

# TUULIVOIMAMELUN KUUNNELTAVA MALLI

Marko Antila<sup>1</sup>, Jari Kataja<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VTT  
PL 1300  
33101 TAMPERE  
marko.antila@vtt.fi

<sup>2</sup> VTT  
PL 1300  
33101 TAMPERE  
jari.kataja@vtt.fi

## Tiivistelmä

Tuulivoimamelu on viime aikoina tullut yhä merkittävämmäksi tekijäksi uusia tuulivoimaloita ja tuulivoimalapuistoja rakennettaessa. Melun vaikutusta on yleensä arvioitu tekemällä meluselvitys ja melukartoitus. Tuulivoimamelun luonteen takia olisi kuitenkin hyödyllistä pystyä lisäksi kuuntelemaan melua ja arvioimaan sitä psykoakustiikan menetelmiä hyödyntäen, ja estimoida sen vaikutuksia luotettavammin kuin pelkästään käyttäen nykyisiä menetelmiä. Melun tarkempaa arviointia varten olemme kehittäneet kuunneltavan, parametreihin perustuvan tuulivoimamelun mallin. Mallia voidaan käyttää jo tuulivoimalan suunnitteluvaiheessa, ja sen parametreja muuttamalla voidaan melun muutoksia kuunnella. Tätä voidaan hyödyntää esimerkiksi arvioitaessa tuulivoimalan sopivaa sijoituspaikkaa, kokoa ja roottorin pyörimisnopeuden vaikutusta. Kun mallin parametreja muutetaan, muuttuu myös kuultava ääni reaaliaikaisesti. Tällaisia säädettäviä parametreja voivat olla mm. etäisyys tuulivoimalasta ja roottorin pyörimisnopeus. Malli tuottaa tuulivoimalan lapojen aiheuttaman laajakaistaisen aerodynaamisen melun ja sen amplitudimoduloinnin, sekä vaihteistomelun osuuden. Malli sisältää myös simuloinnin siitä, miten ääni vaimenee ja sen taajuussisältö muuttuu äänen edetessä ilmakehässä.

## 1 JOHDANTO

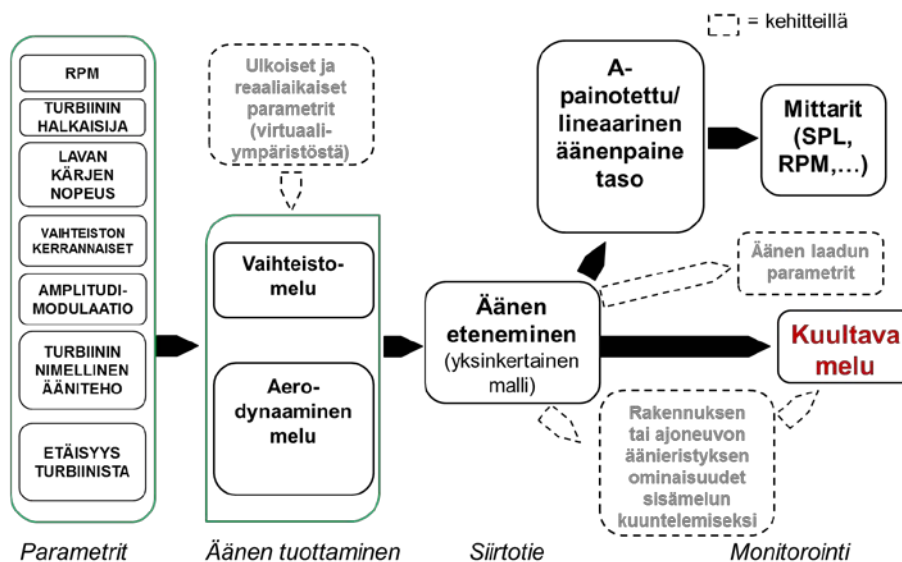
Tuulivoimamelu on viime aikoina tullut yhä merkittävämmäksi tekijäksi uusia tuulivoimaloita ja tuulivoimalapuistoja rakennettaessa. [1]. Melun vaikutusta on yleensä arvioitu tekemällä meluselvitys ja melukartoitus. [2]. Tuulivoimamelun luonteen takia olisi kuitenkin hyödyllistä pystyä lisäksi kuuntelemaan melua ja arvioimaan sitä psykoakustiikan menetelmiä hyödyntäen, ja estimoida sen vaikutuksia luotettavammin kuin pelkästään käyttäen nykyisiä menetelmiä. Esimerkiksi aerodynaamisen melun amplitudimodulaation [3] vaikutuksia ja edelleen modulaation muutoksien vaikutuksia melun häiritsevyyteen ei välttämättä ole suoraviivaista arvioida [4]. Tuulivoimalan melu koostuu aerodynaamisesta melusta, vaihteistomelusta sekä vähäisemmistä melukomponenteista [5]. Aerodynaaminen melu on hallitsevin.

