Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

AKTIIVISEN MELUNVAIMENNUKSEN SOVELTUVUUS SIIRRELTÄVIIN ILMAPUHALLINJÄRJESTELMIIN
ANC feasibility in movable air blower applications

Matti Salervo

Kandidaatintyö
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

17.5.2018

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Matti Salervo
Aktiivisen melunvaimennuksen soveltuvuus siirreltäviin ilmapuhallinjärjestelmiin

2018

Kandidaatintyö.
22 s.
Tarkastaja: TkT Mikko Kuisma
Hakusanat: ANC, melu, suuntakuvio, vaimennus, ilmanpuhdistin, puhallin

Aktiivinen melunvaimennus on käytännöllinen ja nopeasti yleistyvä tapa vähentää tasaista häiritsevää ääntä tuottavien järjestelmien, kuten esimerkiksi ilmanvaihtokanavien tai auton matkustamon melua. Aktiivinen melunvaimennus on yksinkertaisinta toteuttaa sellaisiin järjestelmiin, joissa meluäänen aistija on paikallaan suhteessa melulähteeseen. Melulähteen siirreltävyys tuo omat haasteensa aktiivisen melunvaimennuksen toteutettavuuteen.

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin kirjallisuustutkimuksen sekä case-esimerkkitapauksen keinoin aktiivisen melunvaimennuksen soveltuvuutta siirreltäviin ilmapuhallinjärjestelmiin, kuten esimerkiksi ilmastointilaitteisiin tai ilmalämpöpumppuihin. Tavoitteena oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat melun vaimennettavuuteen sekä arvioida, kuinka hyvin aktiivinen melunvaimennus soveltuisi siirreltäviin ilmapuhallinjärjestelmiin.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että aktiivinen melunvaimennus ei sovellu erityisen hyvin siirreltäviin järjestelmiin. Toteutus on huomattavasti haastavampaa kuin melusisällöltään vastaaviin, mutta paikallaan pysyviin järjestelmiin. Merkittävimmät toteutusta hankaloittavat tekijät ovat melulähteen yksilöinti, sekä melun suuntaavuus.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Matti Salervo
ANC feasibility in movable air blower applications

2018

Bachelor's Thesis.
22 p.
Examiner: D.Sc. (Tech.) Mikko Kuisma
Keywords: ANC, noise, directivity pattern, attenuation, reduction, air purifier, blower

Active noise cancellation is a practical way to reduce constant, obtrusive noise. It has lately become a growingly common way to attenuate noise created by systems such as air ducts or car cabins. It is easiest to implement in systems, where the person sensing the noise remains stationary in relation to the noise source, or vice versa. Transferability of the noise source poses challenges to the feasibility of active noise cancellation.

In this bachelor's thesis active noise cancellation feasibility in movable air blower applications (such as air conditioners and air source heat pumps) was studied by two different methods; literature research and case study. The objective of the study was to find out which factors affect noise attenuation and how well ANC is suitable for movable systems.

The results of this study show that ANC is not particularly well suited for transferable systems – the implementation is considerably more challenging than in noisewise similar, but stationary sources. The most predominant reasons are the difficulty of detecting a single noise source, and the directivity of the noise.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto 6
1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset 7
2. Ilmapuhallinmelu ja ANC 9
2.1 Äänenpainetaso 9
2.2 Taajuussisältö 9
2.3 Kiinteästi asennetut puhallinjärjestelmät 10
2.4 Siirreltävät puhallinjärjestelmät 11
3. Melun mittaaminen 12
3.1 Yleisiä käytäntöjä 12
3.2 Mitattavat suureet ja mittausparametrit 12
3.3 Ilmavirran mittaaminen 12
3.4 Norsonic Sound Analyser Nor140 12
3.5 LUT:n kaiuton huone 13
4. Case-esimerkkijärjestelmän mittaukset 14
4.1 Meluäänen taajuusjakauma 14
4.2 Äänen suuntaavuus 15
5. Johtopäätökset 19
6. Yhteenveto 20
Lähteet 21

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

ANC	Active Noise Cancellation, aktiivinen melunvaimennus
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier’n muunnos
MIMO	Multi-Input Multi-Output

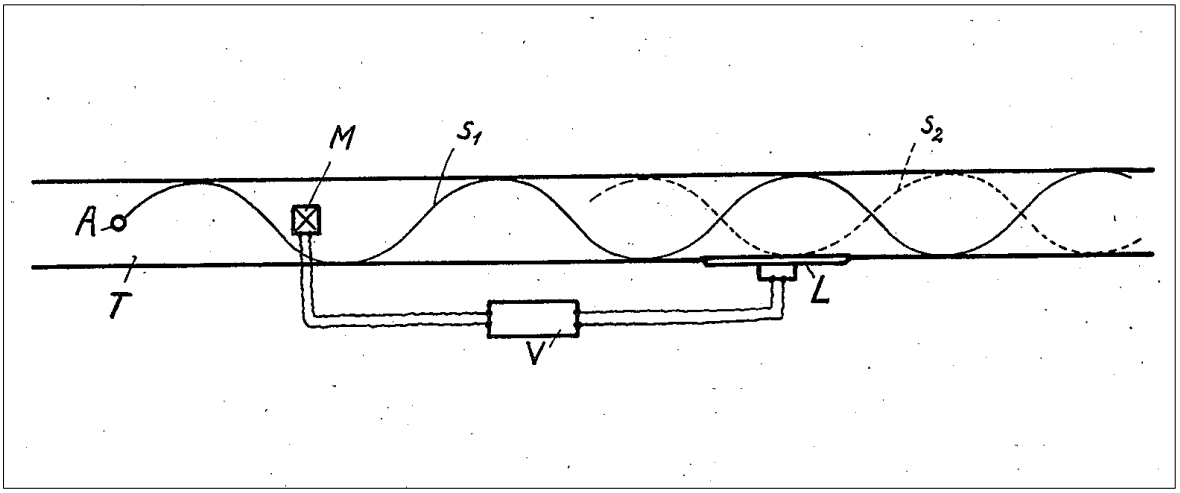
f	taajuus
λ	aallonpituus
L	äänitaso
v	nopeus

Alaindeksit

A	A-taajuuspainotus
eq	ekvivalenttitaso
f	fast-aikapainotus
min	minimi
max	maksimi

1. JOHDANTO

Aktiivinen melunvaimennus (Active noise cancellation, ANC) on aaltoliikkeen destruktiiviseen interferenssiin perustuva äänenvaimennuksen tekniikka (Elliott, 1993). ANC:ssä tavoitteena on tuottaa häiritsevään meluääneen nähden vastakkaisvaiheinen (180° vaihesiirtoa), mutta taajuussisällöltään ja amplitudiltaan alkuperäistä vastaava paineaalto; nk. vastamelu (kuva 1.1). Tällä vastamelulla on tarkoitus kumota häiritsevä meluääni. Erityisesti matalilla taajuuksilla ANC:n avulla voidaan päästä suurempaan kokonaisvaimennukseen kuin ainoastaan passiivisella, eli rakenteellisella melunvaimennuksella (Milosevic & Schaufelberger 2005).



Kuva 1.1 Havainnekuva aktiivisesta melunvaimennuksesta. Melu havaitaan mikrofonilla (M) ja ohjataan signaalia prosessoivalle piirille (V), missä melun vaihe muutetaan vastakkaiseksi alkuperäiseen nähden. Kaiutin (L) toistaa tuotetun vastakkaisvaiheisen, vaimentavan kontrolliäänen. (Lueg 1936)

