisessä.

Havaitut hetkelliset modulaatiosyvyydet olivat yllättävän suuria verrattuna aiempien tutkimusten löydöksiin [6, 7, 19]. Esimerkiksi viitteen [6] kuvassa 3 esitetyn raakadatan modulaatiosyvyyden on hetkellisestikin vain 5 dB(A) suuruusluokkaa, vaikka mittauspiste on 62 metrin päässä voimalasta. Tämän työn aineistona käytetty data on tallennettu lähimmillään noin 800 metrin etäisyydellä tuulipuiston lähimmästä voimalasta ja silti suurin hetkellinen modulaatiosyvyyden on kuvassa 4.6 esitetystä esimerkkitapauksessa 10.5 dB aikavälin keskimääräisen modulaatiosyvyyden ollessa 6.6 dB. Toisaalta suurempi etäisyys voisi selittää havaitun modulaatiosyvyyden voimakkaan satunnaisen vaihtelun, jota ei ole havaittavissa viitteen [6] kuvassa 3 esitetystä datasta todennäköisesti juuri lyhyen välimatkan vuoksi.

4.5 Pohdintaa

Aineiston analysointi osoittautui huomattavasti ennakoitua hankalammaksi useastakin syystä. Taajuussisällön määrittämistä vaikeutti odotettua voimakkaampi muu ympäristömelu ja modulaatiosyvyyden määrittäminen osoittautui ongelmalliseksi ko. ilmiön nopean, muutamien sekuntien aikaskaalassa tapahtuvan vaihtelun vuoksi. Stationäärisempien ilmiöiden yhteydessä soveliaat taajuustason analyysimenetelmät eivät sovellu siten kovin hyvin tuulivoimamelun modulaatiosyvyyden määrittämiseen. Myös datan valtava määrä hankaloittaa analyysiä ja johtopäätöksen muodostamista sen pohjalta. Aineiston rajaaminen havaintopäiväkirjojen havaintojen perusteella oli välttämätöntä manuaalisesti analysoitavan aineiston koon rajaamiseksi tämän työn laajuudessa hallittavaksi, mutta rajauksen vuoksi amplitudimodulaation yleisyyden ei voitu ottaa kantaa. Ilmiön yleisyyden arviointi ei ollut

kuitenkaan tämän työn tavoitteena ja analysoidusta pienehköstä aineistosta löydettiin esimerkkejä eri tyyppisistä havainnoista ja sitä kautta amplitudimodulaatiospektreissä erottuvista ominaispiirteistä, joita voidaan käyttää hyväksi analyysimenetelmän ja siihen perustuvan algoritmin jatkokehityksessä.

Modulaatiosyvyyden määrittämistä alipäästösuodatetusta aikatason datasta automaattisesti kokeiltiin interpoloimalla suodatettu data spline sovituksella pienestä näytteistystaajuudesta johtuvien terävien kohtien poistamiseksi. Paikantamalla interpoloidun signaalin huippukohdat numeerista derivaattaa soveltamalla, signaalin huipusta huippuun arvot voitiin määrittää automaattisesti. Myös havaittuja amplitudimodulaatiospektrien ominaispiirteitä onnistuttiin hyödyntämään tuulivoimaloiden aiheuttaman modulaation erottamisessa muusta ympäristömelusta. Ideat todettiin toimiviksi, ja menetelmää jatkokehitettiin automaattiseksi algoritmiksi, jonka kehittämistä, testaamista ja tuloksia käsitellään tätä työtä seuraavassa sovelletun elektroniikan erikoistyössäni.

