

Laajakaistaisen melun aktiivinen äänen vaimentaminen

Jukka Syvälahti

Opinnäytetyö

Toukokuu 2015

Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma





Tekijä(t) Syvälahti, Jukka	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 07.05.2015
	Sivumäärä 97	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Laajakaistaisen melun aktiivinen äänen vaimentaminen		
Koulutusohjelma Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Jorma Matilainen & Tomi Nieminen		
Toimeksiantaja(t) Kojair Tech Oy		
Tiivistelmä <p>Kojair Tech Oy:n päätuote on II-luokan mikrobiologinen suojakaappi. Asiakkaille yksi tärkeimmistä tuotteen ominaisuuksista on matala äänenvoimakkuus. Yrityksen tuotekehityksessä on pitkään paneuduttu äänenpainetasojen vähentämiseen. Perinteistä passiivista äänenvaimennusta tuotteessa ei voida toteuttaa, sillä passiiviset elementit toimivat mikrobien kasvualustoina ja ovat täten EN 12469-standardin vastaisia.</p> <p>Opinnäytetyön tehtävänä oli tutkia aktiivisen äänenvaimennuksen soveltuvuutta mikrobiologisen suojakaapin äänenvaimennuksessa sekä toteuttaa toimiva prototyyppi aktiivisesta äänenvaimennusjärjestelmästä.</p> <p>Toimivan prototyypin toteuttaminen ei onnistunut, koska järjestelmän toteutus vaatisi korkeaa ohjelmoinnin ja digitaalisen signaalinkäsittelyn osaamisen tasoa. Aktiivisen äänenvaimennuksen soveltuvuutta tuotteeseen ei pystytty luotettavasti selvittämään. Tarkan taajuussisällön mittaaminen vaatisi lisää äänenpainetaso mittauksia. Optimaalinen referenssi- ja virhemikrofonien sijoittelu suuren koherenssin saavuttamiseksi dominoivilla taajuuskomponenteilla vaatisi testausta yrityksen ja erehdyksen kautta.</p> <p>Toimeksiantajalla on mielenkiintoa jatkaa tuotekehitysprojektia, koska mahdolliset saavutettavat hyödyt ovat merkittäviä. Järjestelmän jatkokehitystä varten tarvitaan ohjelmointia ja digitaalista signaalinkäsittelyä osaavia yhteistyökumppaneita.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Aktiivinen äänenvaimennus, keskipakopuhallin, tuotekehitys, digitaalinen signaalin käsittely		
Muut tiedot		



Author(s) Syvälahti, Jukka	Type of publication Bachelor's thesis	Date 07.05.2015
		Language of publication: Finnish
	97	Permission for web publication: x
Title of publication Active noise control of broadband noise		
Degree programme Wellness technology		
Tutor(s) Jorma Matilainen & Tomi Nieminen		
Assigned by Kojair Tech Ltd		
Abstract <p>Class II microbiological safety cabinet is the main product of Kojair Tech Ltd. For the customers one of the most important features of the product is low noise level. The research and development department of the company has always taken the reduction of noise levels into account. Traditional passive noise reduction elements cannot be implemented into this product because they act as substrates for microbes and thus are against the EN 12469-standard.</p> <p>The objective of this thesis was to study the feasibility of active noise control for noise reduction in a microbiological safety cabinet and also to engineer a working prototype of an active noise control system.</p> <p>Engineering a working prototype of an active noise control system failed because the implementation of the system would have required high level of digital signal processing and programming. Feasibility of active noise control for noise reduction in the product could not be analyzed reliably. Determining the exact frequency content would require more sound pressure level measurements. Finding optimal locations for the reference and the error microphone in order to achieve high coherence at the dominating frequency components would require more testing by trial and error.</p> <p>The assigner has interest in continuing this research and development project because the possible benefits of the work could be substantial. For further development of the system, cooperation partners who possess skills in digital signal processing and programming are required.</p>		
Keywords/tags (subjects) Active noise control, centrifugal fan, research and development, digital signal processing		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Projektin taustat.....	5
1.2	Nykytila ja tavoitteet	6
2	Melu ja terveys	7
2.1	Ääni.....	7
2.2	Korvan rakenne ja kuuloaisti	8
2.3	Melu	9
2.4	Melun vaikutus terveyteen.....	10
2.5	Meluntorjunta	11
2.6	Passiivisen ja aktiivisen äänenvaimennuksen erot.....	12
3	Aktiivinen äänenvaimennus	13
3.1	Mukautuva aktiivinen myötäkytketty äänenvaimennusjärjestelmä	15
3.2	Elektroninen ohjausjärjestelmä	19
3.2.1	Digitaalinen suodatin (FIR- & IIR-suodattimet).....	19
3.2.2	Mukautuva algoritmi.....	22
3.2.3	Kumoamispolun siirtofunktion mallintaja.....	24
4	Aktiivisen äänenvaimennuksen käyttökohteita	26
4.1	CG13-projekti	26
4.2	Metsäkoneen aktiivinen äänenvaimennus.....	28
4.3	RotoSub – Noctua ANC project.....	34
5	Projektin käytännön toteutus	37
5.1	Äänitasojen mittaaminen (SALAINEN).....	37
5.2	Aktiivisen äänenvaimennusjärjestelmän suunnittelu	37
5.2.1	Äänenvaimennustekniikan valinta.....	37
5.2.2	Komponenttien valinta	38
5.2.3	Ohjausohjelman suunnittelu.....	41
5.2.4	Järjestelmän rakentaminen.....	42
6	Tulokset (SALAINEN).....	46

7 Pohdinta	47
7.1 Projektin työvaiheet ja eteneminen lyhyesti.....	47
7.2 Työvaiheiden arviointi.....	49
7.3 Jatkotoimenpiteet	51
Lähteet	52
Liitteet	54
Liite 1. SALAINEN.....	54
Liite 2. SALAINEN.....	54
Liite 3. SALAINEN.....	54
Liite 4. SALAINEN.....	54
Liite 5. Projektin aikataulu	54
Liite 6. SALAINEN.....	54
Liite 7. SALAINEN.....	54
Liite 8. SALAINEN.....	54

Kuviot

Kuvio 1. Biowizard XTRAline HEPA-esisuodattimella varustettu mikrobiologinen suojakaappi	6
Kuvio 2. Korvan rakenne	8
Kuvio 3. Destruktiivinen interferenssi	13
Kuvio 4. Amplitudivirheen ja vaihevirheen vaikutus aktiivisen äänen vaimennuksen tehokkuuteen.....	13
Kuvio 5. Tavallinen aktiivinen myötäkytketty äänenvaimennusjärjestelmä.....	14
Kuvio 6. Myötäkytketty järjestelmä mukautuvalla algoritmilla	17
Kuvio 7. Aktiivinen takaisinkytketty äänenvaimennusjärjestelmä	17
Kuvio 8. Yksikanavaisen järjestelmän elektronisen ohjausjärjestelmän pääkomponentit.....	19
Kuvio 9. FIR-suodatin.....	20
Kuvio 10. IIR-suodatin	21
Kuvio 11. Tyypillinen ”kulhomainen” virhepinta, jossa virhesignaalin keskineliöarvo on kuvattu suodatinkerrointen funktiona	23
Kuvio 12. Suodatinkerrointen optimaalisten arvojen lähestymisen kuvaamiseen käytetty palloesimerkki	23
Kuvio 13. Kohinan kehitin ja siirtofunktion mallintaja	25

Kuvio 14. GC13:n äänitasot ennen ja jälkeen.....	28
Kuvio 15. Koherenssiarvio referenssi- ja virhemikrofonin välillä moottorin kierrosluvun ollessa 840 rpm.....	29
Kuvio 16. Koherenssiarvio referenssi- ja virhemikrofonin välillä moottorin kierrosluvun ollessa 1500 rpm.....	30
Kuvio 17. Koherenssiarvio referenssi- ja virhemikrofonin välillä moottorin kierrosluvun ollessa 2150 rpm.....	30
Kuvio 18. Virhemikrofonilla mitattu taajuusspektri tyhjäkäynnillä.....	31
Kuvio 19. Virhesignaalin aikakuvaaja, järjestelmä kytketään päälle 2,0 sekunnin kohdalla.....	32
Kuvio 20. Virhemikrofonilla mitattu taajuusspektri työskentelynopeudella.....	32
Kuvio 21. Virhemikrofonilla mitattu taajuusspektri maksiminopeudella.....	33
Kuvio 22. Aksiaalituulettimen tuottamat ääniaallot	34
Kuvio 23. Perinteisen aktiivisen äänenvaimennuksen ja RotoSub®-teknologian vertailua	35
Kuvio 24. Tuulettimen lapojen magneetit ja pyörimisrataa ympäröivä käämi	36
Kuvio 25. Taajuusspektri järjestelmän ollessa päällä ja pois päältä	37
Kuvio 26. SALAINEN.....	37
Kuvio 27. SALAINEN.....	37
Kuvio 28. SALAINEN.....	37
Kuvio 29. SALAINEN.....	37
Kuvio 30. SALAINEN.....	37
Kuvio 31. SALAINEN.....	37
Kuvio 32. SALAINEN.....	37
Kuvio 33. SALAINEN.....	37
Kuvio 34. SALAINEN.....	37
Kuvio 35. Texas Instruments TMS320C6713 Development Start Kit	39
Kuvio 36. RØDE smartLav+	40
Kuvio 37. Creative GigaWorks T20 Series II–stereokaiuttimet.....	41
Kuvio 38. Kalibrointivaihe	41
Kuvio 39. Vaimennusvaihe	42
Kuvio 40. Referenssimikrofoni puhaltimen kuomussa kiinni.....	43
Kuvio 41. Virhemikrofoni etupaneelissa	44
Kuvio 42. Kaiuttimet työtilan perällä	44
Kuvio 43. Äänenvaimennusta rajoittavien tekijöiden hierarkia (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Hansen 2001, 20)	45
Kuvio 44. SALAINEN.....	45
Kuvio 45. SALAINEN.....	45