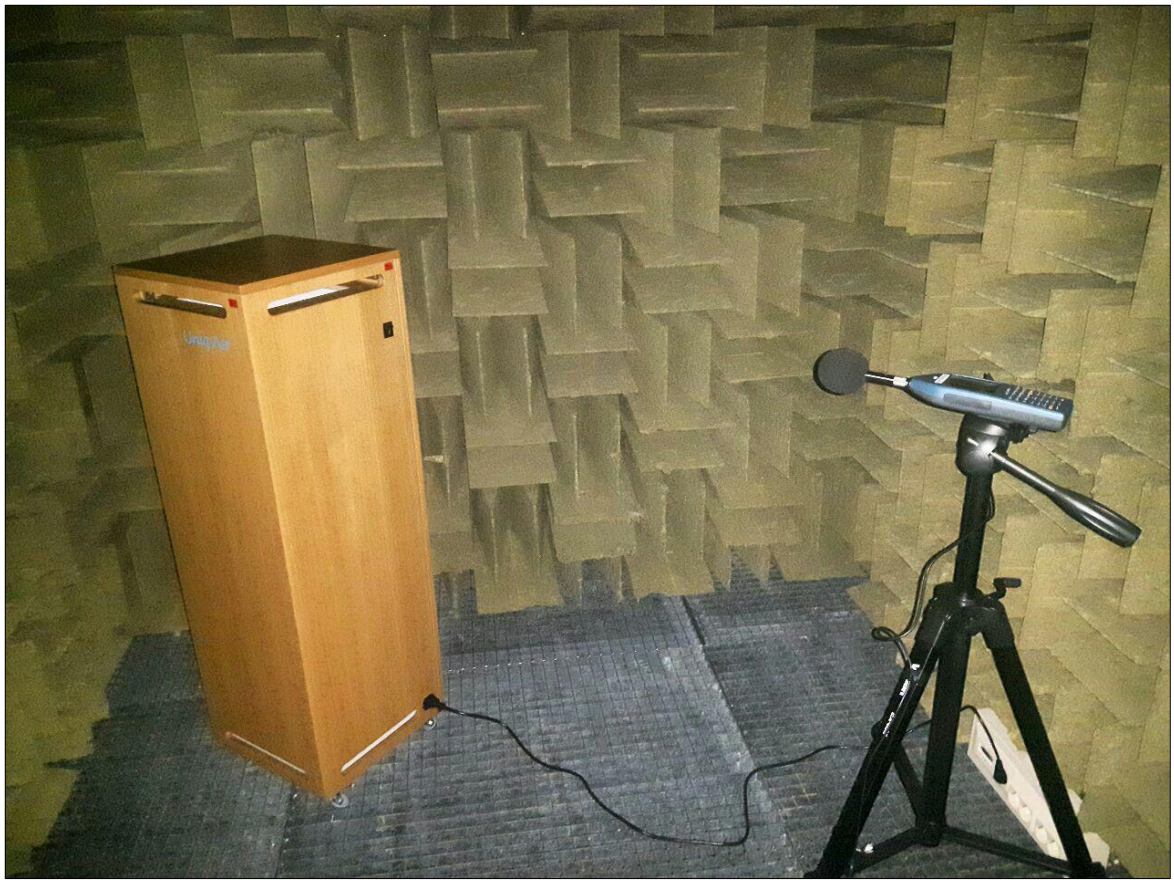
Varhaisin kirjattu havainto äänen kumoutumisesta on tehty 1800-luvun loppupuolella ja ensimmäinen aktiiviseen melunvaimennukseen liittyvä patentti on vuodelta 1933. Ensimmäisessä patentissa kuvailtu järjestelmä ei kuitenkaan ollut adaptiivinen eli järjestelmän muutostilanteisiin reagoiva, eikä teoriassa toimivaa järjestelmää kyetty vielä tuolloin toteuttamaan käytännössä. (Hansen, 2001)

Ensimmäisen laboratorio-olosuhteissa toimivan proof of concept -järjestelmän toteutti W. Meeker vuonna 1957 osaksi kuppikuulokkeita, jotka peittävät korvat kokonaan. Järjestelmä kykeni enimmillään noin 20 dB vaimennukseen 50 – 500 Hz taajuusalueella (Meeker, 1959). Tämän jälkeen ANC:lla toteutettavissa oleva maksimivaimennus sekä taajuusalue ovat hitaasti kasvaneet teknologian kehityksen myötä (Urquhart, 2002).

Tulevaisuudessa aktiivinen melunvaimennus jatkaa luultavasti yleistymistään, vaikka joitain kehitystä hidastavia tekijöitäkin on. Eräiden aikaisemmin epäkäytännöllisiltä vaikuttaneiden sovelluskohteiden toteutettavuus on mahdollistunut - tähän on vaikuttanut esimerkiksi säätötekniikan algoritmien, digitaalisten signaalinkäsittelypiirien sekä akustisen mallinnuksen kehittyminen. (Hansen, 2003)

ANC:n toteutus liikuteltaviin ilmapuhallinjärjestelmiin ei olisi yhtä suoraviivaista kuin sellaisiin järjestelmiin, joissa melun lähteen ja melun aistijan sijainti suhteessa toisiinsa pysyvät

muuttumattomina. Liikuteltavien järjestelmien tapauksessa ANC:n toteuttamista harkittaessa on otettava huomioon huomattavasti useampia seikkoja. Kuvassa 1.2 on tässä tutkimuksessa esimerkkijärjestelmänä käytettävä laite. Tutkimuksessa keskitytään kotitalous- tai toimistokäyttöön tarkoitettuihin siirreltäviin ilmapuhallinlaitteisiin.



Kuva 1.2 Liikuteltavassa ilmanpuhdistimessa on ANC:n toteuttamisen kannalta omat haasteensa. Yksittäisen pistemäisen melulähteen määrittäminen ei ole helppoa ja melu on usein suuntautuvaa.

1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat ilmapuhallinjärjestelmien huonetilaan aiheuttaman melun vähennettävyyteen aktiivisen melunvaimennuksen (ANC) keinoin. Näkökulmana on erityisesti soveltuvuus siirreltäviin ilmaa puhaltaviin järjestelmiin (vrt. esim. kiinteä ja siirreltävä ilmalämpöpumppu, tai ilmastointijärjestelmä). Vaimennettavan järjestelmän siirreltävyys tuo ANC:n toteutettavuuteen omat haasteensa.

Tutkimus jakautuu kahteen osioon - kirjallisuustutkimukseen sekä tapaustutkimukseen. Kirjallisuustutkimuksessa selvitetään, millaisia ominaisuuksia ilmapuhaltimiin liittyvällä meluäänellä on, sekä mitkä ovat yleisesti käytettyjä tapoja toteuttaa aktiivinen melunvaimennus ilmapuhallinsovelluksiin. Olemassa olevien tapojen soveltuvuutta siirreltävään järjestelmään pohditaan. Tapaustutkimuksessa selvitetään, onko case-esimerkkinä käytettävän, UniqAir Oy:n mittauksia varten lahjoittaman siirreltävän ilmanpuhdistimen melu sellaista, että sitä voisi vaimentaa ANC:n keinoin. Esimerkkijärjestelmän melua tutkitaan keräämällä mit-

tausdataa Norsonic Sound Analyser Nor140 -äänitasomittarilla LUT:n kaiuttomassa huoneessa. Aluksi tehdään referenssimittaus kaiuttoman huoneen taustamelusta, sitten mitataan esimerkkijärjestelmän melua. Kerättyä dataa analysoidaan laskennallisin menetelmin MATLAB-ohjelmistoa hyödyntäen.

Tutkimuskysymyksiä:

- Millaisia ominaispiirteitä ilmapuhallinmelulla on?
- Millaista meluääntä tutkittava esimerkkijärjestelmä tuottaa ja miten meluäänen ominaisuudet vaikuttavat ANC:n toteutettavuuteen?
    - Minkälainen on melun spektri eli taajuusjakauma?
    - Löytyykö spektristä selkeästi erottuvia tonaalisia piikkejä, vai onko melun taajuussisältö laajakaistaista?
    - Jos piikkejä löytyy, ovatko ne taajuudeltaan ja fysikaaliselta äänenvoimakkuudeltaan ihmisen kuuloalueen kannalta oleellisia?
    - Vaihteleeko melun voimakkuus eri suunnista tarkasteltuna?

2. ILMAPUHALLINMELU JA ANC

Tässä kappaleessa kuvaillaan erinäisiin tieteellisiin kirjallisuuslähteisiin nojaten, millaista ilmapuhaltimiin liittyvä melu yleensä on ja miten sen ominaisuudet, kuten äänenpainetaso ja taajuussisältö vaikuttavat aktiivisen melunvaimennuksen toteutettavuuteen. Lisäksi selvitetään tyypillisimpiä tapoja toteuttaa ANC kiinteästi asennettuihin ilmapuhaltimiin ja tarkastellaan, kuinka ANC:n voisi mahdollisesti toteuttaa siirreltävään järjestelmään.

2.1 Äänenpainetaso

Ilmapuhallinjärjestelmien käyttötarkoitus ja rakenne määrittävät oleellisesti niihin mahdollisesti liittyvän melun äänenpainetason, eli fysikaalisen äänenvoimakkuuden, suuruusluokan. Kotitalouksiin ja muihin asuinhuoneistoihin tarkoitettujen pienehköjen laitteiden (esim. ilmalämpöpumput, ilmastointilaitteet) melun äänenpainetaso ei useimmiten ole yhtä suuri kuin esim. teolliseen käyttöön tai muuhun työympäristöön, kuten toimistotiloihin tarkoitettujen järjestelmien äänenpainetaso. Tämä johtuu siitä, että meluäänen voimakkuus kasvaa järjestelmän läpi kulkevan ilman virtausnopeuden, sekä ilmaa kuljettavan tilan poikkipinta-alan kasvaessa (Anon, 2008).

Melun äänenpainetasolla ei sinänsä ole suurta merkitystä aktiivisen melunvaimennuksen toteutettavuuden kannalta, mutta voimakkaamman vastamelun tuottaminen vaatii toki enemmän tehoa, jolloin aktiiviseen melunvaimennukseen liittyvät komponentitkin ovat dimensioiltaan suurempia ja mahdollisesti vaikeammin sijoitettavissa vaimennettavan laitteen sisälle. Kotitalouksille tarkoitetut ilmapuhallinlaitteet ovat kuitenkin pienitehoisia ja suhteellisen hiljaisia, sillä valmistajat pyrkivät usein vaimentamaan niiden melua erityisesti passiivisin keinoin. Aktiivinen melunvaimennus soveltuu hyvin sellaisille äänenvoimakkuuksille, joita tavanomaiset kotitalouskäyttöön tarkoitetut ilmapuhallinjärjestelmät tuottavat.