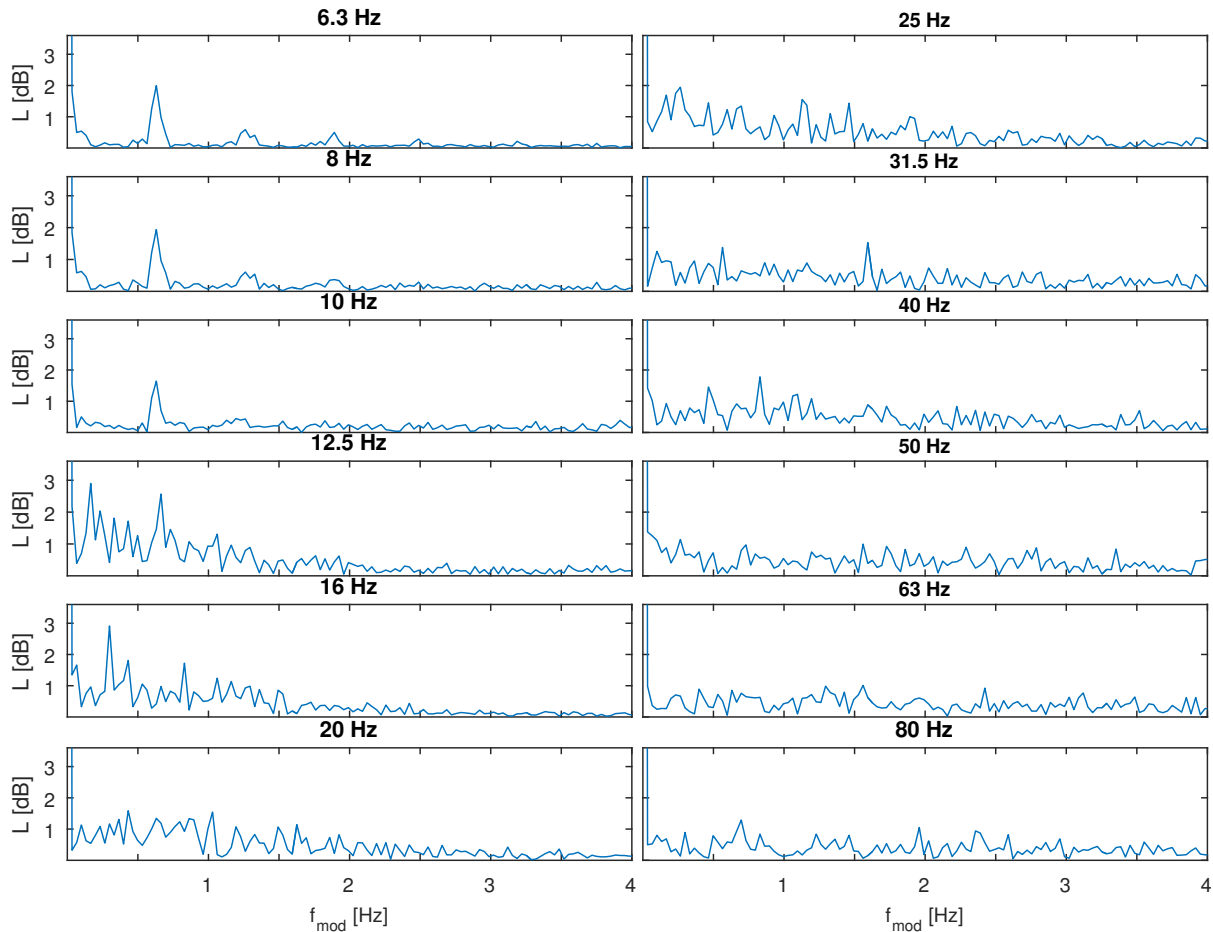
Vaikka luotettava algoritmi hetkellisen modulaatiosyvyyden määrittämiseen olisi käytettävissä, ratkaistavaksi jää kuitenkin numerodatan tarkoituksenmukainen soveltaminen melun häiritsevyyden arviointiin tai suunnitteluohjearvojen laatimiseen. Hetkelliset modulaatiosyvyydet eivät voi olla sekuntien aikaskaalassa muuttuvan ilmiön voimakkuutta kuvaavan suureen pohjana. Keskimääräinen modulaatiosyvyys jollakin aikavälillä on todennäköisesti sopivampi tunnusluku modulaation voimakkuudelle, mutta tarkoituksenmukaisen aikavälin määrittäminen ei ole triviaali ongelma: liian pitkät aikavälit eivät kuvaa ilmiön voimakkuutta riittävän tarkasti ja liian lyhyitä aikavälejä sovellettaessa tietoa kertyy nopeasti liian suuri määrä ilmiötä kokonaisuutena kuvaavien suureiden ja helposti sovellettavien ohjearvojen määrittämiseksi. Tehtyjen havaintojen perusteella, nykyiset 15 ja 9 tunnin keskiarvotasoisiin perustuvat ohjearvot eivät joka tapauksessa vaikuta sopivimmilta suureilta tuulivoimamelun voimakkuuden arviointiin.