Kuvio 46. SALAINEN.....	45
-------------------------	----

Taulukot

Taulukko 1. Myötäkytketyn ja takaisinkytketyn järjestelmien tulokset.....	33
Taulukko 2. SALAINEN	39
Taulukko 3. SALAINEN	39
Taulukko 4. SALAINEN	45

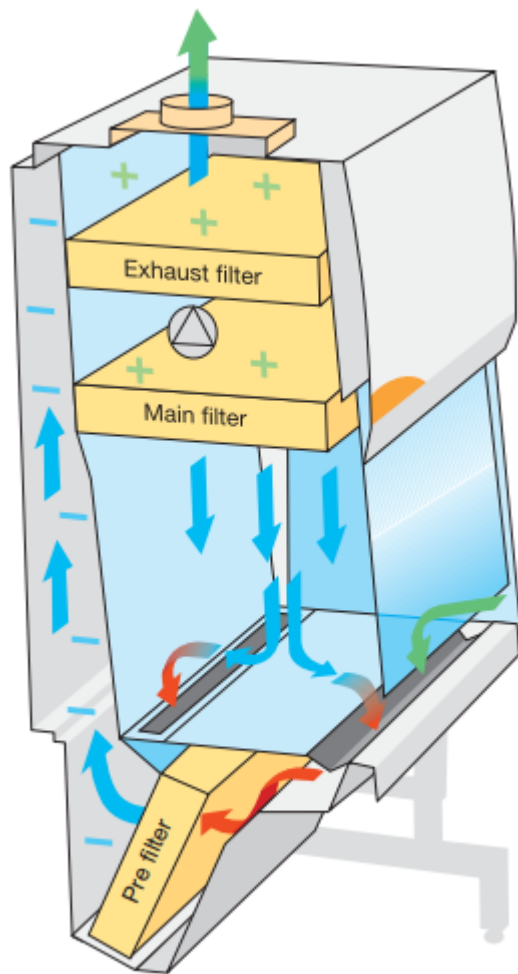
1 Johdanto

1.1 Projektin taustat

Opinnäytetyön toimeksiantaja Kojair Tech Oy valmistaa puhdasilmatuotteita asiakkaiden ilmanpuhtauteen liittyviin prosesseihin. Useissa erilaisissa prosesseissa tarvitaan puhdasta ilmaa, joissa partikkelien pääsy prosessiin, on ei-toivottavaa. Esimerkiksi useat elintarvike- ja lääketeollisuuden valmistusprosessit, erityistä puhtautta vaativat tuotantotilat, tutkimuslaitosten laboratoriot ja sairaaloiden leikkaussalit vaativat puhdasta ilmaa, jossa partikkelien määrä on minimoitu. (Ylivertaista puhdasilmateknologiaa turvalliseen, hiljaiseen ja varjottomaan työskentelyyn.)

Kojair Tech Oy:n päätuote on II-luokan mikrobiologinen suojakaappi. Suojakaapissa keskipakopuhallin liikuttaa ilmaa, josta 2/3 puhalletaan suodatettuna laminaarisesti työtilaan ja 1/3 poistetaan suodatettuna huoneilmaan. Suojakaappi imee korvausilman poistetun ilman tilalle etulasin alareunan ja käsi-nojan välisestä työaukosta (ks. Kuvio 1). Työtilan katosta laminaarisesti puhallettu ilma suojaa tuotteen suodattamattomalta epäpuhtaalta ilmalta sekä luo "ilmaverhon" etulasia vasten korvausilman imemisen yhteisvaikutuksena, jotta suojakaapista ei pääse poistumaan suodattamatonta ilmaa. Tuotteen ideana on EN 12469-standardin mukaisesti suojata kaapissa käsiteltävä kohde kontaminoitumiselta sekä kaapin käyttäjä mahdollisilta haitallisilta tai vaarallisilta yhdisteiltä.

Suojakaappi synnyttää melua, koska sen sisällä pyörii keskipakopuhallin. Suojakaapissa liikkuva ilma aiheuttaa myös melua, koska se kulkee rei'itettyjen työtasojen läpi ja ilmanakanavan käännöksissä syntyy turbulensseja. Vaikka Kojair Tech Oy:llä on äänitasoltaan maailman hiljaisin mikrobiologinen suojakaappi, ylittää sen äänitaso tason, joka voi pitkäaikaisvaikutteisesti aiheuttaa haittoja käyttäjien hyvinvoinnille tai terveydelle. Mikrobiologisten suojakaappien kanssa useita tunteja päivässä työskentelevät ihmiset yleisesti kokevat kaappien synnyttämän äänen häiritseväksi tai ärsyttäväksi. (Anniversary publication, 17.)



Kuvio 1. Biowizard XTRALine HEPA-esisuodattimella varustettu mikrobiologinen suoja-kaappi

1.2 Nykytila ja tavoitteet (OSITTAIN SALAINEN)

Kojair Tech Oy:ssä on aina keskitytty suojakaappien ergonomiaan, hiljaisuuteen ja turvallisuuteen. Tähän mennessä suojakaapin ilmavirtauksien kulke-
mista on pyritty helpottamaan kehittämällä painekammiota ja työtasoja, koska se parantaa kaapin laminaarisuutta ja pienentää myös suojakaapin äänenpai-
netasoa.

Tämän työn tavoitteena on suojakaapin tuottaman äänenpainetason pienentä-
minen hyödyntämällä aktiivista äänenvaimennusta eli vastamelutekniikkaa.

Vastamelulla voidaan vaimentaa rajatulla alueella melua eli tässä työssä suo-
jakaapin edessä, jossa käyttäjä työskentelee. Vastamelutekniikka soveltuu
parhaiten käyttökohteisiin, joissa melulähteen tuottama melu on säännöllistä
ja kapeakaistaista sekä matalataajuista. Impulssimaisen melun kumoamiseen
tekniikka soveltuu huonosti.

Opinnäytetyön tehtävänä on tutkia aktiivisen äänenvaimennuksen soveltu-
vuutta mikrobiologisen suojavaapin äänenvaimennuksessa sekä toteuttaa toi-
miva prototyyppi aktiivisesta äänenvaimennusjärjestelmästä.

Soveltuvuutta arvioidaan äänenpainetason mittausten ja taajuusspektrien
avulla. Prototyyppi järjestelmästä suunnitellaan ja toteutetaan alan kirjallisuus-
dessa esitettyjen menetelmien perusteella.

Opinnäytetyö on kirjoitettu IMRAD-rakennetta noudattaen.

2 Melu ja terveys

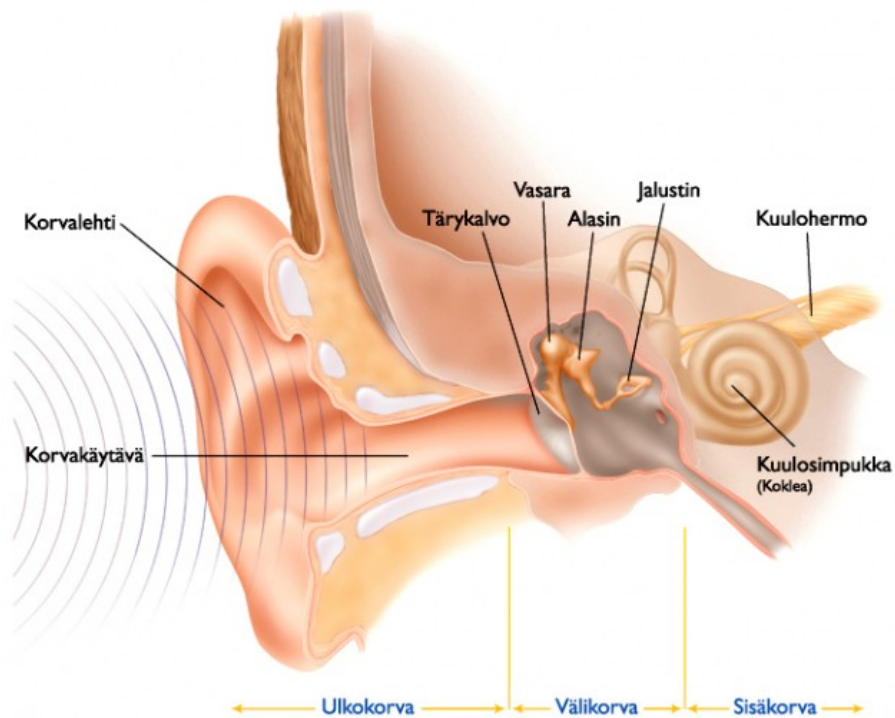
Melun vähentäminen on työergonomiaa parantava tekijä, joten tässä osiossa
tarkastellaan melun vaikutusta terveyteen, käsitellään ihmisen kuuloaisti ja
määritellään melu.

2.1 Ääni

Ääni on ilmanpaineen vaihtelua, joka sisältää ihmisen kuuloalueella olevia taa-
juuksia ja jonka amplitudi on riittävän iso ylittämään ihmisen kuulokynnyksen.
Matalimmat ihmisen kuuloalueella olevat äänet ovat taajuudeltaan noin 20
hertsiä ja korkeimmat äänet ovat taajuudeltaan 20 000 hertsiä. (Ampuja & Pel-
tomaa 2014, 80.)

2.2 Korvan rakenne ja kuuloaisti

Ihmisen korva koostuu ulko-, väli- ja sisäkorvasta (ks. kuvio 2) (Starck & Teräsvirta 2009, 28).