## 2 MALLIN OMINAISUUDET

Melun tarkempaa arviointia varten olemme kehittäneet kuunneltavan, parametreihin perustuvan tuulivoimamelun mallin. Sen lohkokkaavio on kuvassa 1. Ajatuksena on ollut tehdä mallista mahdollisimman modulaarinen, jotta jokaista lohkoa on mahdollista kehittää ja tarkentaa sitä mukaa, kun mallin validointi edistyy ja toiminta tarkentuu. Kuunneltavassa mallissa ei lasketa akustisia parametreja fysikaalisista ilmiöistä lähtien, vaan ne on saatava esimerkiksi perustuen mittauksiin tai numeerisiin akustisiin malleihin. Tällä tavoin kuunneltava malli toimii eräänlaisena reaaliaikaisena soittimena, joka renderöi kuultavan äänen parametreihin perustuen.

Mallia voidaan käyttää jo tuulivoimalan suunnitteluvaiheessa, ja sen parametreja muuttamalla voidaan melun muutoksia kuunnella. Tätä voidaan hyödyntää esimerkiksi arvioitaessa tuulivoimalan sopivaa sijoituspaikkaa, kokoa ja roottorin pyörimisnopeuden vaikutusta. Malli koostuu parametrilohkosta, äänen tuottolohkosta, siirtotielohkosta sekä erilaisista mittareista ja lopuksi reaaliaikaisesta tuotettavasta äänestä. Mallin parametreina annetaan mm. turbiinin pyörimisnopeus, tai vaihtoehtoisesti lapojen pituudet ja niiden kärkien nopeus ja vaihteistoa varten tietoa sen lapojen pyörimisnopeuteen suhteutetuista kerrannaisista. Muita parametreja ovat amplitudimodulaation syvyys, turbiinin nimellinen ääniteho sekä kuuntelupaikan etäisyys turbiinista. Parametreja voidaan säätää mallia ajettaessa joko syöttämällä arvot suoraan malliin tai esimerkiksi sauvaohjaimella (joystick). On myös mahdollista tuoda malliin parametrit ulkoisesti.

Äänen tuottolohko on jaettu kahteen osaan: aerodynaamisen melun lohkokon sekä vaihteistomelulohkokon. Aerodynaamisen melun tuottaminen perustuu  $1/f$ -suodatettuun kohinaan, jota voidaan amplitudimoduloida. Vaihteistomelun periaate on tuottaa lapojen pyörimisnopeuteen verrannaisia kerrannaistaajuuksia. Äänen etenemiseen tuulivoimalasta ilmakehässä on toistaiseksi käytetty yksinkertaista etenemismallia, jossa otetaan huomioon äänitason pieneneminen sekä korkeiden taajuuksien vaimennus etäisyyden funktiona. Lopuksi lasketaan äänenpainetasot, sekä muut tarvittavat parametrit, sekä tuotetaan kuultava ääni.