Taajuussisällön määrittämistä ja myös muiden äänen ominaisuuksien tunnistamista ja analyysiä olisi mahdollista helpottaa huomattavasti muuttamalla mittausjärjestelyjä. Mikrofonin sijoittaminen vapaaseen kenttään sekä samanaikainen mittaaminen kahdella tai useammalla laitteistolla eri ilmansuunnista tuulipuistoon nähden olisi aineiston analyysin kannalta merkittävä parannus. Nyt toteutetuissa mittauksissa seinän viereen sijoitettu mikrofoni poimi esimerkiksi räystäältä tippuvan veden ääniä ja kuten aiemmin todettiin, sijoittelu saattoi vaikuttaa myös taajuussisällön mittaustuloksiin seinän heijastusten vuoksi. Melun suuntautumisen tuulensuuntaan nähden olisi mahdollista saada useamman mittauspisteen avulla lisäselvyyttä. Kääntöpuolena usean mittauspisteen käytössä on entisestään lisääntyvä datan määrä, joten automaattisten analyysityökalujen merkitys korostuisi edelleen. Melun ominaispiirteiden tutkimisen kannalta, mittauskohteiden valitseminen muulta ympäristömelulta mahdollisimman hiljaisesta paikasta olisi hyödyllistä, mutta toisaalta nyt toteutetuissa mittauksissa saatiin havaintoja myös muun ympäristömelun ominaispiirteistä, joita voidaan hyödyntää eri lähteiden aiheuttaman modulaation erottamisessa toisistaan käyttäen sopivia matemaattisia menetelmiä.