Kuvio 2. Korvan rakenne (alkup. kuvio kuuloliitto)

Ulkokorvan muodostavat korvalehti ja korvakäytävä, jotka vahvistavat ääntä ja muokkaavat äänen taajuussisältöä (Starck & Teräsvirta 2009, 28). Starckin ja Teräsvirran (2009, 28) mukaan korvakäytävä toimii neljännesaaltoresonaattorina vahvistuen 3–5 kHz:n ääniä noin 12–15 dB:ä.

Välikorvan muodostavat tärykalvo, korvatorvi ja kuuloluut: vasara, alasin ja jallustin. Välikorva toimii sovittimena ulkokorvaan tulleiden ääniaaltojen ja sisäkorvan nesteiden välillä. Tärykalvo on ohimoluussa sijaitseva ilmatäytteinen ontelo, joka alkaa värähdellä ääniaaltojen tullessa korvakäytävään. Tärykalvo välittää äänen kuuloluille, jotka välittävät värähtelyn sisäkorvan simpukkaan. Simpukassa värähtely välittyy tyvikalvon värähtelyksi, joka värähtelee samalla taajuudella kuin korvaan saapunut ääni. (Starck & Teräsvirta 2009, 28–29.)

Sisäkorvan muodostavat kuuloelin eli simpukka ja tasapainoelin eli labyrintti. Simpukka koostuu kolmesta nestekäytävästä, joista keskimmaisessa on Cortin elin, jonka lattiana toimii tyvikalvo ja kattona tegmentum, jolla on hyytelömäinen rakenne. (Starck & Teräsvirta 2009, 28–29.) Cortin elimessä on noin 3500 sisäkarvasolua, joiden kärjissä sijaitsevat aistinkarvat eli stereosiliat toimivat aaltoliikkeen vastaanottajina. Tyvikalvon värähdelleessä stereosiliat taipuvat ja sisäkarvasolujen jännite muuttuu (depolarisaatio). Ääniaistimus syntyy kuuloaivokuorella, jonne sähköimpulssit matkaavat kuulohermorataa pitkin Cortin elimestä. (Ampuja & Peltomaa 2014, 81 & 84.)

2.3 Melu

Melu on ääntä, jonka ihminen kokee häiritsevänä, epämiellyttävä tai ei-toivottuna, tai joka on muulla tavoin hyvinvoinnille haitallista tai terveydelle vahingollista. Koska melu koetaan epämiellyttävä, se vähentää viihtyisyyttä ja tämä aiheuttaa pitkään jatkuessaan terveysongelmia, vaikka se satunnaisena ja lyhytkestoisena voitaisiin käsitellä viihtyvyyksymyksenä. Melu on myös muilla tavoin haitallista ja voi aiheuttaa toiminta- ja työkyvyn heikkenemistä. (Jauhainen, Vuorinen & Heinonen-Guzejev 2007, 7.)

Fysikaalisesti melu voidaan määritellä vain osittain, koska se määrittyy sekä fysiologisten vaikutusten että koetun häiritsevyyden perusteella (Ampuja & Peltomaa 2014, 98). Koettu häiritsevyys ei riipu pelkästään melun äänitasosta, vaan myös melun kestosta, sen koetuista elämyspiirteistä ja merkityssisällöstä

sekä yksilöllisistä ja yhteisöön sidoksissa olevista muista tekijöistä (Jauhiainen, Vuorinen & Heinonen-Guzejev 2007, 7). Selvitykset osoittavat, että viidennes melun häiritsevyydestä on äänitason vaikutusta ja loppuosaan melun häiritsevyydestä vaikuttaa sen laadulliset ominaisuudet, kuten taajuussisältö, kapeakaistaisuus ja impulssimaisuus (Heinonen-Guzejev, Jauhiainen, Sala, Ström & Vuorinen 2012, 2446).

Fysikaalisten ominaisuuksiemme lisäksi häiritsevyyteen vaikuttaa yksilöllinen meluherkkyys. Kuulijan yksilölliset ominaisuudet, tilannetekijät ja meluun liittyvät asenteet ja uskomukset vaikuttavat, miten häiritseväksi melu koetaan. (Starck & Teräsvirta 2009, 42–43.) Jos millään äänillä ei olisi negatiivisia ei-toivottuja vaikutuksia, käsitettä meluisuus ja melun häiritsevyyks ei olisi olemassa, eikä meluntorjuntaa tarvittaisi (Jauhiainen, Vuorinen & Heinonen-Guzejev 2007, 7).

2.4 Melun vaikutus terveyteen

Kuuloaistin yksi tarkoitus on toimia varoitusjärjestelmänä, joka varoittaa ulkopuolisesta vaarasta ja näin varmistaa eloonjäämisen. Äänit siis voivat aiheuttaa erilaisia heijastevasteita elimistössä erityisesti silloin, kun ne ovat epämiellyttäviä tai uhkaavia. Keskushermosto prosessoi äänen ominaisuuksia ja vertaa niitä aikaisempiin kokemuksiin ja saa aikaan usein heijastevasteita, jotka ilmenevät mm. sydämen, verisuonten, suoliston ja umpieritysrauhasten toiminnassa. (Jauhiainen, Vuorinen & Heinonen-Guzejev 2007, 33.) Paras todiste ikaikaisen stressireaktion toiminnasta meissä on, että tutkimusten mukaan melun keskellä elävät ihmiset ovat selvästi stressaantuneita (Heinonen-Guzejev 2013).

Euroopan työterveys- ja työturvallisuusviraston mukaan työperäinen melu voi olla stressitekijä, vaikka melun taso olisikin alhainen (Minkälaisia ongelmia melusta voi aiheutua?). Riskiraja kohonneelle verenpaineelle on 50 desibeliä ja sepelvaltimotaudilla ja sydäninfarkteilla vastaava riskiraja on 60 desibeliä

(Ampuja & Peltomaa 2014, 113). Melututkimukset osoittavat, että melun häiritsevyydellä on yhteys sydän- ja verisuonitautien kehittymiseen: kahdeksan melututkimuksen meta-analyysillä todettiin, että melun häiritsevyyden lisääntyminen lisäsi kohonneen verenpaineen riskiä 16 % ja sepelvaltimotaudin riskiä 7 %, mutta sepelvaltimotaudin osalta tulos ei ole tilastollisesti merkitsevä. On siis todettu, että melun häiritsevyys liittyy huomattavasti kohonneeseen verenpaineeseen, mutta syy-seuraussuhteen osoittamiseksi tarvitaan vielä lisätutkimuksia. (Heinonen-Guzejev ym. 2012, 2446.)

2.5 Meluntorjunta

Työterveyslaitoksen mukaan (Meluntorjunta 2014) meluntorjunta on tarpeettoman äänen haittojen vähentämistä tai poistamista. Melun syntymisen estäminen, äänen leviämisen estäminen sekä alistuksen vähentäminen ovat melun teknisiä torjuntatoimia. Meluntorjunnan tavoitteena on työympäristön turvallisuuden, tuottavuuden ja viihtyvyyden parantaminen. Yksi meluntorjunnan yleisin ja helpoin tapa on suojainten käyttö, vaikka se on yleisperiaatteen mukaan vasta toissijainen torjuntakeino ja ensisijaisesti melu pitäisi torjua sen lähteellä. (Starck & Teräsvirta 2009, 68)

Työterveyslaitoksen listauksessa (Meluntorjunta 2014) meluntorjuntakeinojen tärkeysjärjestys on:

1. melun syntymisen estäminen
2. melun etenemisen estäminen
3. melun vaimentaminen akustoinnilla
4. henkilökohtaiset kuulonsuojaimet
5. melussa oloajan rajoittaminen

Kaikkein halvinta ja tehokkainta meluntorjunta on toteuttaa melunlähteellä. Äänienergian päästessä etenemään sitä on vaikeampi pysäyttää tai poistaa. Melunlähteitä tavallisimmin ovat erilaiset koneet ja laitteet. Melunlähteitä voidaan vaimentaa ja eristää erilaisilla ratkaisuilla, kuten äänieristyksellä, akustoinnilla, seinäkkeillä ja koteloinneilla. (Starck & Teräsvirta 2009, 73–74.)

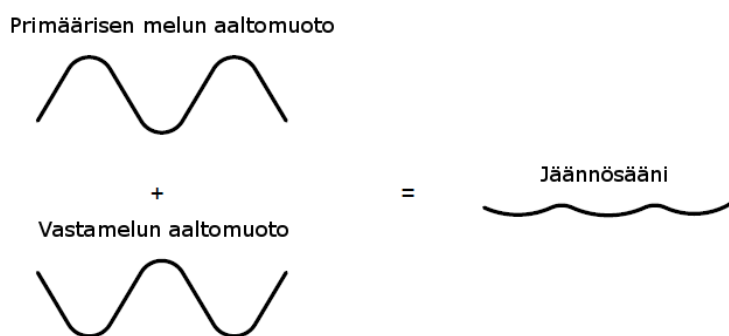
2.6 Passiivisen ja aktiivisen äänenvaimennuksen erot

Passiivisella äänenvaimennuksella pyritään melun syntymisen estämiseen tai äänen leviämisen estämiseen. Melun syntymisen estämisen keinoja on käyttää äänieristeitä melunlähteen ympärillä, joihin äänienergia absorboituu ja muuttuu lämpöenergiaksi. Toinen tapa on estää melunlähteestä syntyvää värähtelyä, tästä esimerkkinä ovat autojen moottoreiden alla käytettävät tärinänvaimennuskumit. Leviämisen estämisen keinoja on ohjata äänienergia haitattomaan suuntaan käyttämällä seinäkkeitä tai muureja, tästä esimerkkinä ovat moottoriteiden varteen rakennetut meluvallit. (Snyder 2000, 43.)