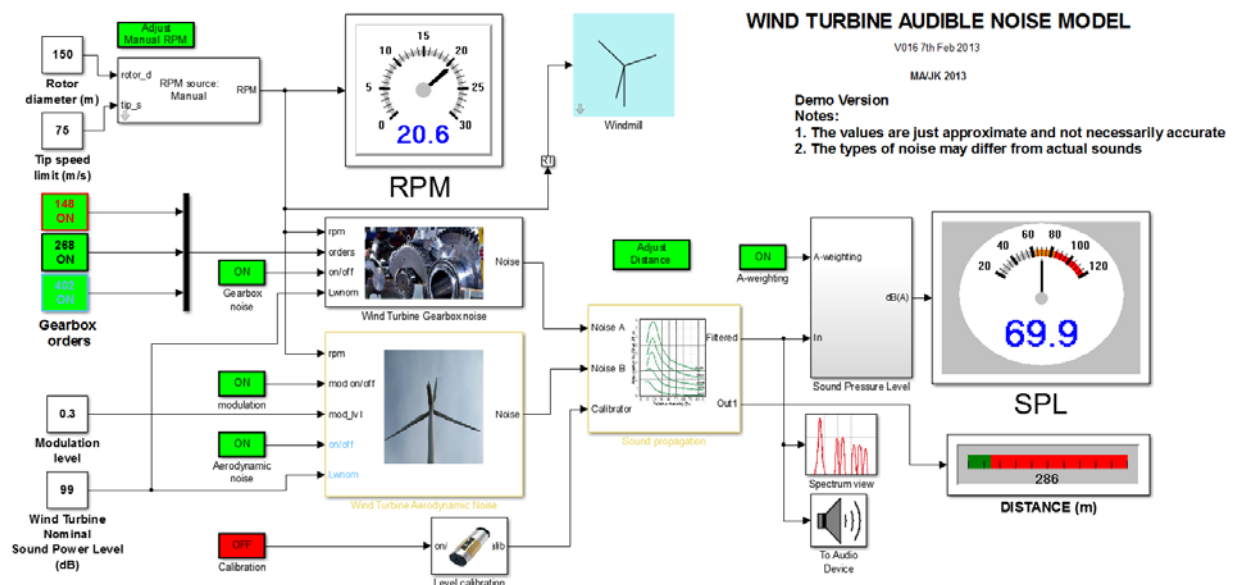
Kuva 1. Kuunneltavan mallin lohkokkaavio.

### 3 MALLIN TOTEUTUS

Mallin pohjana olemme käyttäneet kehittämäämme reaaliaikaista periodisen ja laajakaistaisen melun mallinnusalustaa, Audible Model Platform, AMP. Mallinnusalustan ideana on pystyä tuottamaan kuultavaa ääntä reaaliaikaisesti ja ilman häiriöitä jo tavallisella kannettavalla tietokoneella, jos malli ei ole liian raskas. Ideana on myös ollut käyttää tavallisia USB-äänikortteja äänen toistamiseen. Malli on rakennettu diskreetti-aikaisena, monitaajuusprosessointiin (multi-rate) perustuen. Kukin osa mallista toimii sille riittävällä kellotaajuudella, eikä siten kuluta tarpeettomasti resursseja. Käytössä on myös kehyspohjainen (frame-based) datan käsittely, jolla saadaan lisää tehoa reaaliaikaisen audion tuottamiseen, kun dataa voidaan puskuroida tehokkaammin prosessoitaviksi, pidemmiksi kokonaisuuksiksi. Tällaisen kuultavan mallin tapauksessa tuotettavan äänen ei tarvitse muuttua parametreja muutettaessa välittömästi, vaan sekunnin luokkaa oleva latenssi on vielä sallittava.

Mallinnusalustaa on aiemmin käytetty mm. työkoneiden ohjaamoäänen ja isojen dieselmoottoreiden tuottaman äänen kuunneltavien mallien tekemiseen. Mallinnusalusta on Matlab/Simulink-pohjainen ja sen laskenta toimii reaaliaikaisesti Windows-ympäristössä [6]. Reaaliaikaisuus on merkityksellistä erityisesti siksi, että mallia voidaan käyttää yhdessä muiden virtuaaliympäristöjen kanssa. Tällöin malli saa parametrinsa virtuaaliympäristöä mallintavalta ohjelmalta käyttäen esimerkiksi UDP-pohjaista Virtual Reality Peripheral Network (VRPN) -protokollaa.