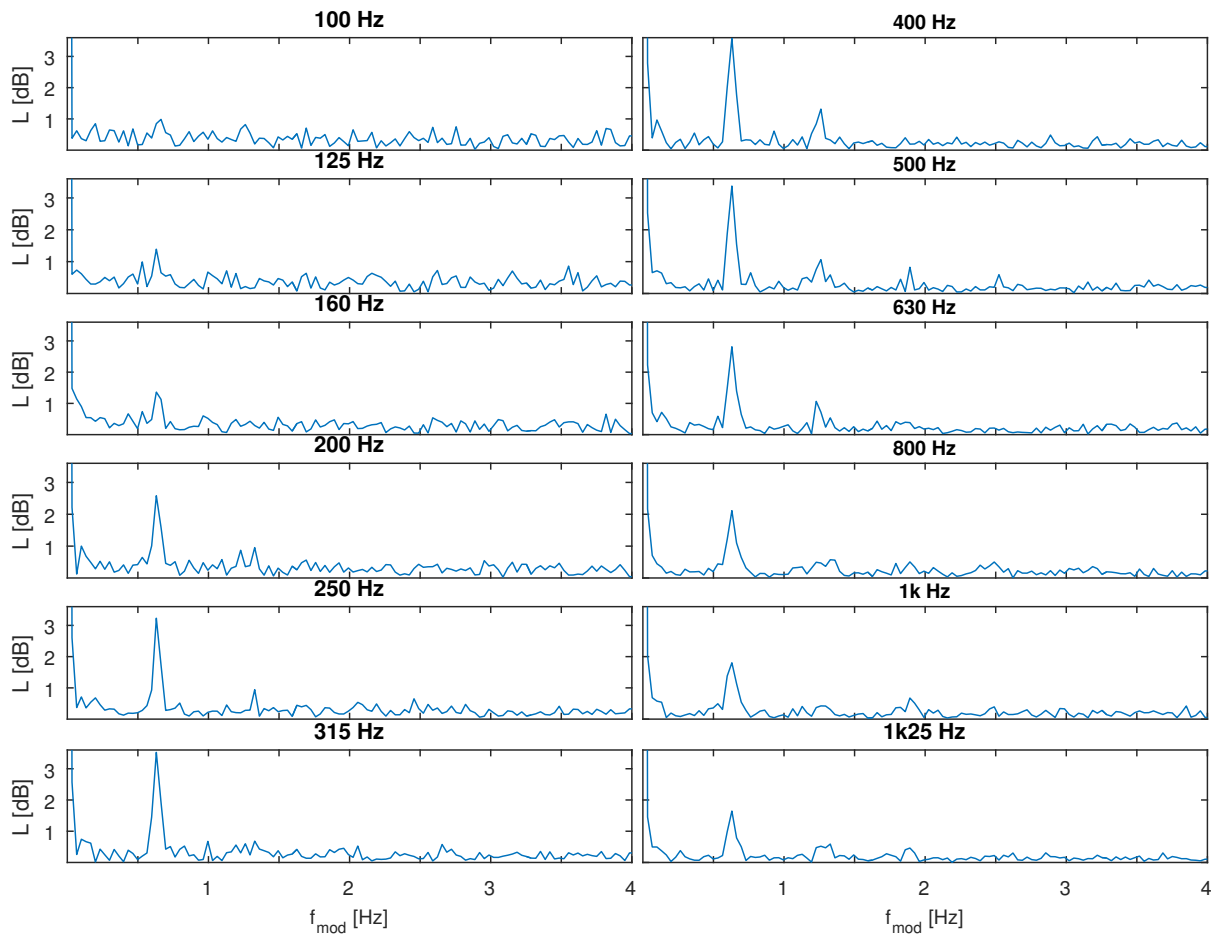
4.6 Yhteenveto

Melun taajuussisällön määrittäminen todettiin suhteellisen suoraviivaiseksi 1/3-oktaavikaistoilta laskettujen ekvivalenttitasojen avulla. Taajuussisällön todettiin tukevan aiempien tutkimuksien löydöksiä. Amplitudimodulaation todettiin olevan voimakkainta 125 Hz - 4 kHz taajuusalueella ja modulaatiota havaittiin myös kolmella alimmalla kaistalla 6.3 Hz - 10 Hz kolmen ajankohdan näytteistä. Modulaation havaittiin erottuvan selvemmin A-painotetuista L_A tasoista verrattuna Z-painotettuihin tasoihin vaikka A-painotuksen soveltuvuutta tuulivoimamelumittauksiin on kritisoitu [21]. Modulaatiosyvyyden havaittiin myös muuttuvan satunnaisesti ja merkittävässä määrin jo muutamien sekuntien aikaskaalassa. Havainto sopii aiempien tutkimusten kuvauksiin voimistuneesta amplitudimodulaatiosta (EAM) [15, 16], mutta voi selittyä myös tuulen vaikutuksella melun kantautumiseen mittauspisteeseen. Modulaatiosyvyyden määrittäminen osoittautui Fourier-analyysiin perustuvien taajuustason analyysimenetelmien avulla hankalaksi. Tutkimusartikkeleissa ehdotetut menetelmät havaittiin myös aina-