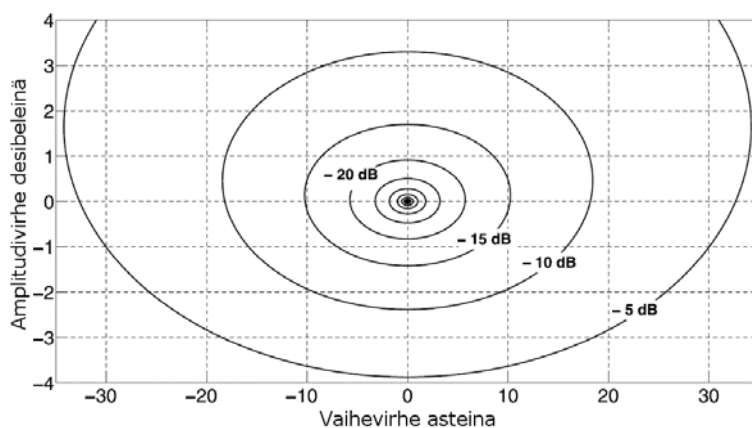
Aktiivisella äänenvaimennuksella voidaan vaimentaa matalataajuisia melua, jonka aallonpituus on pitkä. Matalataajuisen melun vaimentamiseksi passiivisesti tarvitaan paksuja eristeitä ja isoja vaimentimia, jotka tulevat kalliiksi. (Snyder 2000, 2.) Myös Välimäen, Antilan, Rantalan ja Linjaman (1997, 1) mukaan matalilla taajuuksilla (alle 200 Hz) passiivisen vaimennusmateriaalin määrä olisi valtava aallon pituuden ollessa suuri ja täten aktiivinen äänenvaimennin on passiivista edullisempi ratkaisu. Aktiivinen äänenvaimennusjärjestelmä tarjoaa tehokasta äänenvaimennusta matalille taajuuksille ja on fyysiseltä kooltaan pieni. Passiivinen äänenvaimennus toimii hyvin laajalla taajuusalueella, mutta matalilla taajuuksilla se toimii huonosti. Vaimennus on heikkoa, kun aallonpituus on pitkä passiiviseen elementtiin nähden. (Kuo & Morgan 1996, 2 & 5.) Aktiivinen äänenvaimennus soveltuu ideaalisesti meluun, jonka taajuus on alle 500 Hz. ”Täydellinen” äänenvaimennusjärjestelmä koostuu aktiivisesta ja passiivisesta osasta, jotta matalia sekä korkeita taajuuksia voidaan vaimentaa. (Snyder 2000, 11.)

3 Aktiivinen äänenvaimennus

Aktiivinen äänenvaimennus on tekniikka, jossa tarkoituksellisesti kerrostetaan ääniaaltoja destruktivisen interferenssin luomiseksi, joka vaimentaa ei-toivottua melua (Tokhi & Leitch 1992, 5). Elektroakustinen järjestelmä tuottaa vastamelun, jonka amplitudi on sama ja vaihe vastakkainen (180 astetta) kuin vaimennettavan melun. Kaksi vastakkaisvaiheista ääniaalloa kumoavat toisensa (ks. kuvio 3). Vaimennuksen taso riippuu tuotetun vastamelun amplitudin ja vaiheen tarkkuudesta (ks. kuvio 4). (Kuo & Morgan 1996, 2.) Pienikin eroavaisuus amplitudissa tai vaiheessa aiheuttaa suuren aleneman vaimennuksen tehokkuudessa (Kletschkowski 2012, 4).



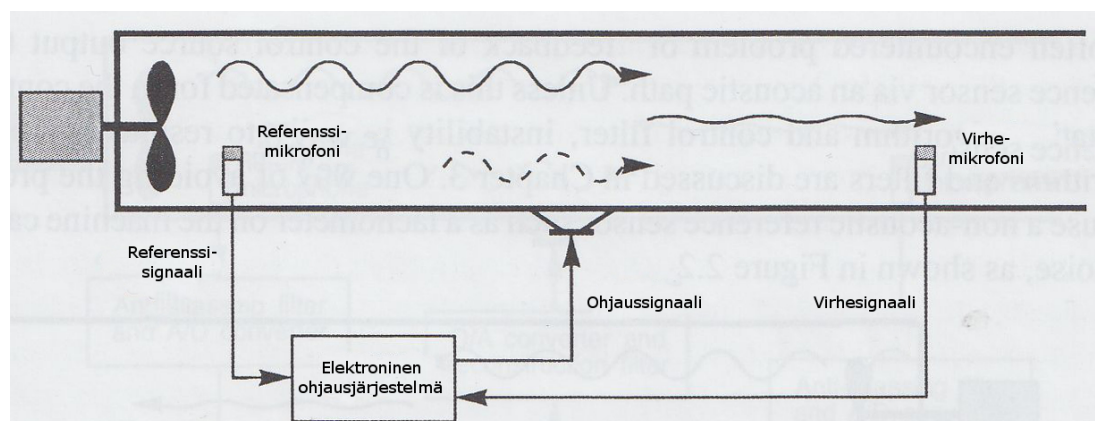
Kuvio 3. Destruktiivinen interferenssi (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Kuo, Panahi, Chung, Horner, Nadeski & Chyan 1996, 4)



Kuvio 4. Amplitudivirheen ja vaihevirheen vaikutus aktiivisen äänen vaimennuksen tehokkuuteen (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Kletschkowski 2012, 4)

Elektronisten antureiden ja nykyaikaisten digitaalisten signaaliprosessorien kehitys on mahdollistanut sen, että aktiivisilla äänenvaimennusjärjestelmillä voidaan toteuttaa melun reaaliaikaista vaimentamista myös erittäin hankalilla taajuuksilla (Rosenhousen 2001). Järjestelmä toteutetaan käyttämällä yhtä tai useampaa sekundääristä äänilähdettä (kaiutin), joita ohjataan sähköisellä ohjaussignaalilla. Ohjaussignaali luodaan elektronisessa ohjainjärjestelmässä (digitaalinen signaaliprosessori tai mikroprosessori). Ohjaussignaalin tuottamiseen tarvitaan referenssisignaali, joka tuotetaan anturilla (mikrofoni tai takometri) primäärisestä äänilähteestä eli melun lähteestä. (Tokhi & Leitch 1992, 5.)

Tyypillinen yksikanavainen järjestelmä koostuu: referenssimikrofonista, elektronisesta ohjainjärjestelmästä, kaiuttimesta ja virhemikrofonista (ks. kuvio 5). Referenssimikrofonilla tuotetaan signaalia melusta, jota halutaan vaimentaa. Elektroninen ohjausjärjestelmä luo referenssisignaalista ohjaussignaalin. Ohjaussignaalilla ajetaan kaiutinta, joka luo kumoavan ääniaallon. Virhemikrofoni mittaa toteutunutta äänenvaimennusta ja sen tuottamaa signaalia hyödynnetään elektronisen ohjainjärjestelmän säätämiseen, jotta äänenvaimennus saadaan maksimoitua. (Hansen 2001, 1.)



Kuvio 5. Tavallinen aktiivinen myötäkytketty äänenvaimennusjärjestelmä (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Hansen 2001, 13)

Aktiiviset äänenvaimennus sovellukset voidaan jakaa kahteen: järjestelmiin, jotka pyrkivät vähentämään akustisen energian ”virtausta”, eli ne pyrkivät ”globaaliseen” äänenvaimennukseen ja järjestelmiin, jotka pyrkivät paikalliseen äänenvaimennukseen ilman, että akustisen energian kokonaismäärää yritettäisi vähentää. (Snyder 2000, 44.) Globaalinen äänenvaimennus tarkoittaa sitä, että primäärisen ja sekundäärisen äänilähteen yhteensä tuottama äänenpainetaso on pienempi kuin primäärisen äänilähteen yksinään tuottama äänenpainetaso. Jos pyritään saavuttamaan 10 dB:n äänenpainetason vähennys globaalisesti, sekundäärinen äänilähde saa olla enintään sellaisen matkan päässä primäärisestä äänilähteestä, joka on kymmenesosa vaimennettavan taajuuden aallonpituudesta. Paikallinen äänenvaimennus on saavutettavissa etäälläkin primäärisestä äänilähteestä. On todennäköistä, että äänenpainetasot lisääntyvät muilla alueilla, kun paikallisella alueella äänenpainetasoja on onnistuttu pienentämään. (Hansen 2001, 22–23.)

3.1 Mukautuva aktiivinen myötäkytketty äänenvaimennusjärjestelmä

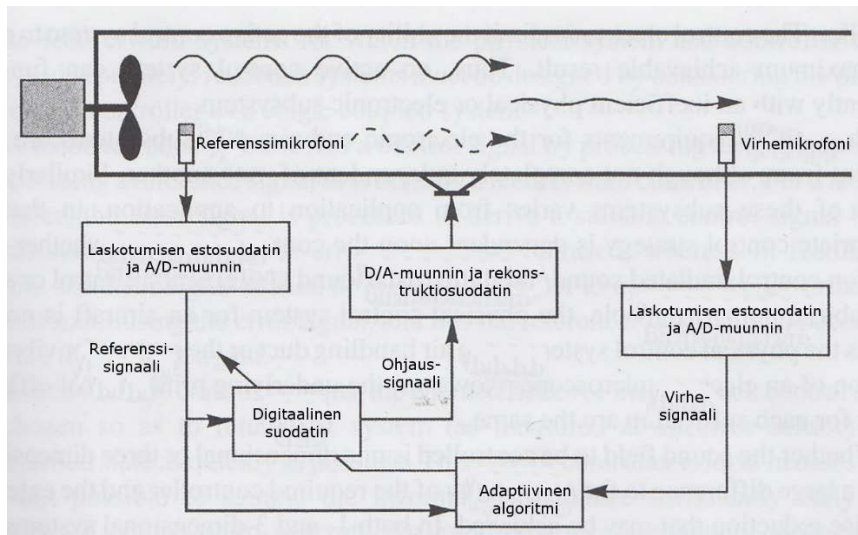
Kuviossa 5 referenssimikrofoni mittaa primäärisen äänilähteen aiheuttamaa melua, joka suodatetaan elektronisessa ohjainjärjestelmässä ja siitä tuotetaan sekundäärisen äänilähteen ohjaussignaali. Järjestelmän tehokkuutta mitataan virhemikrofonilla, jonka tuottamaa signaalia hyödynnetään ohjainjärjestelmässä ohjaussignaalin muokkaamiseksi, jotta äänenpainetaso saadaan minimoitua virhemikrofonin kohdalla.