2.2 Taajuussisältö

Ilman siirtymiseen liittyvä melu on sitä kuljettavan rakenteen - kuten ilmastointiputken - fyysisen muodon ja mittojen määräämissä puitteissa sattumanvaraista. Joillakin taajuuksilla melun amplitudi saattaa kuitenkin olla suurempi esimerkiksi rakenteellisten tekijöiden, kuten ulostuloaukon muodon tai laitteessa käytettävän moottorin, tai laitteen kotelon värähtelyn vaikutuksesta. Tällaiset kapeakaistaiset soinnilliset, eli ns. tonaaliset piikit mielletään usein erityisen häiritseviksi (Oliva et. al., 2017).

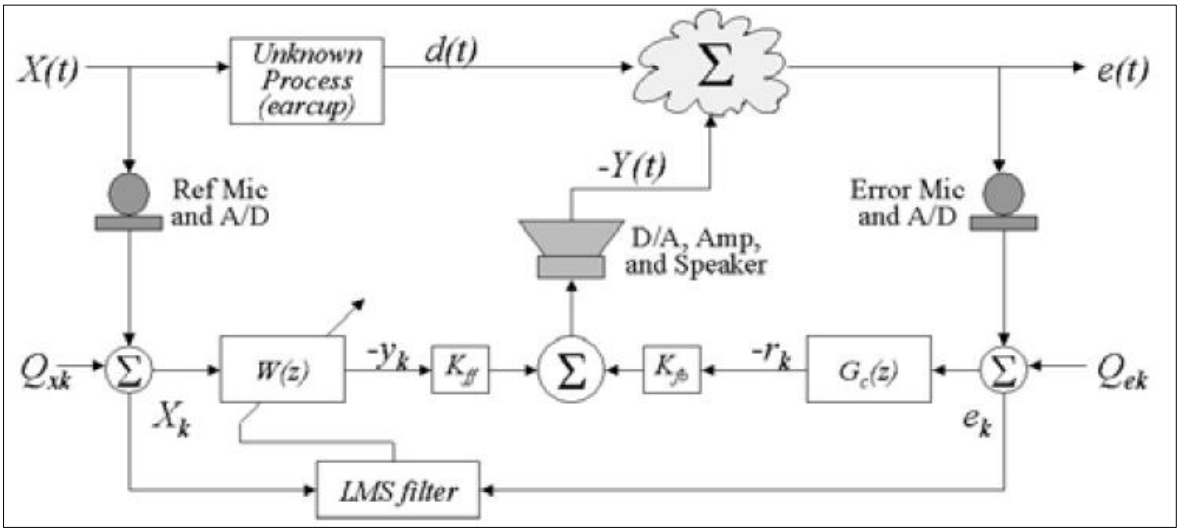
Aktiivisen melunvaimennuksen toteutettavuuden näkökulmasta taajuussisällöllä on suuri merkitys. Jos säätöjärjestelmällä luotavan vastamelun taajuussisällön on oltava hyvin monipuolinen, eli sen tulisi sisältää sekä laajakaistaisia että kapeakaistaisia komponentteja, ANC-järjestelmän suorituskyky voi heikentyä huomattavasti (Xiao & Wang, 2011). Taajuussisällön vaikutus vaihtelee hieman säätöjärjestelmän toteutuksen (myötäkytkentä, takaisinkytkentä, hybridikytkentä) sekä algoritmivalinnan mukaan. Yleisesti ottaen matalammat taajuudet soveltuvat paremmin vaimennettaviksi kuin korkeat. Ilmanvaihtomelulle ominainen matalataajuinen profiili, jonka äänenpainetaso on suurimmillaan usein alle 1 kHz taajuuksilla, tukee Aktiivisen melunvaimennuksen toteutettavuutta ilmanvaihdon sovellutuksiin; ANC soveltuu erityisen hyvin alle 500 Hz taajuuksille (Hansen, 2001).

2.3 Kiinteästi asennetut puhallinjärjestelmät

Kiinteästi asennetut puhallinjärjestelmät, kuten ilmanvaihtokanavat, ovat hyvin tyypillinen käyttökohde aktiiviselle melunvaimennukselle niiden tuottaman meluäänen matalan taajuussisällön takia. Matalataajuista melua on hankalaa ja usein kallista vaimentaa passiivisin keinoin, sillä se kulkeutuu korkeataajuista melua helpommin rakenteita pitkin. Kiinteiden puhallinten ja niihin mahdollisesti liittyvän putkiston kuljettamaa meluääntä vaimentavat ANC-järjestelmät on toteutettu pääasiassa joko takaisinkytketyllä (FB, Feedback) tai myötäkytketyllä (FF, Feed-Forward) säätöjärjestelmällä.

Säätöpiirin komponenttien, kuten mikrofonin sekä kaiuttimen asettelu määrää, onko kyseessä FF- vai FB-järjestelmä. Merkittävin eroavaisuus FF- ja FB-järjestelmien välillä liittyy vaimennettavan melun taajuussisältöön. FF-järjestelmällä kyetään vaimentamaan sekä kapea- että laajakaistaista melua. FF-järjestelmässä vastamelu saattaa kuitenkin kulkeutua järjestelmän input-mikrofoniin, mikä heikentää järjestelmän suorituskykyä. Myötäkytkennässä vastamelua tuottavalla järjestelmällä on jo etukäteen referenssitieto melusta, jota se vaimentaa. Takaisinkytketty järjestelmä puolestaan toimii adaptiivisesti, sillä äänisignaali mitataan vasta kun vaimennus on jo tapahtunut; mikrofonin havaitsema meluääni välitetään digitaaliselle signaaliprosessorille, joka reagoi mahdollisiin muutoksiin pienellä viiveellä.

Hieman epätyypillisempiä ovat hybridijärjestelmät (kuva 2.1), jotka ovat myötä- ja takaisinkytkennän yhdistelmiä. Tällöin käytössä on sekä referenssi- että virhemikrofoni. Hybridijärjestelmällä saavutettavan vaimennuksen taajuusalue on laajempi ja järjestelmä on adaptiivisempi.



Kuva 2.1 FF – FB –hybridijärjestelmän lohkokaavio (Streeter et. al., 2004). Hybridijärjestelmässä myötäkytketyn sekä takaisinkytketyn järjestelmän hyödyt yhdistyvät.

2.4 Siirreltävät puhallinjärjestelmät

Suurimmat haasteet siirreltävän järjestelmän vaimentamisen näkökulmasta ovat meluäänen suuntaavuus sekä meluäänen aistijoiden sijainnin vaihtelu suhteessa melun lähteeseen. Puhaltimen meluäänen suuntakuvio saattaa myös muuttua riippuen alustasta, jolle se on asetettu, sillä puhaltimen kotelointi voi värähdellä eri tavoin kovalla ja pehmeällä pinnalla. Esimerkiksi pehmeä ja joustava muovimatto saattaa absorboida ja vaimentaa koteloinnin värähtelyä, toisin kuin vaikkapa kova parkettilattia.

Kolmiulotteisessa tilassa, jossa sekä melun lähde, että sen aistija voivat vaihtaa sijaintiaan, ANC:a toteutettaessa vaimennuksen suorituskyky olisi paras mahdollinen eli ns. lokaalisti globaali, jos meluääni saataisiin vaimennettua heti sen synnyttyä. Lokaalisti globaalilla vaimennuksella tarkoitetaan sellaista vaimennusta, joka on yhtä suuri mistä tahansa suljetussa tilassa sijaitsevasta pisteestä tarkasteltuna. Ilmapuhaltimista ei ole kuitenkaan välttämättä yksinkertaista eritellä yksittäistä pistemäistä lähdettä meluäänelle. Häiritsevää ääntä voi syntyä niin moottorista ja ilmavirran nopeuden vaihteluista, kuin laitteen kotelorakenteiden värähtelystäkin. On hyvin tyypillistä, että häiritsevää ääntä syntyy monella tapaa ja melun äänitaso sekä taajuussisältö vaihtelevat eri suunnista tarkasteltuna. Tämä hankaloittaa merkittävästi ANC-järjestelmään kuuluvien komponenttien, kuten mikrofonin/mikrofonien sekä kaiuttimen/kaiuttimien sopivaa sijoittamista laitteen kotelointiin.

Jos meluääntä ei saada vaimennettua heti sen synnyttyä, eli jos ANC-järjestelmää ja sen komponentteja ei saada sijoitettua lähelle meluäänen lähdettä, vaimennus ei toteudu kaikissa mahdollisissa aistijan sijanneissa. Tällaisessa lokaaliksi vaimennukseksi kutsutussa tilanteessa syntyvän hiljaisen alueen laajuus riippuu tarkasteltavasta aallonpituudesta, sitä vastaavasta taajuudesta, sekä alkuperäisen melun ja generoidun vastamelun leviämisestä tilaan. Ongelma on sitä suurempi, mitä korkeampi tarkasteltava taajuus on – esimerkiksi 2000 Hz taajuudella aallonpituus olisi n. 17.2 cm, jolloin pahimmassa tapauksessa siirtymällä vain 8.6 cm vaimennus saattaisi muuttua vahvistukseksi, riippuen meluäänilähteen sekä sitä vaimentavan järjestelmän sijainneista suhteessa toisiinsa.