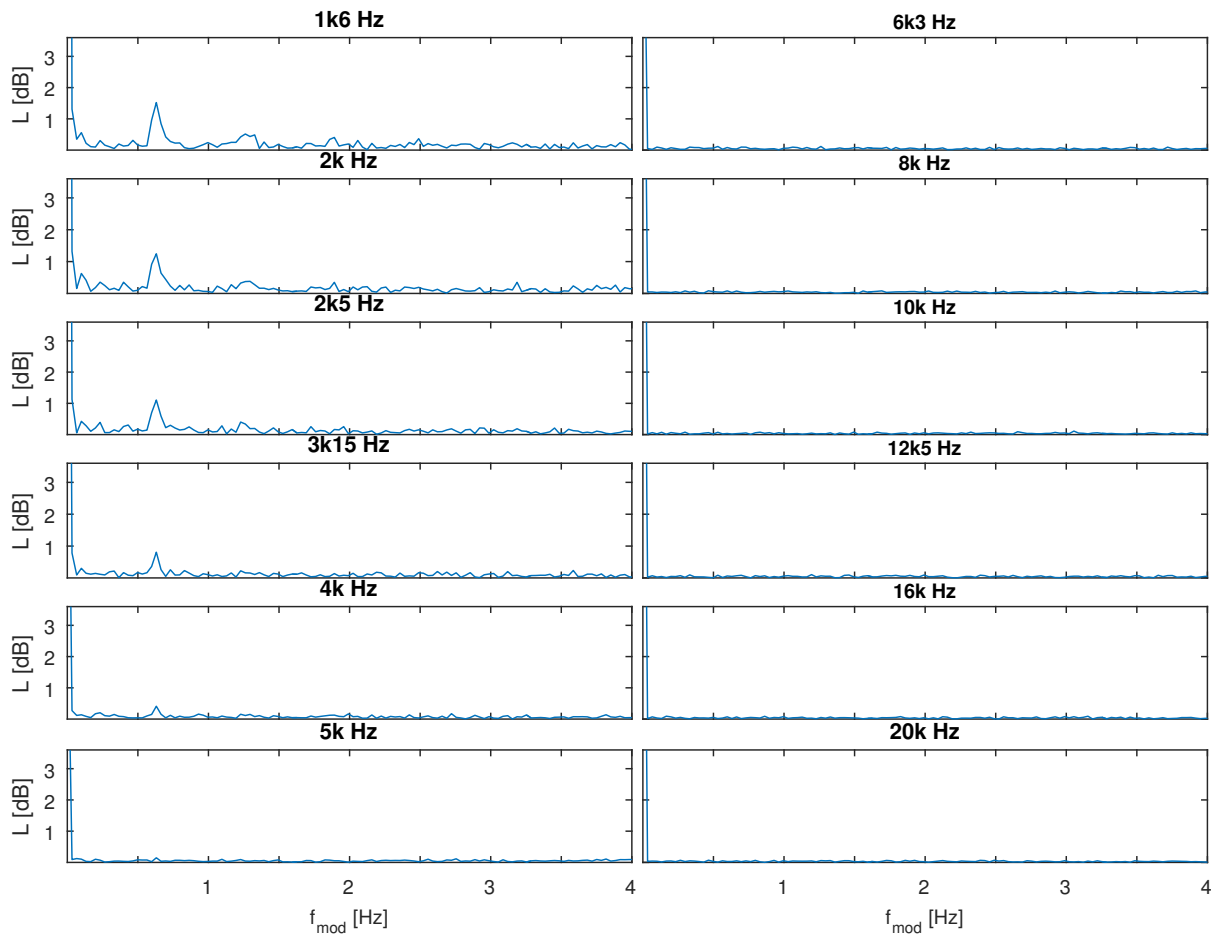
kin osittain puutteellisiksi, mutta niiden pohjalta onnistuttiin kuitenkin kehittämään toimiva muttei kuitenkaan ongelmaton menetelmä modulaatiosyvyyden määrittämiseen. Esimerkkinä käytetyn 30 sekunnin näytteen modulaatiosyvyydet olivat erityisesti hetkellisesti huomattavasti suurempia kuin viitteessä [6] raportoidut mittauspisteen ja lähimmän voimalan 800 m etäisyydestä huolimatta. Amplitudimodulaatiota paikantavan ja modulaatiosyvyyttä määrittävän automaattisen algoritmin kehitystä jatketaan tämän työn havaintojen pohjalta datan analysoimiseksi kokonaisuudessaan, jolloin myös ilmiön yleisyyteen voitaisiin ottaa kantaa.



Kuva 4.10: Kaistoilta 6.3 Hz - 80 Hz lasketut 30 sekunnin amplitudimodulaatiospektrit. Kaistoilla 6.3 Hz - 10 Hz nähdään 0.63 Hz perustaaajuutta vastaavat piikit ja 6.3 Hz kaistalla harmoniset erottuvat jopa kuudenteen harmoniseen saakka. Kaistoilla 12.5 Hz - 80 Hz alimpien kaistojen piikit eivät erotu muun ympäristömelun aiheuttamien satunnaisilla modulaatiotaajuuksilla esiintyvien piikien vuoksi tai modulaatio ei ole havaittavissa näillä kaistoilla.



Kuva 4.11: Kaistoilta 100 Hz - 1.25 kHz lasketut 30 sekunnin amplitudimodulaatiospektrit. 0.63 Hz perustaa-juutta vastaava piikki alkaa erottumaan 125 Hz kaistalla ja on erotettavissa kaikilla kaistoilla 5 kHz kaistalle saakka (kaistat 1.6 kHz - 5 kHz kuvassa 4.12) samalla modulaatiotaajuudella. Suurin amplitudi saavutetaan 400 Hz kaistalla, jolla myös toinen harmoninen erottuu selkeimmin.



Kuva 4.12: Kaistoilta 1.6 kHz - 20 kHz lasketut 30 sekunnin amplitudimodulaatiospektrit. 0.63 Hz modulaatiotaajuuden piikki on erotettavissa kaistoilla 1.6 kHz - 5 kHz. Kaistoilla 6.3 kHz - 20 kHz ei ole viitteitä jaksollisista ilmiöistä.