Signaalin käsittelyyn ja analogia-digitaali- & digitaali-analogiamuunnoksiin kuluva aika on oltava pienempi kuin aika, jona akustinen aalto matkaa primäärisestä äänilähteestä sekundäärisen äänilähteen kohdalle. Edellisen ehdon toteutuessa järjestelmä on kausaalinen.

Kumoamispoluksi kutsutaan elektroakustista tietä sekundäärisen äänilähteen sisääntulosta virhemikrofonin ulostuloon. Tämä siirtofunktio on otettava huo-

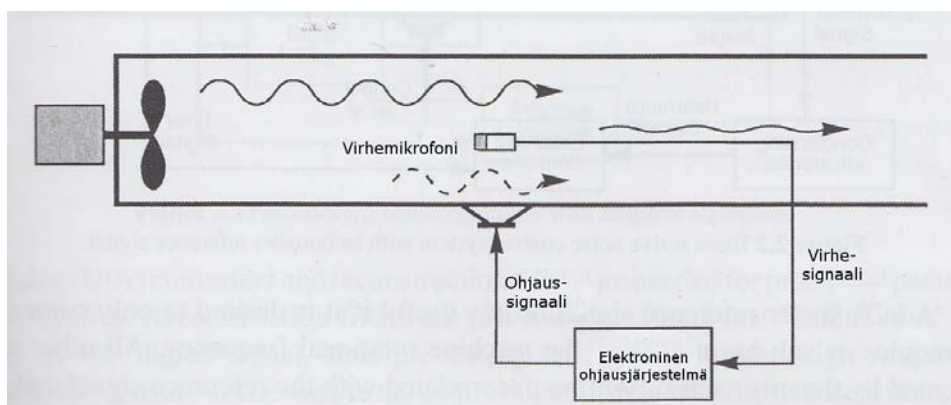
mioon ohjainjärjestelmän algoritmeissa ja sen vuoksi sitä on mitattava säännöllisesti. (Hansen 2001, 12–13.) Siirtofunktiota voidaan mallintaa tuottamalla sekundäärisellä äänilähteellä valkoista tai vaaleanpunaista kohinaa, joka on riippumaton primäärisestä äänilähteestä (Hansen 2001, 46).

Ohjaussignaalin laskeminen on vaikea prosessi, koska akustinen aalto muuttuu edetessään (Snyder 2000, 5). Vaimentavan ohjaussignaalin luomisessa on otettava huomioon ääniaallon etenemisessä syntyvät muutokset, kun se matkaa referenssimikrofonilta sekundääriseen äänilähteen kohdalle. Ohjaussignaalin muuttuminen signaalinkäsittelyn aikana on myös huomioitava, kun se etenee suodattimien ja vahvistimien kautta kaiuttimelle. Muita siirtofunktioon vaikuttavia tekijöitä ovat komponenttien ikääntyminen, kuten muuntajien kuluminen ja kaiuttimissa syntyvät fysikaaliset muutokset sekä olosuhteiden muutokset, kuten lämpötilan vaihtelut. Tämän vuoksi järjestelmän pitää olla mukautuva, eli järjestelmän tulee koko ajan tehdä muutoksia parhaan vaimennuksen saavuttamiseksi virhemikrofonin kohdalla. (Hansen 2001, 14.) Myös Snyderin (2000, 5) mukaan elektronisen ohjainjärjestelmän on oltava mukautuva eli adaptiivinen, koska ikääntymisen myötä mikrofonien ominaisuudet muuttuvat, ilmannonopeudet muuttuvat, lämpötilat muuttuvat ja rihmasto voi kasvaa sekä mikrofoneihin että kaiuttimiin. Laskentamallin pitää pystyä säätämään aina itsensä vallitsevaan ympäristöön, jossa järjestelmä toimii. Mukautumaton järjestelmä ei toimi käytännön toteutuksessa. Mukautumiseen järjestelmä käyttää virhemikrofonin signaalia yhdessä mukautuvan algoritmin kanssa säätääkseen ohjaussignaalia (ks. kuvio 6). Järjestelmän toimintaan tarvitaan myös A/D-muuntimia, laskostumisen estosuodattimia, D/A-muuntimia ja rekonstruktiosuodattimia. Rekonstruktiosuodattimet toimivat alipäästösuodattimina pehmentäen digitaalisen signaalin reunoja ja estäen vaimennuksen kohteena olevan taajuusalueen ylittävien ääniaaltojen pääsemisen ohjaussignaaliin. Säätäessään algoritmi ottaa useita asioita huomioon, kuten kuomoamispolun eli elektroakustisen tien sekundääriseen äänilähteen sisääntulosta virhemikrofonin ulostuloon (Hansen 2001, 14–15.)



Kuvio 6. Myötäkytketty järjestelmä mukautuvalla algoritmilla (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Hansen 2001, 15)

Aktiivinen takaisinkytketty äänenvaimennusjärjestelmä käsitellään tässä lyhyesti, koska sen suorituskyky ei ole yhtä hyvä kuin myötäkytketyn järjestelmän. Takaisinkytketty järjestelmä menee myös helpommin epävakaaksi, jos se vastaanottaa korkeampia taajuuksia kuin vaimennettavalla taajuusalueella olevia. Järjestelmät eroavat toisistaan siinä, että miten ja mistä ohjaussignaali luodaan. Takaisinkytketyssä järjestelmässä ei ole referenssimikrofonia lainkaan ja virhemikrofonin luomaa signaalia käytetään suoraan ohjaussignaalin luomisessa (ks. kuvio 7). (Hansen 2001, 16–17.)



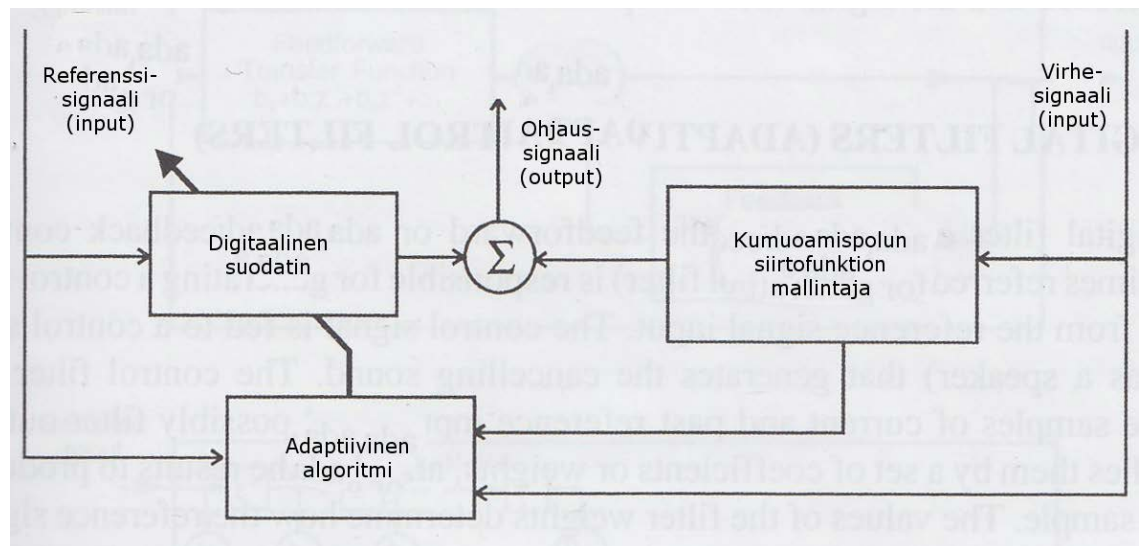
Kuvio 7. Aktiivinen takaisinkytketty äänenvaimennusjärjestelmä (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Hansen 2001, 13)

Vertailtaessa näitä kahta järjestelmää ainoa heikkous myötäkytketyssä järjestelmässä (ks. kuvio 6) takaisinkytkettyyn järjestelmään (ks. kuvio 7) nähden on sekundäärisen äänilähteen ulostulon vaikutus referenssimikrofonin signaaliin akustisesti. Järjestelmä menee epävakaaksi, jos tätä seikkaa ei huomioida ohjausjärjestelmän mukautuvassa algoritmossa ja suodattimen kerrointen säätämisessä. Toinen tapa kiertää tämä ongelma on käyttää referenssisignaalina takometriä. Takometrin signaali on käyttökelpoinen vain silloin, kun vaimennuksen kohteena ovat primäärisen äänilähteen (puhallin tai moottori) pyörimistaajuudella ja sen kerrannaisilla olevat taajuuskomponentit. Kaikki muut virhemikrofonin havaitsemat äänentaajuudet eivät ole yhteneväisiä takometrin luoman referenssisignaalin kanssa ja eivät täten vaikuta sekundäärisen äänilähteen ohjaussignaaliin, eli vain takometrin signaalista luodun aaltomuodon taajuudella ja sen kerrannaisilla olevia ääniä voidaan vaimentaa. (Hansen 2001, 14 & 19.) Kun takometrin signaalia käytetään referenssisignaalina, kapeakaisaisen säännöllisen melun (kuten keskipakopuhallin) vaimennuksessa, järjestelmän ei tarvitse olla kausaalinen, koska puhallinnopeus pysyy samana pitkiä aikoja. Vaikka puhallinnopeus muuttuisikin, järjestelmä säätää itsensä tarpeeksi nopeasti, että siitä ei synny käytännössä meluhaittaa. (Kuo & Morgan 1996, 9)

Yksikanavaisessa järjestelmässä on yksi sekundäärinen äänilähde ja yksi virhemikrofoni. Jokaista sekundääristä äänilähdettä kohden järjestelmän tulee olla yksi virhemikrofoni. Järjestelmiä, joissa on useampia sekundäärisiä äänilähteitä ja virhemikrofoneja kuin yksi, kutsutaan monikanavaisiksi järjestelmiksi. Monikanavaisen järjestelmän elektronisen ohjausjärjestelmän algoritmi on paljon monimutkaisempi kuin yksikanavaisen, koska järjestelmän pitää ottaa huomioon sekundääristen äänilähteiden ja virhemikrofonien vuorovaikutukset sekä luoda optimaalinen ohjaussignaali jokaiselle sekundääriselle äänilähteelle. (Hansen 2001, 14.)