Eräs ainakin periaatteessa toteutettavissa oleva vaihtoehto kotelointiin sijoitettavalle ANC-järjestelmälle olisi suljetussa kolmiulotteisessa tilassa globaalisti vaikuttava ANC-järjestelmä. Tällainen järjestelmä olisi teoriassa toteutettavissa joko monipistemittauksia hyödyntävällä MIMO-säätöjärjestelmällä, tai vaihtoehtoisesti Kircchoff-Helmholtzin integraaliin perustuvan aaltokenttäsynteesin ja -analyysin keinoin (Kuntz & Rabenstein, 2004). Toteutus olisi käytännössä kuitenkin todella monimutkainen ja epäkäytännöllinen eikä kovinkaan tarkoituksenmukainen - monipistejärjestelmä edellyttäisi toimiakseen suuren määrän laskentatehoa sekä tiheästi aseteltuja sensoreita (mikrofoneja) vaimennettavassa tilassa.

3. MELUN MITTAAMINEN

3.1 Yleisiä käytäntöjä

Melua mitattaessa on tärkeää valita oikeat suureet, joita tarkkailla. Lisäksi mittauksiin liittyy tiettyjä parametreja, jotka on valittava mittauksiin liittyvän tilanteen mukaan. Esimerkiksi impulssimaista melua on mitattava eri tavalla kuin jatkuvaa, hitaasti vaihtelevaa tai tasaista melua.

3.2 Mitattavat suureet ja mittausparametrit

Melua mitattaessa halutaan usein tietää, kuinka suuri äänen fysikaalinen äänenvoimakkuus, eli äänitaso on. ANC:n toteuttamisen näkökulmasta melun voimakkuudella ei yksinään ole suurta merkitystä, mutta se täytyy mitata, jotta melun taajuusjakauma saadaan muodostettua. Taajuusjakauman sisältö vaikuttaa merkittävästi siihen, millaisella säätöjärjestelmällä järjestelmä on mahdollista toteuttaa. Taajuusjakauma saadaan muodostettua mittaamalla melun äänitaso eri taajuuksilla.

Mittausten onnistumisen kannalta on sopivan suureen lisäksi tärkeää valita oikeat mittausparametrit. Ilmapuhaltimen tapauksessa melu on matalataajuista, sekä jatkuvalta äänitasoltaan tyypillisesti alle 60 dB. Ilmapuhallinmelun sisältö ei myöskään muutu merkittävästi eri ajan hetkinä. Taajuusjakaumaa mitattaessa käytettäviksi parametreiksi valitaan fast-aikapainotus ja taajuusalueeksi 6.3 Hz – 20 kHz kolmannesoktaavikaista-asetuksella. Taajuuspainotuksia ei käytetä, sillä näin ANC:n kannalta merkittävä meluäänen taajuussisältö saadaan realistisemmin näkyviin.

3.3 Ilmavirran mittaaminen

Ilmavirran aiheuttamaa melua mitattaessa on oltava tarkkana äänitasomittarin sijoittelussa. Äänitasomittari on sijoitettava riittävän kauas mitattavasta kohteesta. Jos mittari sijoitettaisiin liian lähelle mitattavaa ilmapuhaltimen ulostuloaukkoa, sen tuottama turbulentti ilmavirtaus voisi vuorovaikuttaa mikrofonin kanssa ja synnyttää siten ylimääristä näennäismelua, jolloin mittaustulos vääristyisi (Pearse & Kingan, 2006). Äänitasomittarin mikrofoni suojataan tuulisuojalla, jotta ilmavirran mittauksiin aiheuttama virhe vähenisi.

3.4 Norsonic Sound Analyser Nor140

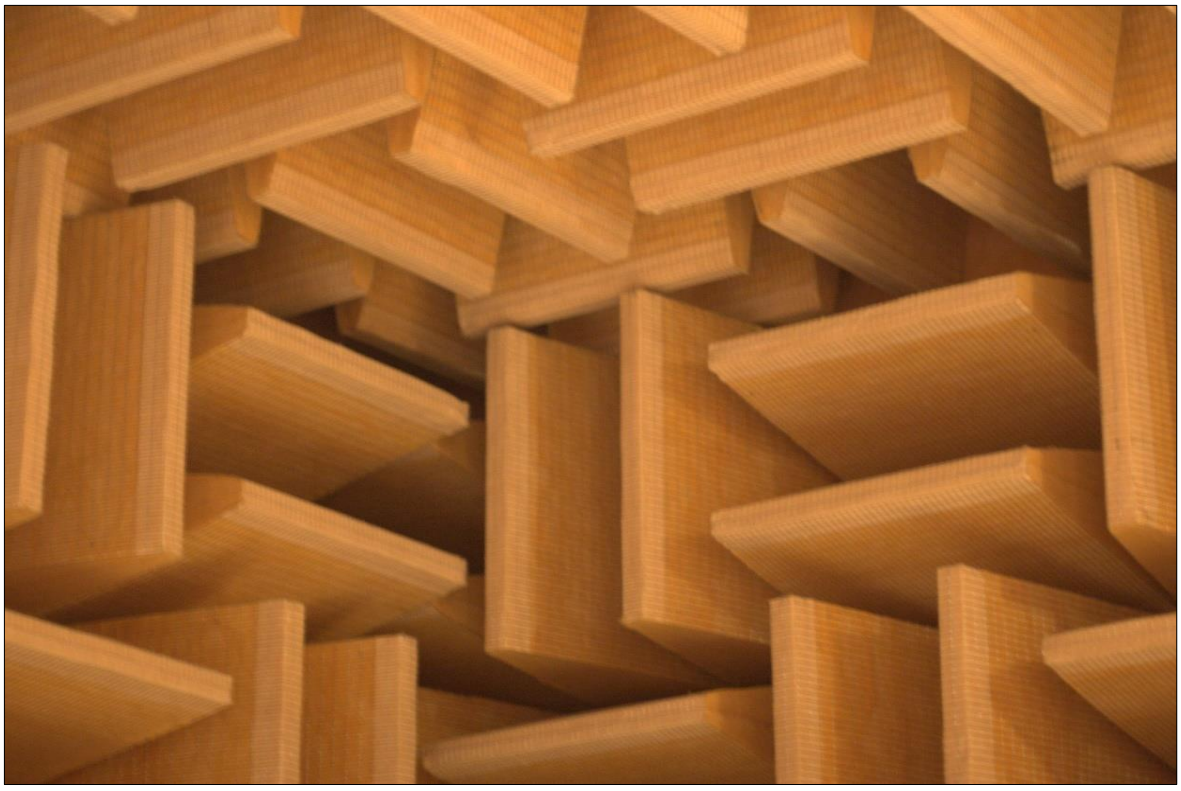
Tähän tutkimukseen liittyvät melumittaukset toteutetaan Norsonic Sound Analyser Nor140 -äänitasomittarilla. Laite täyttää taulukon 3.1 mukaiset äänitasomittareihin liittyvät standardit ja se on kalibroitu standardin IEC 61672-3 mukaisesti 12.12.2016.

Taulukko 3.1 Norsonic Nor140 –äänitasomittarin täyttämät standardit.

Standardi	Luokitus
IEC 61672-1:2002	1
IEC 60651	1
IEC 60804	1
IEC 61260	1
ANSI S1.4-1983 (R2001) lisäyksellä S1.4A-1985	1
ANSI S1.43-1997 (R2002)	1
ANSI S1.11-2004	1

3.5 LUT:n kaiuton huone

Mittaukset toteutetaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston kaiuttomassa huoneessa. Kaiuton huone (kuva 3.1) on ulkoisilta häiriööääniltä eristetty tila jonka lattia, katto sekä seinät on suunniteltu siten, että ne absorboivat huoneen sisällä syntyviä ääniaaltoja. Tällöin ääniaallot eivät pääse heijastumaan huoneen sisäpinnoista mihinkään suuntaan. Näin vältytään tilassa syntyvien ääniaaltojen interferenssiltä, mikä pahimmassa tapauksessa voisi vääristää mittaustuloksia.



Kuva 3.1 Akustisia elementtejä kaiuttomassa huoneessa. (Robinson, 2013)

LUT:n kaiuton huone soveltuu riittävän hyvin mittauksiin, joissa mitattavan äänen taajuus on tutkimuksen kannalta oleellisimman, ihmisen kuuloalueen herkimmän osa-alueen 2 – 5 kHz (Gelfand, 2011) puitteissa. Huoneelle ominainen mitta-alue määräytyy usean tekijän yhteisvaikutuksesta, mutta yksinkertaistettuna huoneen akustisten elementtien ulkoisten mittojen perusteella voidaan arvioida ainakin matalin taajuus, jolla huoneen mittausominaisuudet ovat otollisimmillaan elementtien dimensioiden näkökulmasta. Jotta heijastuksilta vältyttäisiin mahdollisimman hyvin, mitattavan äänen aallonpituuden tulisi olla korkeintaan kahden elementin välisen sisääntuloaukon leveyden suuruinen, eli $\lambda_{max} = 0{,}13$ m. Ilmanpaineen sekä lämpötilan vaihtelu mittaustilassa on pientä ja voidaan siten jättää huomiotta. Oletetaan äänen nopeudeksi ilmassa $v = 343$ m/s. Tällöin matalin, akustisten elementtien dimensioiden puolesta luotettavasti mitattavissa oleva taajuus olisi $f_{min} = v / \lambda_{max} = 2{,}6$ kHz. Tämä on kuitenkin vain hyvin karkeasti suuntaa antava arvio ja sitä matalampiakin taajuuksia voidaan tämän tutkimuksen puitteissa mitata riittävällä tarkkuudella.