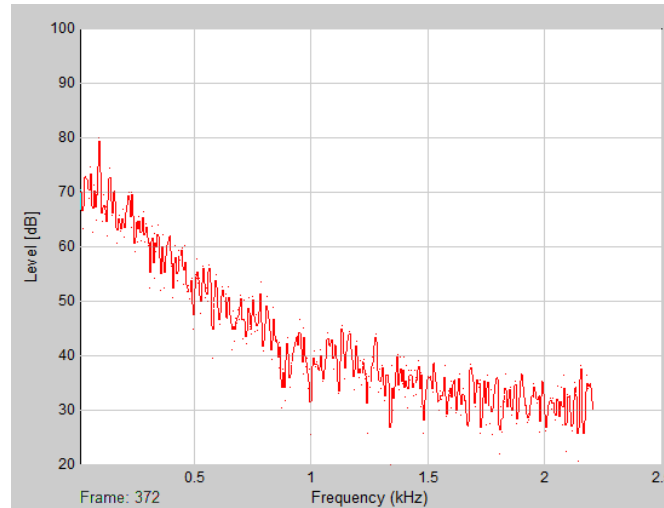
Perustoiminnallisuuden lisäksi malliin on lisätty myös tasojen kalibrointilohko. Sen avulla voidaan kuunneltava malli tarvittaessa kalibroida vastaamaan oikeaa tilannetta kentällä. Kaiuttimia äänilähteenä käytettäessä kalibrointi ei ole tarkka huonetilan vaikutusten takia, mutta oikein suoritettuna kuulokekuuntelua varten tehty kalibrointi antaa oikean vaikutelman tarkemmin.



Kuva 2. Kuunneltavan, reaaliaikaisen mallin Simulink-toteutus.

## 4 MALLIN TUOTTAMA ÄÄNI

Kun mallin parametreja muutetaan, muuttuu myös kuultava ääni reaaliaikaisesti. Kuvassa 3 on esitetty tuotetun äänen taajuussisältö, kun etäisyys voimalasta on 286 m ja voimalan nimellinen ääniteho on 99 dB. Esimerkissä olevassa äänessä nähdään 1/f-tyyppinen taajuusjakauma, sekä joitain vaihteistomelusta aiheutuvia piikkejä.



Kuva 3. Mallin tuottaman äänen spektri.

## 5 YHTEENVETO

Olemme pystyneet tuottamaan ensimmäisen vaiheen mallilla oikeaa tuulivoimamelua jäljittelevää ääntä, vaikka mallia ei olekaan vielä kunnolla validoitu mittauksin. Mallia ja sen osajärjestelmiä kehitetään edelleen ja tarkoitus on saada sen tarkkuus riittäväksi tuulivoimamelun vaikutusten arvioimiseksi ja virtuaalisen suunnitteluympäristön äänimaailman tuottamiseksi, samoin kuin psykoakustisten parametrien tuottamiseksi.

## VIITTEET

1. Pihlainen, S. Tuulivoimaloiden meluhaitat. MSc ed. Jyväskylän yliopisto, 2009.
2. Di Napoli, C. Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen. Ympäristöministeriö, 2007.
3. Smith, M., Bullmore, A., Matthew, C. & Davis, R. Mechanisms of amplitude modulation in wind turbine noise. Acoustics 2012, Nantes. 2012.
4. Uosukainen, S. Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys. Raportti 2529. VTT, 2010.
5. Hubbard, H.H. & Shepherd, K.P. Wind turbine acoustics. National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Division, 1990.
6. Corless, M. & Ananthan, A. Model-Based Design of Fixed-Point Filters for Embedded Systems. Society of Automotive Engineers World Congress. 2009.