3.2 Elektroninen ohjausjärjestelmä

Elektronisessa ohjausjärjestelmässä on kolme pääkomponenttia: digitaalinen suodatin, mukautuva algoritmi ja kumoamispolun siirtofunktion mallintaja (ks. kuvio 8) (Hansen 2001, 32). Kolme edellä mainittua komponenttia ovat toisiinsa liittyviä ja jokainen niistä tulee suunnitella oikein, jotta järjestelmä toimii kunnollisesti (Snyder 2000, 127).



Kuvio 8. Yksikanavaisen järjestelmän elektronisen ohjausjärjestelmän pääkomponentit (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Hansen 2001, 31)

3.2.1 Digitaalinen suodatin (FIR- & IIR-suodattimet)

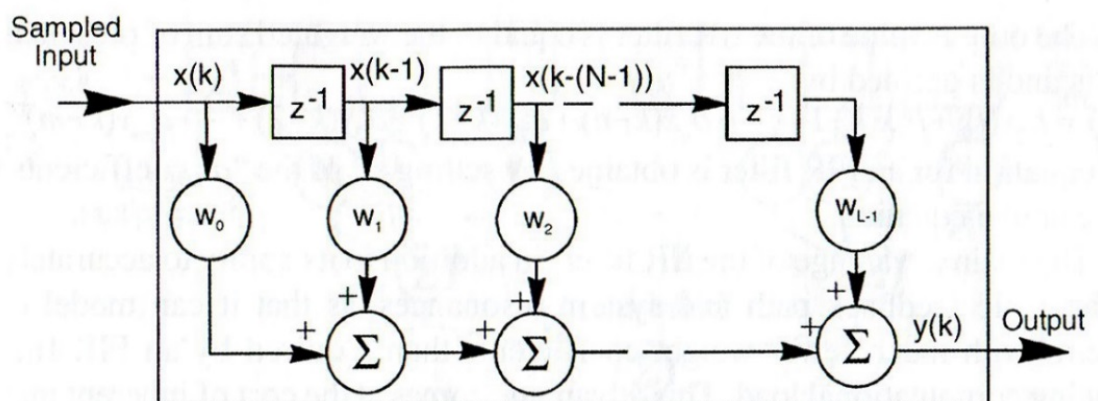
Digitaalisen suodattimen tehtävänä järjestelmässä on luoda ohjaussignaali referenssisignaalista. Ohjaussignaali syötetään ohjauslähteeseen (esim. kaiutin), joka luo kumoavan ääniaallon. Suodatin ottaa diskreettejä näytteitä nykyisestä ja aiemmasta referenssisignaalista (IIR-suodattimet myös omasta ulostulosta). Näytteet kerrotaan suodattimen kertoimilla, summataan ja sitten ohjaussignaali luodaan. Suodattimen kertoimien arvot määräävät sen kuinka

referenssisignaali käsitellään, jotta vaadittava ohjaussignaali saadaan luotua. (Hansen 2001, 32.)

Tavanomaisissa FIR- ja IIR-suodattimissa oletetaan, että prosessi on tunnettu ja suodattimille voidaan asettaa muuttumattomat arvot. Monissa käytännön sovelluksissa prosessi kuitenkin muuttuu ja sellaisissa sovelluksissa on erittäin toivottavaa, että suodatin on suunniteltu itseoppivaksi ja se voi mukautua vallitsevien olosuhteiden vaatimusten mukaiseksi. (Chassaing & Reay 2008, 319–320.)

FIR-suodatin (Finite impulse response)

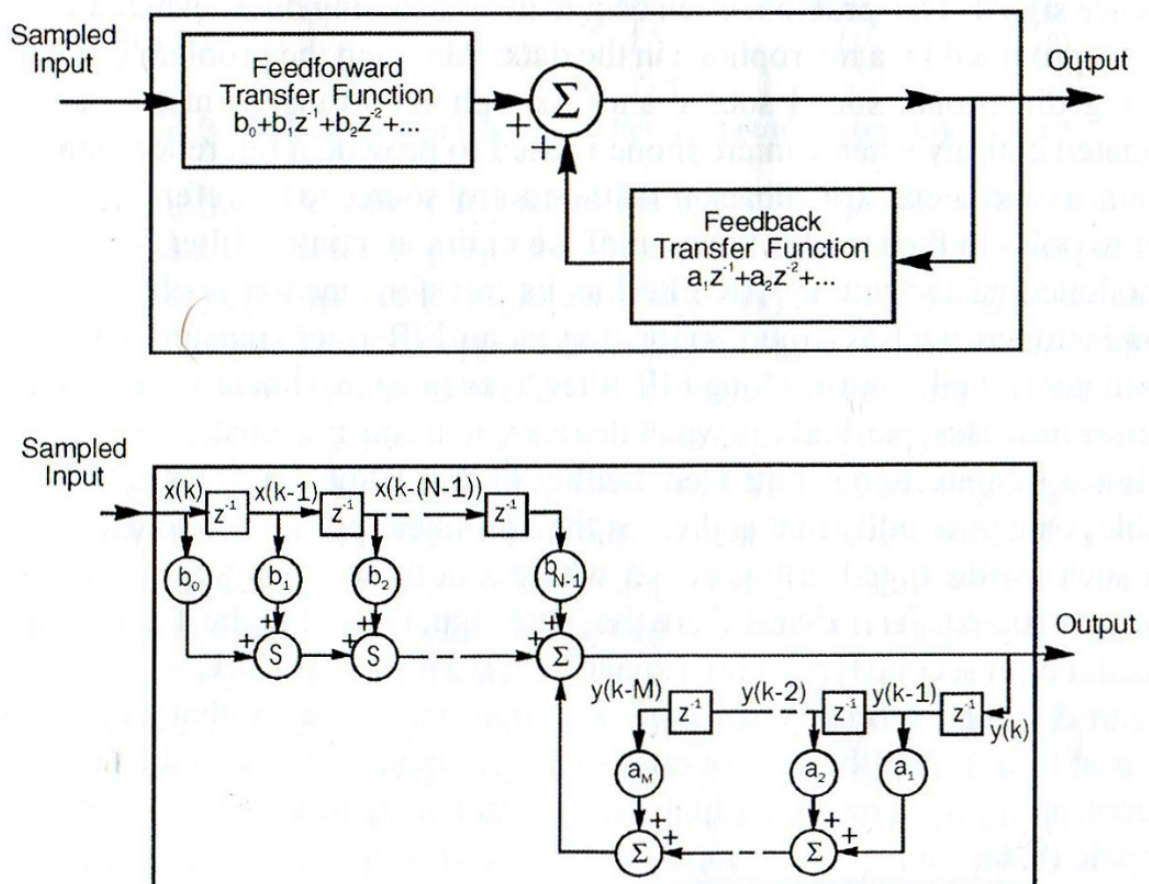
Kuviossa 9 z^{-1} kuvastaa yhden sisääntulonäytteen viivettä ja w_i kuvastaa suodattinkertoimia. Suodattimen "tasojen" lukumäärää, eli sitä kuinka montaa nykyistä ja mennyttä näytettä käytetään ulostulon säätöön, kutsutaan myös "tappien" lukumääräksi. FIR-suodatin on ideaalinen säännöllisen melun vaimennukseen, missä referenssisignaali koostuu korkeintaan muutamasta sini-ikäyrästä. Toisena edellytyksenä ideaaliselle toiminnalle on se, ettei ohjauslähte korruptoi referenssisignaalia. Tapauksissa, joissa tapahtuu akustista takaisinkytkentää ohjauslähteestä referenssisignaaliin, FIR-suodattimen sijasta tulee käyttää IIR-suodatinta, joka sietää referenssisignaalin korruptoitumisen. (Hansen 2001, 32–33.)



Kuvio 9. FIR-suodatin (alkup. kuvio ks. Hansen 2001, 33)

IIR-suodatin (Infinite impulse response)

Kuviossa 10 nähdään IIR-suodattimen rakenne, joka periaatteessa rakentuu kahdesta FIR-suodattimesta. Erona FIR-suodattimeen on se, että IIR-suodatin käyttää myös omia ulostuloarvoja sisääntulosignaalin muokkaamisessa. Monimutkaisia järjestelmiä mallintaessa suurin hyöty IIR-suodattimesta FIR-suodattimeen nähden saadaan siitä, että se ei tarvitse yhtä paljon suodatinkertoimia, joka vähentää laskentakuormaa. Haittapuolena IIR-suodatin on luontaisesti epävakaa ja sen kertoimet lähenevät hitaammin optimaalisia arvoja. Luontainen epävakaus johtuu suodattimen takaisinkytkentäosuudesta, joka voi synnyttää itseään ruokkivan äärettömiin kasvavan ulostulosignaalin. IIR-suodattimia käytetään FIR-suodattimien sijasta järjestelmissä, joissa vaimennettava melu on laajakaistaista, ja joissa on resonanssitaajuuksia taajuusalueella, jota vaimennetaan. (Hansen 2001, 33–34.)