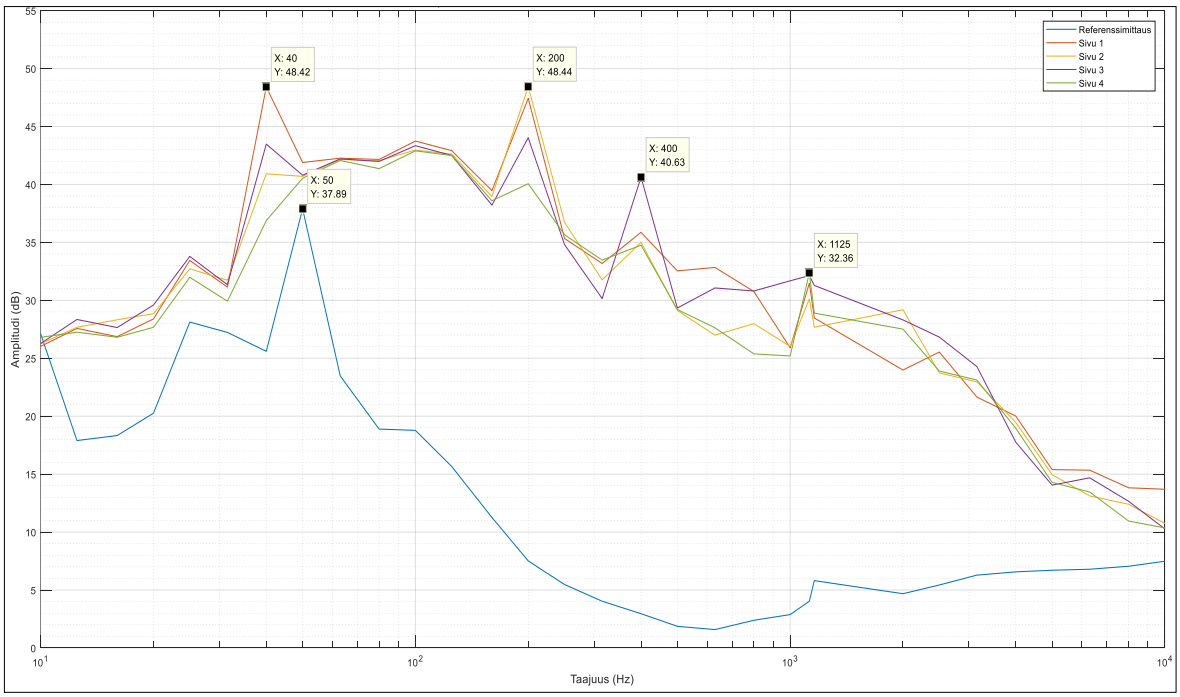
4. CASE-ESIMERKKIJÄRJESTELMÄN MITTAUKSET

Tässä kappaleessa esitellään case-esimerkkinä käytetystä järjestelmästä taltioidut mittaustulokset, sekä tuloksiin liittyvä analyysi. Ennen tulosten esittelyä ja analyysiä kuvaillaan lyhyesti mittausjärjestelyt.

4.1 Meluäänen taajuusjakauma

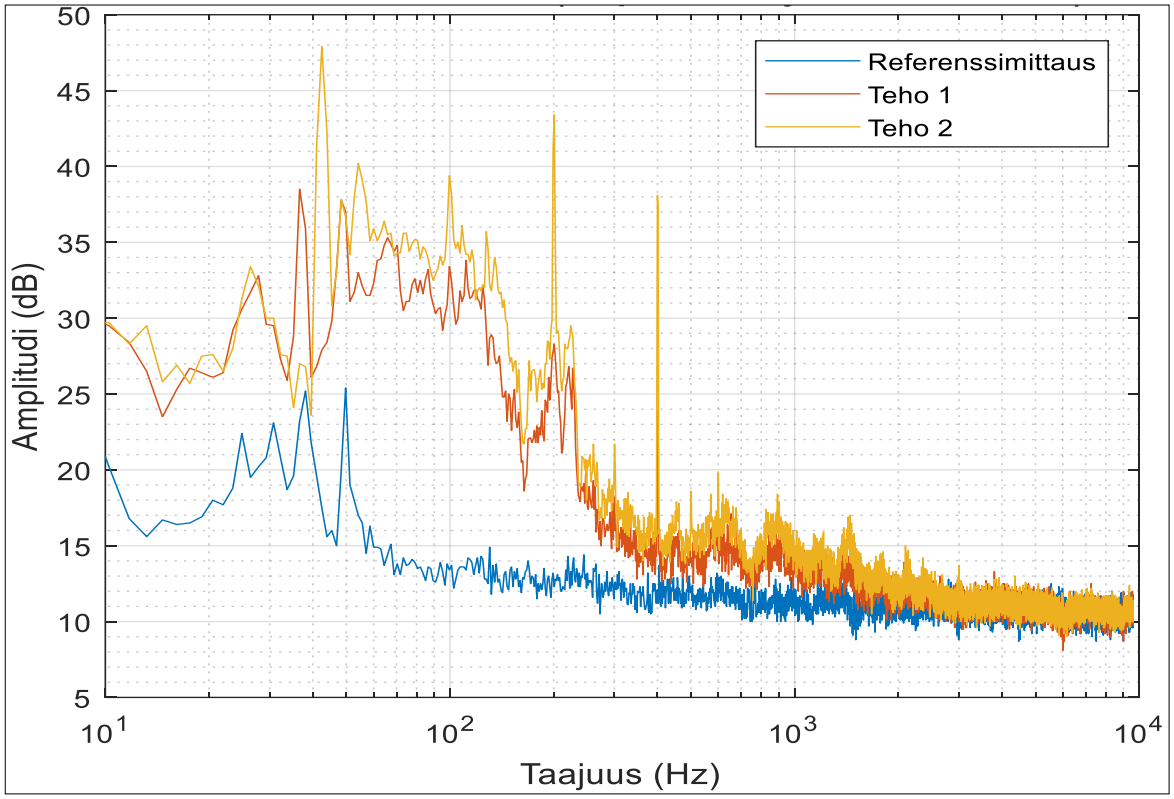
Aluksi mitattiin kaiuttoman huoneen taustamelu referenssiarvoksi esimerkkilaitteen tuottamalle meluäänelle. Mittaukset ovat kokonaisuutena luotettavampia, kun mahdolliset selkeästi erottuvat piikit kaiuttoman huoneen taustamelun spektrissä eivät sekoitu varsinaiseen mittauksen kohteeseen. Näiden mittausten tapauksessa kaiuttoman huoneen taustamelusta paljastui varsin selkeästi erottuva piikki 50 Hz kohdalta (kuva 4.1). Kyseisen piikin olisi voinut tahattomasti tulkita mitattavan esimerkkijärjestelmän tuottamaksi, jos referenssimittausta ei olisi tehty.

Esimerkkilaitteen ekvivalenttista äänitasoa mitattiin fast-aikapainotuksella ja kolmannesoktaavikaista-asetuksella kahden minuutin jaksoissa. Mittausten taajuusalueeksi asetettiin 6.3 Hz – 20.0 kHz. Meluääntä mitattiin vaakasuuntaisesti laitteen neljältä eri sivulta. Mittauksissa ei käytetty taajuuspainotussuotimia, kuten esimerkiksi ihmisen herkimmän kuuloalueen taajuusaluetta korostavaa A-taajuuspainotusta. Suodatusta ei käytetty, jotta mittaustulokset olisivat mahdollisimman todenmukaiset ja mahdolliset helposti vaimennettavissa olevat piikit näkyisivät spektrissä selkeämmin. Taajuusjakauman kapeakaistaisimmat ja voimakkaimmat piikit sijaitsevat mittausten perusteella taajuuksilla 40, 200 ja 400 Hz (Kuva 4.1). Melun voimakkuus vaikuttaa ainakin joillakin taajuuksilla riippuvan suunnasta, josta sitä mitataan.



Kuva 4.1 Äänitasojen voimakkuudet taajuuden funktiona. Kuvaajasta on erotettavissa muutama tonaalinen piikki. Matalimmilla taajuuksilla mittaustulokset eivät ole täysin luotettavia, sillä LUT:n Kaiuton huone ei sovellu erityisen hyvin matalien taajuuksien mittaamiseen.