Kirjallisuus

- [1] Helsingin sanomat. *Tuulivoimaloiden melu lasketaan Suomessa väärin*. Elokuu 2015. URL: <http://www.hs.fi/tiede/a1438916621051>.
- [2] YLE. *Tuulivoiman melumallit kiistanalaisia*. Maaliskuu 2015. URL: http://yle.fi/uutiset/tuulivoiman_melumallit_kiistanalaisia/7845650.
- [3] Valtteri Hongisto. *Tuulivoimamelun terveysvaikutukset*. Työterveyslaitos, 2014. URL: http://www.ttl.fi/fi/verkkokirjat/Documents/Tuulivoimalamelun_terveysvaikutukset.pdf.
- [4] W David Colby et al. “Wind turbine sound and health effects”. *An expert panel review: American Wind Energy Association & Canadian Wind Energy Association* (2009).
- [5] Rakennetun ympäristön osasto Ympäristöministeriö. *Ympäristöhallinnon ohjeita 4, Tuulivoimarakentamisen suunnittelu*. Ympäristöministeriö, 2012, s. 57–58. URL: www.ym.fi/julkaisut.
- [6] Seunghoon Lee et al. “Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise”. *Noise Control Engineering Journal* 59.1 (2011), s. 38–46.
- [7] Dick Bowdler. “Amplitude modulation of wind turbine noise: a review of the evidence”. *Institute of Acoustics Bulletin* 33.4 (2008), s. 31–41.
- [8] Stefan Oerlemans, P Sijtsma ja B Méndez López. “Location and quantification of noise sources on a wind turbine”. *Journal of sound and vibration* 299.4 (2007), s. 869–883.
- [9] Rakennetun ympäristön osasto Ympäristöministeriö. *Ympäristöhallinnon ohjeita 3, Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla*. Ympäristöministeriö, 2014. URL: www.ym.fi/julkaisut.
- [10] *IEC 61672-1:2003. Electroacoustics - Sound Level meters - Part 1: Specifications*.
- [11] Yöiti Suzuki et al. “Precise and full-range determination of two-dimensional equal loudness contours”. *Tohoku University, Japan* (2003).
- [12] *IEC 1260:1995. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters*.
- [13] John G. Proakis ja Dimitris G. Manolakis. *Digital Signal Processing*. 3rd. 1996.
- [14] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer ja John R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd. 1999.
- [15] Matthew CAND et al. “Wind turbine amplitude modulation: research to improve understanding as to its cause & effect”. Teoksessa: *Acoustics 2012*. Toim. Société Française d’Acoustique. Nantes, France, huhtikuu 2012. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00811234>.
- [16] S Oerlemans ja JG Schepers. “Prediction of wind turbine noise and validation against experiment”. *noise notes* 9.2 (2010), s. 3–28.
- [17] Glyn James et al. *Advanced Modern Engineering Mathematics*. 4th. 2011.
- [18] Jonathan Cooper ja Tom Evans. “Automated detection and analysis of amplitude modulation at a residence and wind turbine”. *Acoustics2013. Australian Acoustical Society. Victor Harbor, Australia* (2013).

- [19] Conny Larsson ja Olof Öhlund. “Amplitude modulation of sound from wind turbines under various meteorological conditions”. *The Journal of the Acoustical Society of America* 135.1 (2014), s. 67–73.
- [20] Mathworks. *Time-Frequency Analysis with the Continuous Wavelet Transform*. Tammikuu 2017. URL: <https://se.mathworks.com/help/wavelet/examples/time-frequency-analysis-with-the-continuous-wavelet-transform.html>.
- [21] Denis Siponen. *Noise Annoyance of Wind Turbines*. VTT, 2011. URL: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/VTT-R-00951-11.pdf>.
- [22] Pedersen C. Møller M. “Low frequency noise from large wind turbines”. *J Acoust Soc Am* 129 (2010), s. 3727–3744.
- [23] Alstom. *ECO 100 Platform and PowerOf3, ECO 100, ECO 110 and ECO 122 wind turbines*. 2014. URL: <http://alstomenergy.gepower.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/eco-100-wind-turbine-platform-epslanguage=en-GB.pdf>.