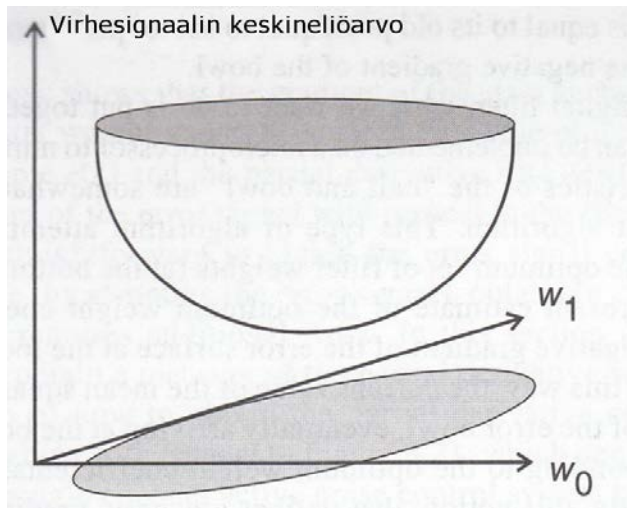
Kuvio 10. IIR-suodatin (alkup. kuvio ks. Hansen 2001, 33)

Kolme asiaa vaikuttaa digitaalisen suodattimen toimintaan aktiivisessa äänenvaimennusjärjestelmässä: suodattimen tyyppi, suodattimen kerrointen arvot ja suodattimen kerrointen määrä. On todettu, että FIR-suodattimissa 4-20 suodattimen kerrointa jokaista vaimennettavaa taajuutta kohden on riittävä määrä. Määrään vaikuttaa digitaalisen signaaliprosessorin näytteenottotaajuus. Sattunnaista melua varten tarvitaan IIR-suodatin, jossa on useita satoja suodattimen kertoimia. (Hansen 2001, 35.)

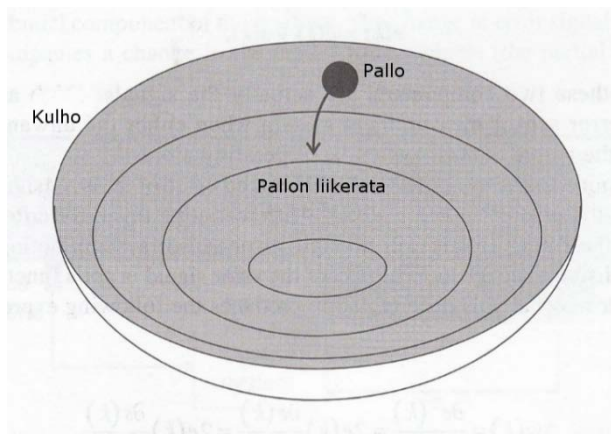
3.2.2 Mukautuva algoritmi

Järjestelmän toisen komponentin tehtävänä on säätää digitaalista suodatinta. Algoritmi säätää suodattimen kertoimia siten, että virhemikrofonilla mitattu jäännösääni on mahdollisimman pieni, eli äänenvaimennus on maksimoitu. Mukautuvat algoritmit, joita aktiivisissa äänenvaimennusjärjestelmissä käytetään, ovat muunnelmia algoritmeista, joita käytetään muissa adaptiivisen signaalinkäsittelyn sovelluksissa. Muunnelmia on tehty algoritmeista, joita käytetään esimerkiksi puhelinten kaiunpoistossa ja laitteissa, joilla kuunnellaan siikön sydänääniä. Adaptiivisen signaalinkäsittelyn ala syntyi nykyisten telekommunikaatiojärjestelmien vaatimuksesta. (Snyder 2000, 135–136.)

Valtaosa adaptiivisessa signaalinkäsittelyssä käytetyistä algoritmeista ovat *gradient descent* algoritmeja. Nämä algoritmit toimivat siten, että ne lisäävät nykyisiin suodattimen kertoimien arvoihin pienen osuuden negatiivisesta gradientista. Negatiivinen gradientti lasketaan virhepinnasta. Virhepinta on kuvaaja, joka kuvaa virhettä suodatinkertoimien funktiona. Kuvaaja siis kuvastaa jäännösäänen määrää annetuilla suodatinkerrointen arvoilla. Kuviot 11 ja 12 kuvastavat miten algoritmi toimii.



Kuvio 11. Tyypillinen ”kulhomainen” virhepinta, jossa virhesignaalin keskineliöarvo on kuvattu suodatinkerrointen funktiona (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Snyder 2000, 137)



Kuvio 12. Suodatinkerrointen optimaalisten arvojen lähestymisen kuvaamiseen käytetty palloesimerkki (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Snyder 2000, 137)

Kuviossa 11 näkyvä virhepinta on tyypillinen kaksi suodatinkerrointa omaavalle FIR-suodattimelle. Virhepinnassa kuvataan virhesignaalin keskineliöarvo suodatinkerrointen funktiona. Kuvaajan muoto on hyperbolinen paraboloidi, joka muistuttaa kulhoa. (Snyder 2000, 136–138.) Käytännössä suodattimissa käytetään useampia suodatinkertoimia kuin kahta, jolloin kuvaaja on moniulotteinen virhepinta, jonka havainnoiminen seuraavan esimerkin avulla on hyvin vaikeaa (Hansen 2001, 37). Optimaaliset, virheen minimoivat, suodatinkerto-

mien arvot löytyvät kulhon pohjalta. Mukautuvan algoritmin tehtävä on lähestyä näitä arvoja. Arvojen lähestymistä voidaan kuvata ajattelemalla, että kulhon reunalla vapautetaan pallo, joka pyörii kulhon reunoja pitkin saavuttaen lopulta kulhon pohjan (ks. kuvio 12). Pallon vapautuessa se pyörii kulhon toiselle reunalle, eli virhepinnan maksimaaliselle negatiiviselle reunalle. Tarkasteltaessa pallon tarkkaa sijaintia erillisinä ajan hetkinä todetaan, että sen nykyinen sijainti on hiukan lähempänä kulhon pohjaa, kuin se oli pallon ollessa kulhon toisella reunalla. Matemaattisesti algoritmi voidaan ilmaista seuraavana kaavana:

$$w(k) = w(k) - \mu \Delta w(k) \quad (1)$$

Kaavassa 1 $\Delta w(k)$ on virhepinnan gradientti tarkasteltavan suodatinkerroinvektorin nykyisellä sijainnilla. μ on konvergenssi- eli lähenemiskerroin. Se on positiivinen luku ja se määrittää kuinka paljon negatiivista gradienttia lisätään suodatinkertoimeen. (Snyder 2000, 137–138.)

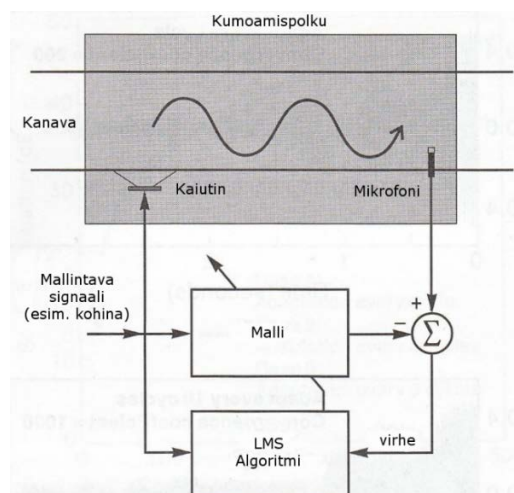
3.2.3 Kumoamispolun siirtofunktion mallintaja

Siirtofunktio digitaalisen suodattimen ulostulosta (ohjaussignaali) virhemikrofonin ulostuloon tarvitaan mukautuvan algoritmin gradientin laskemiseen. Fysikaalisen siirtofunktion matemaattista mallintamista kutsutaan usein myös järjestelmän tunnistamiseksi. (Snyder 2000, 147.) Kumoamispolun siirtofunktion mallin (digitaalinen suodatin) tarkkuus vaikuttaa vain vähän mukautuvan algoritmin suorituskykyyn optimoida suodatinkertoimia. Amplitudivirheet siirtofunktion mallissa vaikuttavat maksimaaliseen lähenemiskertoimen (μ) arvoon, eli algoritmillla kuluu enemmän aikaa optimaalisten suodatinkerrointen saavuttamiseen, kun lähenemiskerroin on pieni. Jos siirtofunktion mallin vaihevirhe ylittää yksikanavaisessa järjestelmässä 90 astetta, niin mukautuvasta algoritmista tulee epävaka. Käytännössä vaihevirhe tulee rajoittaa alle 45 astee-

seen. Voidaan siis todeta, että siirtofunktion mallin ei tarvitse olla absoluuttisen tarkka, mutta jossain tapauksissa siirtofunktion mallin pienempi virhe parantaa järjestelmän suorituskykyä. (Hansen 2001, 45.)

Kumoamispolun siirtofunktion ominaisuudet eivät yleensä ole vakioita ja ne muuttuvat hitaasti ajan myötä. Hitaasti tapahtuvia muutoksia on esimerkiksi kaiuttimeen kasvava rihmasto, joka vaikuttaa kaiuttimen taajuusvasteeseen. (Snyder 2000, 149.) Hansenin (2001, 45) mukaan siirtofunktion muutokseen vaikuttavat lämpötilan muutokset, jotka vaikuttavat äänennopeuteen ohjaukslähteen ja virhemikrofonin välillä, ilmannopeuden muutokset kanavajärjestelmissä ja elektroakustisten komponenttien ikääntyminen. Siirtofunktion malli täytyy päivittää, jotta tapahtuneet muutokset otetaan huomioon uudessa mallissa. Käytännöllisimmässä järjestelmissä siirtofunktion mallin päivittäminen tapahtuu rinnakkain suodatinkerrointen säädön kanssa. (Snyder 2000, 149.)