Fast-aikapainotetun ekvivalenttisen äänitason mittaamisen lisäksi laitteen tuottamalle melulle tehtiin 29:n näytteen FFT-analyysi laitteen molemmilla eri käyttötehoilla (tehot I ja II). Useasta näytteestä keskiarvoistettu FFT-analyysi (Kuva 4.2) mahdollistaa taajuussisällön yksityiskohtaisemman tarkastelun. Mitattaessa äänitasomittari asetettiin 20cm etäisyydelle laitteesta, osoittamaan mitattavan sivun keskipisteeseen (57 cm ylä- ja alalaidasta, 20 cm sivuista).



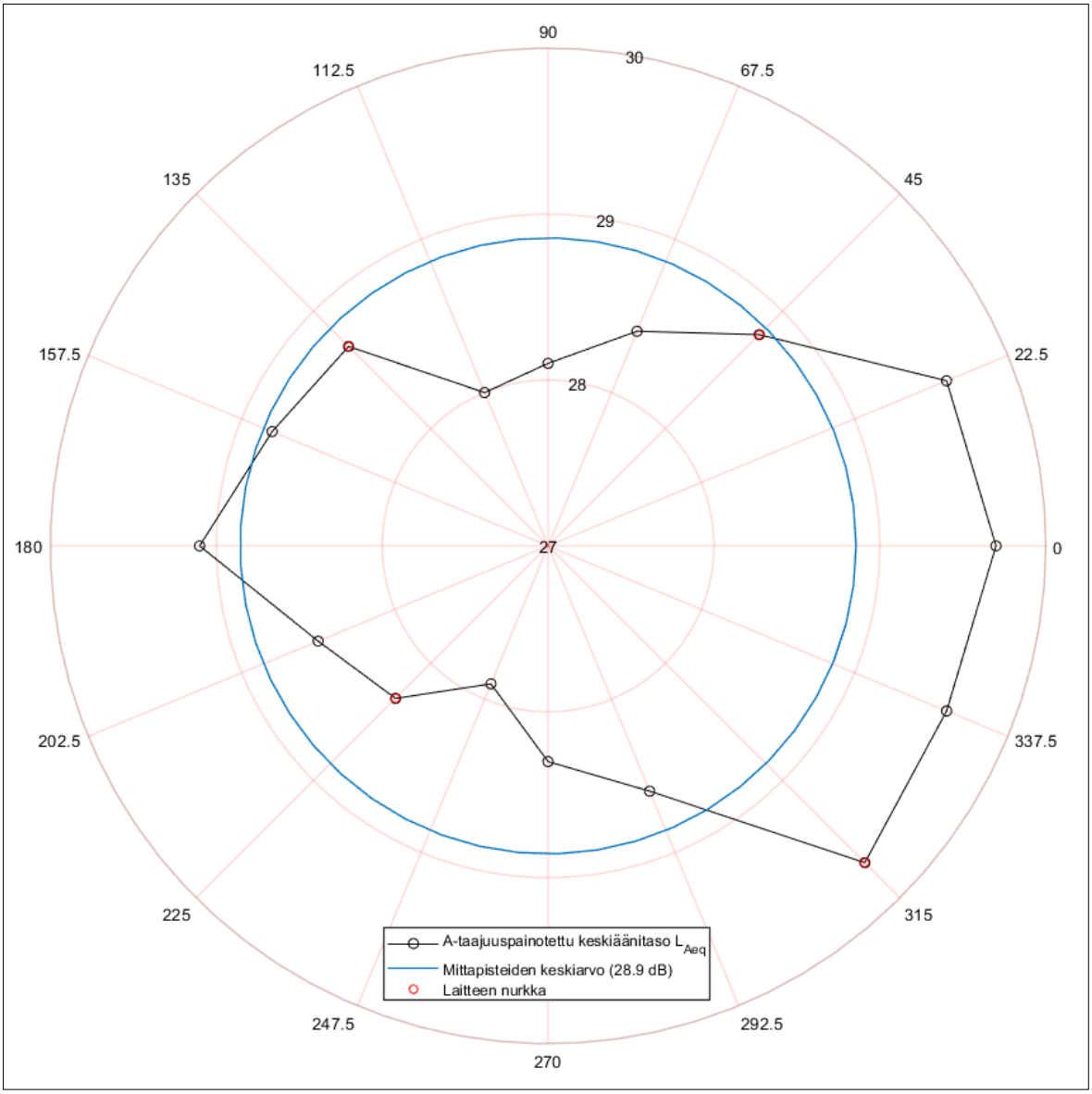
Kuva 4.2 FFT-muunnettu taajuusjakauma (äänitaso taajuuden funktiona). Merkittävimmät melun sisältämät tonaaliset piikit erottuvat selkeästi 200 Hz ja 400 Hz kohdalla. Matalilla taajuuksilla melulla on kapeakaistaisia komponentteja, kun taas korkeilla taajuksilla melu on laajakaistaista.

Melun taajuusjakauma on hyvin samankaltainen laitteen eri käyttötehoilla, spektrikuvaajat vastaavat pääosin toisiaan. Toisaalta melun äänenvoimakkuus näyttää ainakin tietyillä taajuuksilla riippuvan tehosta, jolla laitetta käytetään. Jo aikaisemmin havaitut voimakkaimmat piikit (200 & 400 Hz) saatiin entistä selkeämmin näkyviin äänitasomittarin FFT-analyysillä. Mittausten perusteella voidaan todeta myös, että suurempi käyttöteho saa aikaan voimakkaamman meluäänen.

4.2 Äänen suuntaavuus

Eräs aktiivisen melunvaimennuksen toteutusta merkittävästi hankaloittava tekijä on meluäänen suuntaavuus. Suuntautuvaa melua voi aiheuttaa esimerkiksi äänilähteen rakenteiden, kuten koteloinnin, värähtely. Parhaan lopputuloksen takaamiseksi vaimennusta varten generoitavan vastamelun amplitudin tulisi vastata mahdollisimman tarkasti alkuperäisen meluäänen amplitudia. Jos melun voimakkuus vaihtelee eri suunnista tarkasteltuna, on yhtenäisen, ns. globaalin melunvaimennuksen toteutus haastavaa tai jopa mahdotonta.

Melun mahdollisen suuntaavuuden selvittämiseksi esimerkkijärjestelmän A-taajuuspainotettu keskiäänitaso (30 sekunnin näyte) mitattiin 22.5° välein, yhteensä kuudestatoista eri suunnasta. Äänitasomittari sijoitettiin yhden metrin etäisyydelle laitteesta, korkeudeksi valittiin laitteen pystysuuntainen keskipiste. Mittarin etäisyys ja korkeus pyrittiin valitsemaan siten, että mahdolliselta kappaleessa (3.3) kuvaillulta ilmavirran aiheuttamalta pseudo-melulta vältyttäisiin.

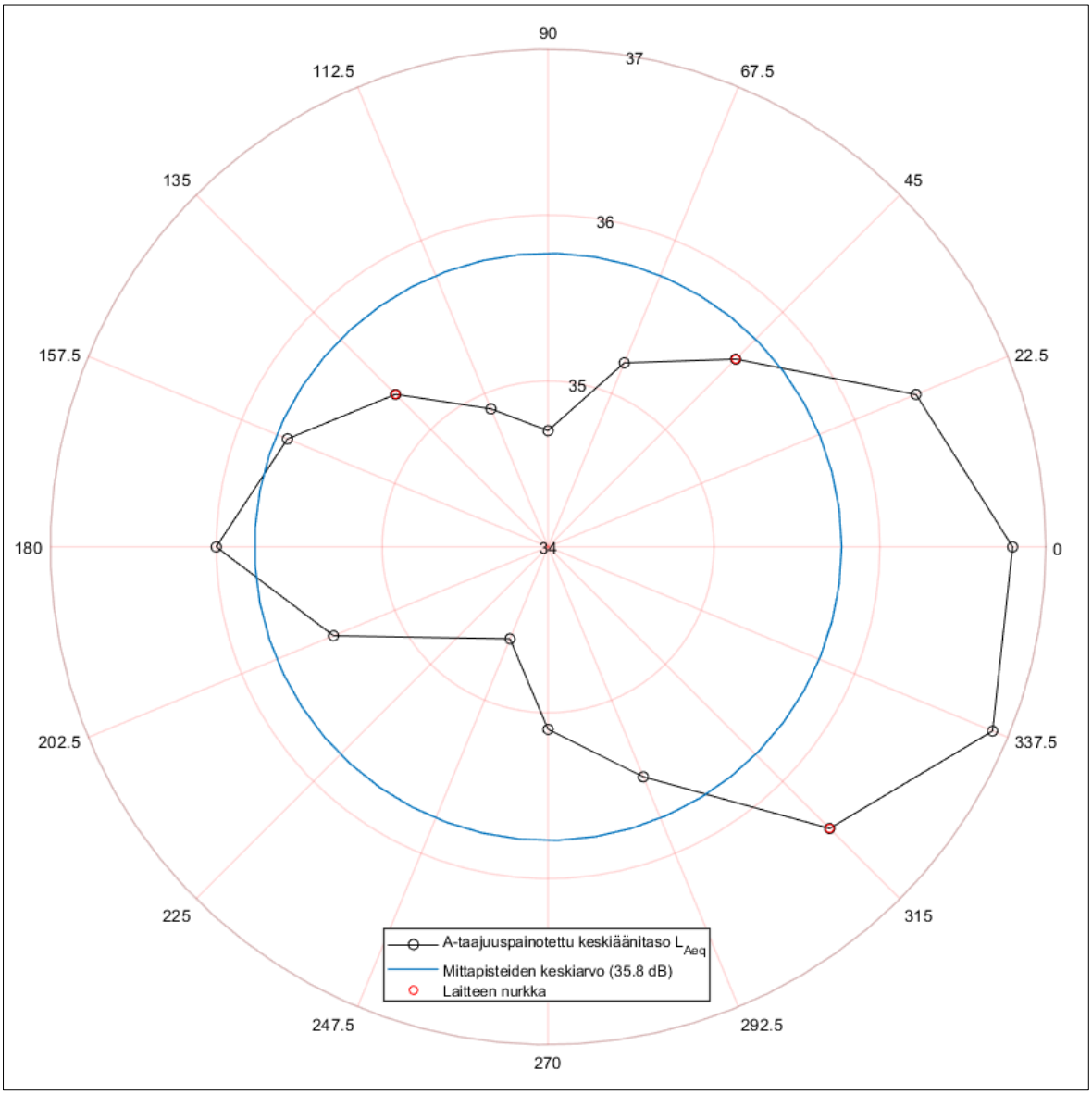


kuva 4.3 Meluäänen suuntakuvio (A-taajuuspainotettu keskiäänitaso 22.5° välein), käyttöteho 1. Melun äänitaso vaihtelee eri suunnista tarkasteltuna, 1. teholla kahden pisteen välinen ero on suurimmillaan n. 2 dB.

Kerätyn mittausdatan pohjalta muodostetuista suuntakuvioista (kuvat 4.3 ja 4.4) nähdään, että meluäänen voimakkuus vaihtelee ANC:n toteutettavuuden kannalta merkittävästi riippuen tarkasteltavasta suunnasta. Molemmat suuntakuviot on piirretty lineaariseen polaarikoordinaatistoon, vaikka äänitaso on logaritminen suure. Tällöin suuntaavuus on helpompi hahmottaa, sillä äänitason vaihtelu eri suunnista tarkasteltuna korostuu hieman. Tehtyjen

mittausten perusteella vaikuttaa siltä, että laitteen tuottama melu on käyttötehosta riippumatta voimakkainta sen sivun suuntaan, jossa laitteen virtalähde sijaitsee (kulmat 0°, 22.5°, 315° sekä 337.5°).

Käyttötehon 2. suuntakuviota (kuva 4.4) piirrettäessä selvisi, että 225° kulmaa vastaava äänitason arvo (38.9 dB) oli merkittävästi suurempi kuin muiden mittauspisteiden. Mittausvirhe aiheutui oletettavasti jostakin ulkoisesta häiriöstä, kuten liian aikaisesta mittaustilan oven avauksesta. Kyseinen piste jätettiin piirtämättä suuntakuvioon, sillä se vääristäisi tulosta sekä sen havainnollisuutta.

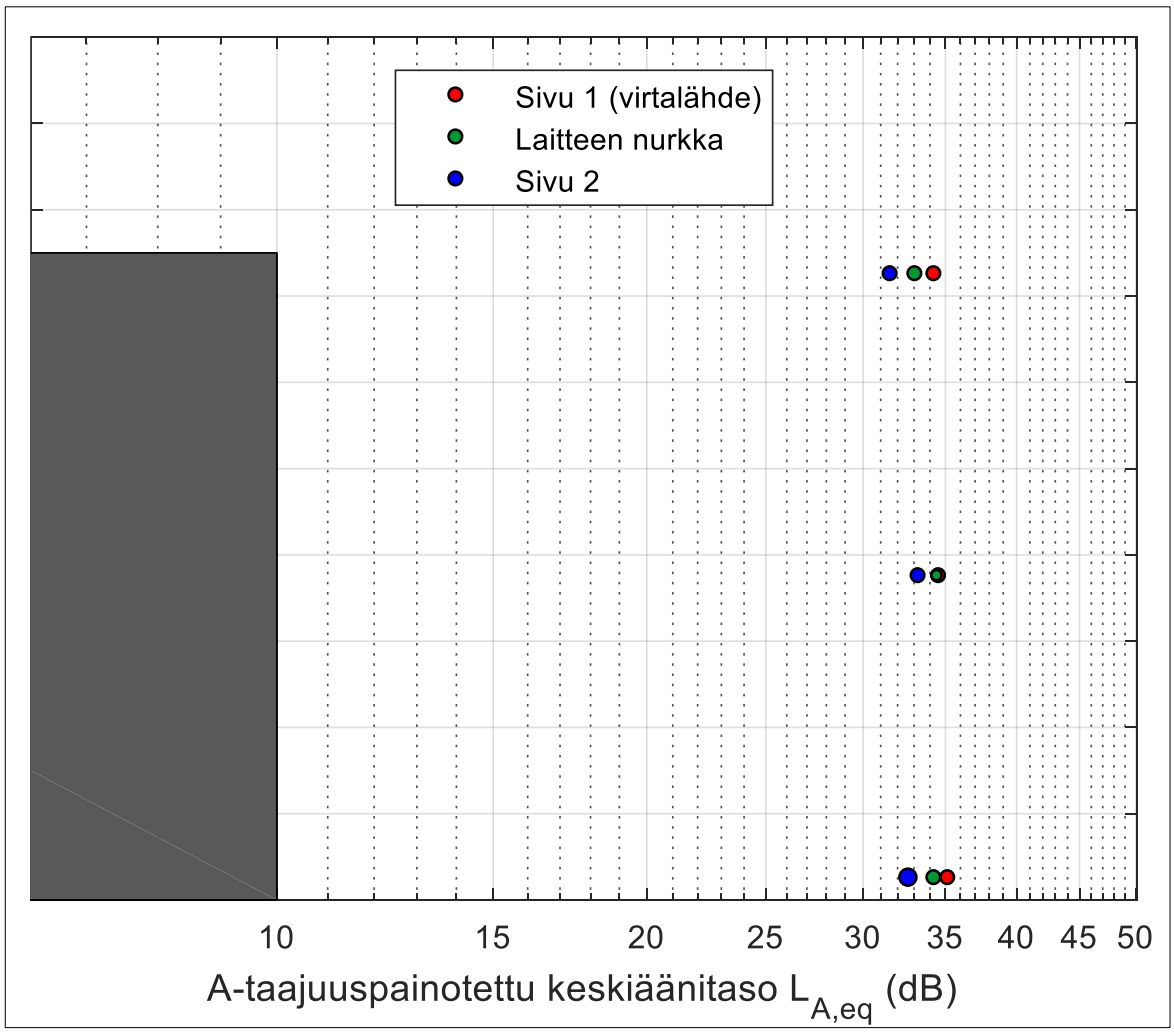


kuva 4.4 Meluäänen suuntakuvio, käyttöteho 2. (A-taajuuspainotettu keskiäänitaso 22.5° välein). 2. teholla suurin ero äänitasoissa on n. 2 dB. Melun äänitaso vaihtelee eri suunnista tarkasteltuna.

Suurimmillaan kahden eri suunnista mitatun äänitason ero on kummallakin käyttöteholla n. 2 dB. Tämä tarkoittaa, että äänitason voimakkuuden vaihtelu kovaäänisimmän ja hiljaisimman sivun suunnista kuunneltuna on melkein ihmisen kuuloaistillakin eroteltavissa. Jos laitteen aiheuttamaa melua vaimennettaisiin ANC:n keinoin, meluäänen suuntaavuus saattaisi

pahimmillaan aiheuttaa lähtötilannetta epäsuotuisamman tilanteen, jossa vaimennus toimisi johonkin suuntaan, mutta melun määrä kasvaisi johonkin toiseen suuntaan.

Horisontaalisen suuntaavuuden lisäksi myös melun pystysuuntaista, eli vertikaalista suuntaavuutta pyrittiin hahmottelemaan mittaamalla järjestelmää kolmelta eri korkeudelta sen voimakasmeluisimmilta sivuilta, sekä niiden välisen nurkan suunnasta laitteen käyttöteholla 2. Mittausten perusteella osoittautui, että melulla on horisontaalisen suuntaavuuden lisäksi myös vertikaalista suuntaavuutta (kuva 4.5). Suurin, 1.7 dB suuruinen ero kahden eri korkeudelta mitatun äänitason välillä havaittiin laitteen sivulta 2. Myös laitteen nurkan suunnalta mitattuna äänitaso oli suurimmillaan juuri keskikorkeudella. Erot eivät ole taaskaan ihmiskorvalla erotettavissa, mutta mikäli ne aiheutuvat koteloinnin värähtelystä, olisi vaikutus ANC:n toteutettavuuteen merkittävä.



kuva 4.5 Meluäänen vertikaalinen suuntaavuus (A-taajuuspainotettu keskiäänitaso), käyttöteho 2. Pystyakseli kuvaa korkeutta, jolla laitteen tuottamaa melua mitattiin.

Vertikaalisen suuntaavuuden perusteella voidaan päätellä ulos virtaavan ilman aiheuttaman melun olevan kokonaisuuden kannalta merkitykseltään suhteellisen vähäinen. Lisäksi ulosvirtaus ohjautuu lattian tasalle, jolloin etäisyys kuulijaan on suurehko. Meluäänen lähteen tarkka määrittäminen on kuitenkin hyvin haastavaa, sillä ilman virtausnopeuden vaihtelun lisäksi melua tuottaa myös ilmaa laitteen läpi ohjaava moottori, sekä ilmavirran ja moottorin pyörimisliikkeen aiheuttama koteloinnin värähtely.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kirjallisuustutkimuksen keinoin muodostettu tietoperusta sekä case-esimerkkijärjestelmän mittaustulokset ja niihin liittyvä analyysi osoittavat, että aktiivisen melunvaimennuksen toteutus ainakin siirreltävän esimerkkijärjestelmän tapauksessa olisi hyvin vaikeaa. Case-esimerkkijärjestelmän tapauksessa suurimmat toteutusta hankaloittavat tekijät ovat melun aiheuttajan yksilöinnin haasteellisuus, sekä melun monimutkainen horisontaalinen ja vertikaalinen suuntaavuus. Myös melun taajuusjakauman vaihtelevuus eri taajuusalueilla hankaloittaa toteutusta – matalilla taajuuksilla melu sisältää joitain kapeakaistaisia, tonaalisia piikkejä, mutta korkeammilla taajuuksilla melu on laajakaistaista.

Yksittäiset taajuusjakaumassa selkeästi erottuvat, ihmisen kuuloalueelle sijoittuvat tonaaliset piikit äänitasossa voisi mahdollisesti vaimentaa aktiivisen melunvaimennuksen keinoin, mikäli niiden aiheuttajan sijainti saataisiin määritettyä tarkasti. Häiritsevyyden kannalta tarkastellen saavutettu hyöty ei olisi kuitenkaan kovinkaan suuri, sillä voimakkaimmankin mitatun piikin äänitaso on vain noin 25dB mitattua referenssitasoa suurempi. Melun häiritsevyys perustuu pääasiassa aistijan subjektiiviseen kokemukseen, mutta valtaosa ihmisistä ei pidä voimakkainta mitattua äänitasoa merkittävän häiritsevänä. Esimerkiksi Suomen meluntorjuntaa koskevan lainsäädännön mukainen ohjearvo liike- ja toimistohuoneiden äänitasolle on 45dB.

Fysikaalisen äänenvoimakkuuden lisäksi myös meluäänen taajuus vaikuttaa sen häiritsevyyteen. Usein ärsyttävimmiksi koetaan kapeakaistaiset, kuuloalueen korkeataajuisimmat äänet. Mittaamalla havaitut piikit (200 Hz & 400 Hz) esimerkkijärjestelmän meluäänessä sijoittuvat ihmisen kuuloalueen matalaan päätyyn, joten taajuudenkaan näkökulmasta häiritsevyys ei vähenisi merkittävästi.

6. YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen päätuloksena voidaan todeta, että aktiivinen melunvaimennus voidaan ainakin joissain tilanteissa toteuttaa myös siirreltäviin järjestelmiin – toteutus on kuitenkin huomattavasti haastavampaa kuin kiinteästi asennetuissa järjestelmissä, eli sellaisissa järjestelmissä, joissa melun aistija sekä melun lähde ovat paikallaan suhteessa toisiinsa. Tutkimuksen päätulokset ovat yleistettävissä muihinkin siirreltäviin ilmapuhaltimiin, sillä tapaustutkimusosassa tutkittu esimerkkijärjestelmä on melun aiheuttajien sekä meluun liittyvien ominaisuuksien puolesta verrattavissa muihin siirreltäviin ilmaa puhaltaviin järjestelmiin.

Ilmapuhallinjärjestelmien melu voi olla laaja- tai kapeakaistaista, tai muodostua näiden yhdistelmästä. Kuten ilmapuhallinmelu yleensä, myös mitatun esimerkkijärjestelmän melu on matalilla taajuuksilla voimakkainta ja lisäksi sen voimakkuus vaihtelee tarkastelusuunnasta riippuen. Meluäänen taajuusjakauma osoittautui monimuotoiseksi; spektristä löytyi yksittäisiä piikkejä matalilta taajuuksilta, mutta korkeilla taajuuksilla melu on laajakaistaista. Havaitut piikit eivät kuitenkaan häiritsevyyden näkökulmasta ole taajuudeltaan ja fysikaaliselta äänenvoimakkuudeltaan kovinkaan merkittäviä.

Mahdollisessa jatkotutkimuksessa esimerkkijärjestelmän suuntaavuutta voisi koittaa määrittää tarkemmin. Esimerkkijärjestelmää olisi mielenkiintoista tarkkailla myös akustisella kameralla. Akustisella kameralla myös mahdollinen koteloinnin värähtelyn aiheuttama melu saataisiin paikannettua tarkasti. Tällöin melun suuntaavuuden profiilin ja mahdollisesti myös aiheuttajan saisi määritettyä huomattavasti tarkemmin kuin tässä tutkimuksessa. Jatkotutkimuksessa voisi myös pyrkiä kehittämään menetelmiä ilmapuhaltimiin liittyvien melun aiheuttajien sekä niiden tarkan sijainnin määrittämiseen.

LÄHTEET

Anon, 2008. Noise Generated in Air Ducts. [verkkoaineisto]. [viitattu 8.4.2018]. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/ducts-noise-generation-d_1405.html.

Elliott, S. J., Nelson, P. A. 1993. Active noise control. IEEE Signal Processing Magazine. Vol. 10, no. 4. S. 12–35. ISSN 1053-5888.

Gelfand, S. 2011. Essentials of Audiology. 3rd ed. Julkaisupaikka tuntematon: Thieme. 560 s. ISBN 1604061553.

Hansen, C. H. 2001. Understanding Active Noise Cancellation. London, United Kingdom: Spon Press. 162 s. ISBN 0-203-77557-0.

Hansen, C. H. 2003. Does active noise control have a future?. Teoksessa: Wesprac VIII – Acoustics on the move. Melbourne, Victoria, Australia. 7-9.4.2003. The 8th Western Pasific acoustics conference.

Kuntz, A., Rabenstein, R. 2004. An approach to global noise control by wave field synthesis. Teoksessa: IEEE. 12th European Signal Processing Conference. Wien, Itävalta. 6-10.9.2004. Piscataway, New Jersey, United States of America: IEEE. S. 1999-2002. ISBN 9783200001657.

Meeker, W. F. 1959. Active ear defender systems: development of a laboratory model, part II (WADC TR 57-368). Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, Ohio, United States of America: Defense Technical Information Center. 41 s.

Milosevic, A., Schaufelberger, U. 2005. Active Noise Control. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. University of Applied Sciences Rapperswil HSR, Department of Electrical Engineering. Rapperswil, 2005. [viitattu 12.11.2017]. Saatavissa: https://web.archive.org/web/20120426050529/http://www.medialab.ch/archiv/pdf_studien_diplomarbeiten/da05/da2005-104_ActiveNoiseControl.pdf.

Oliva, D., Hongisto, V., Haapakangas, A. 2017. Annoyance of low-level tonal sounds – Factors affecting the penalty. Building and Environment. Vol. 123. S. 404-414. ISSN 0360-1323.

Pearse, J. R., Kingan, M. J. 2006. Measurement Of Sound In Airflow. Teoksessa: International Institute of Acoustics and Vibration. Julkaisupaikka tuntematon. Proceedings of a meeting held 2-6 July 2006. Wien, Itävalta. 2-6.7.2006. S. 1448-1456. ISBN: 978-1-62748-150-2.

Robinson, P. (Flickr: Anechoic Chamber Dark) [CC BY-SA 2.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0)], via Wikimedia Commons.

Streeter, A. D., Ray, L. R., Collier, R. D. 2004. Hybrid Feedforward-Feedback Active Noise Control. Teoksessa: American Automatic Control Council, American Institute of Aeronautics and Astronautics, International Federation of Automatic Control. Proceeding of the 2004 American Control Conference. Boston, Massachusetts, United States of America. 30.6.-2.7.2004. Julkaisupaikka tuntematon. American Automatic Control Council. S. 2876 – 2881. ISBN 9780780383357.

Urquhart, R. L. 2002. The Effects of Noise on Speech Intelligibility and Complex Cognitive Performance. [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Industrial and Systems Engineering. Blacksburg, VA. [viitattu 12.11.2017]. etd-04222002-143554 (sähköinen). Saatavissa: http://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-04222002-143554/

US 2043416 A. 1936. Process of silencing sound oscillations. Paul Lueg, Kirchstrasse, Saksa. (Lueg, P.) DE 714582, 8.3.1934. Julk. 9.6.1936. 3 s.

Xiao, Y., Wang, J. 2011. A New Feedforward Hybrid Active Noise Control System. IEEE Signal Processing Letters. Vol. 18, no. 10. S. 591-594. ISSN 1070-9908.