Yleisin tapa toteuttaa siirtofunktion mallinnus on syöttää kohinaa, jota tunnustetaan, järjestelmään ja malliin itseensä (ks. kuvio 13). Tämän tavan etu on, että kohina ei ole korrelaatiossa järjestelmän muiden äänien, kuten sekundäärisen ja primäärisen äänilähteiden tuottamien äänien kanssa. Vääristymien esiintyminen mallissa vähenee. Tämä tapa tuo järjestelmään ylimääräistä kontrolloimatonta melua, mutta sen amplitudin ei tarvitse olla suuri, jotta pätevä malli voidaan tuottaa, joten sillä ei ole merkitystä. (Snyder 2000, 149.)



Kuvio 13. Kohinan kehitin ja siirtofunktion mallintaja (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Snyder 2000, 148)

4 Aktiivisen äänenvaimennuksen käyttökohteita

Aktiivisia äänenvaimennusjärjestelmiä on kehitetty ja kehitetään seuraaville aloille ja käyttökohteille (Kuo & Morgan 1996, 5):

1. Autoteollisuus: henkilöautot, kuorma-autot, maanrakennuksessa käytettävät ajoneuvot, metsäkoneet ja sotilasajoneuvot. Yksikanavaisina järjestelminä on kehitetty elektronisia äänenvaimentimia ja monikanavaisia järjestelmiä on kehitetty auton sisätiloihin vaimentamaan moottori- ja rengasääniä.
2. Kodinkoneet: ilmastointilaitteet, jääkaapit, pesukoneet, ilmankosteuden poistajat ja imurit.
3. Teollisuus: tuulettimet, ilmastointikanavat, piiput, isot muuntajat, puhaltimet, kompressorit, pumput, työstökoneet ja kuulosuojaimet.
4. Liikenne: Lentokoneet, laivat, veneet, helikopterit, moottorikelkat, moottoripyörät ja linja-autot.

4.1 CG13-projekti

CG13 on vartiovene, joka on varusteltu kahdella 600 hevosvoimaisella V12-dieselmoottorilla. Projektin tavoitteena on vaimentaa moottoreista syntyvää ääntä veneen kajuutassa. Kajuutta on suljettu tila, jonka tilavuus on viisi kuutiometriä ja se on varusteltu kahdella tuolilla.

Yksi projektin monista haasteista on suunnitella ohjausjärjestelmä kahdelle toisistaan riippumattomalle melunlähteelle. Lopulta päädyttiin ratkaisuun,

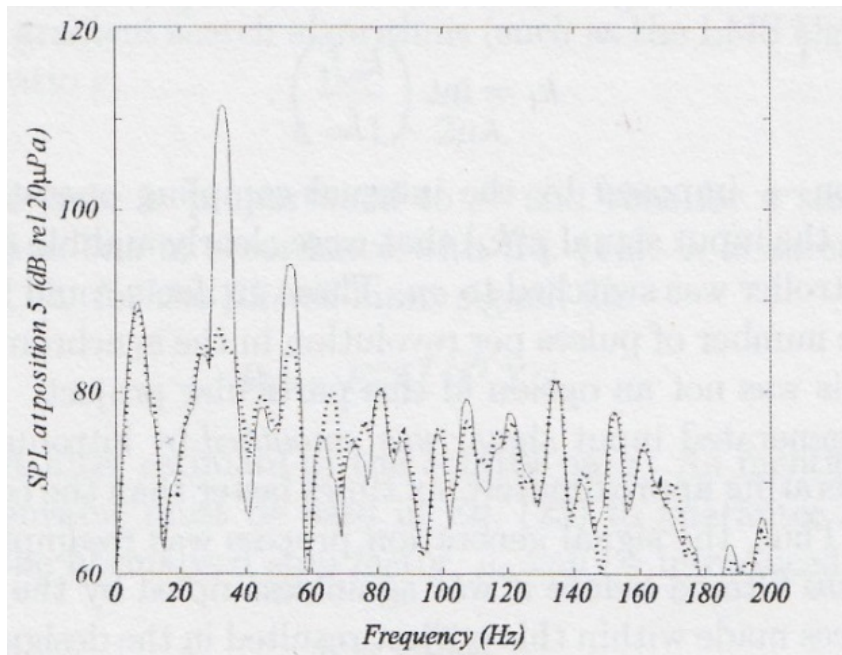
jossa järjestelmään päätettiin suunnitella kaksi erillistä ohjainta kummallekin melunlähteelle ja luoda ohjaussignaali summaamalla ohjainten signaalit.

Suurin huolenaihe oli se, että mitä tapahtuisi, jos kaksi moottoria pyörisivät lähes samalla nopeudella. Tekemiemme tutkimusten mukaan tämä olisi vaikein hallittavissa oleva tilanne. Tämän ilmiön aiheuttamaan ongelmana ei kuitenkaan törmätty järjestelmän testauksissa.

Ohjainalgoritmi on FIR-pohjainen monivirhe-LMS algoritmi, joka on suunniteltu kahta melunlähdettä varten. Järjestelmässä on neljä kaiutinta ja kahdeksan virhemikrofonia. Koko järjestelmä toteutettiin yhdellä Texas Instrumentsin TMS320C31 digitaalisella signaaliprosessorilla, joka voi käsitellä liukulukuja.

Moottorien tyhjäkäynnillä äänenpainetaso oli kajuutassa 112 dB noin 37 Hz taajuudella (ks. kuvio 14). Kova takova ääni oli havaittavissa kajuutassa, joka johtui moottorien pyörimisnopeuden erosta. Vaikka kajuutassa mitattu A-painotettu äänenpainetaso, 85 dB(A), ei ollut vaarallisen korkea, oli melu erittäin epämiellyttävää.

Järjestelmän toimivuutta arviointiin kuudella tasaisesti, korvien korkeudelle sijoitetulla mikrofonilla, jotka eivät olleet osana ohjausjärjestelmää. Kuvioista 14 nähdään, että vain kolmas ja kuudes monikerta vaimenevat. Subjektiiivisesti tarkasteltuna koettu helpotus oli suuri, kun järjestelmä kytkettiin päälle ja melu vaimeni. Matalataajuinen 37 Hz komponentti ja takova ääni vaimenivat kokonaan. (Sjösten 2003, 15–16.)



Kuvio 14. GC13:n äänitasot ennen ja jälkeen (katkoviiva) aktiivisen äänenvaimennuksen

4.2 Metsäkoneen aktiivinen äänenvaimennus

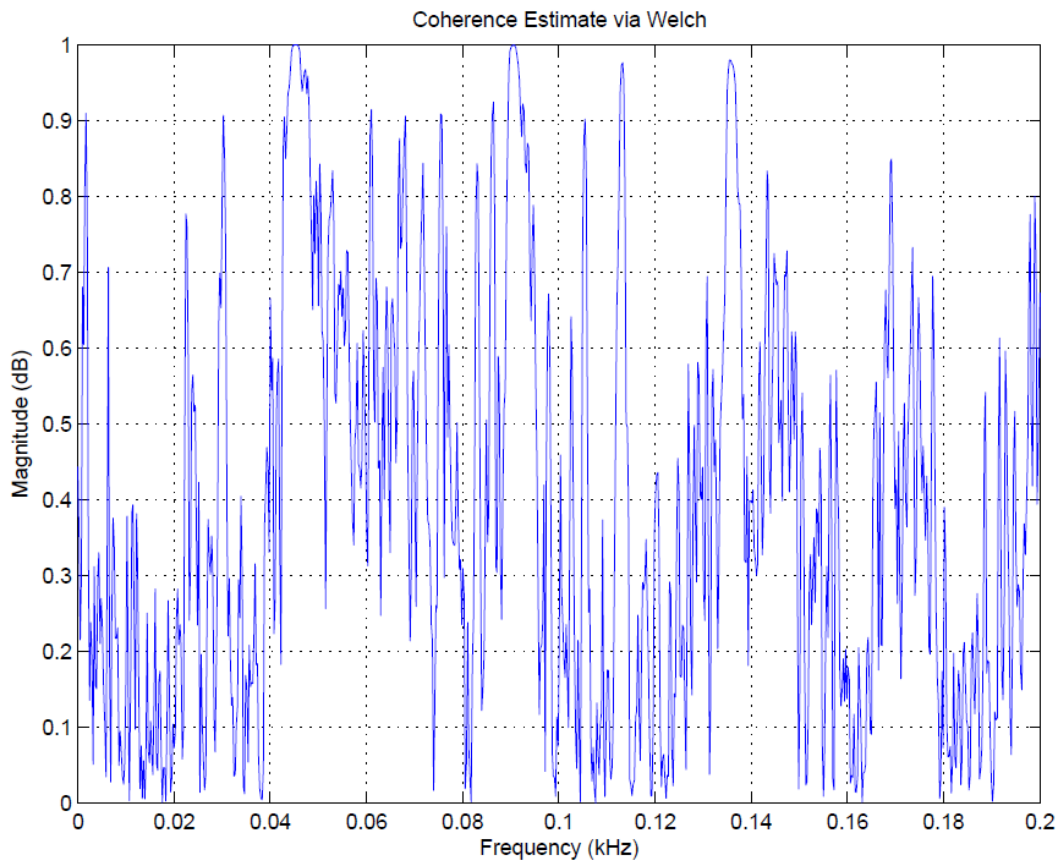
Tämän työn tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa aktiivinen äänenvaimennusjärjestelmä Valmet 890 metsäkoneen ohjaamoon. Moottorin jylinä on yksi häiritsevimmistä äänistä ja on täten vaimennuksen kohteena.

Aktiivisen äänenvaimennusjärjestelmän pohjana käytetään *Texas Instrumentsin TMS320C6713 Development Starter Kittä*. Muuta laitteistoa ovat vahvistimet, mikrofonit ja kaiuttimet. Edellä mainitun kortin käytöllä järjestelmän toteuttamisessa on hyviä ja huonoja puolia. Se on melko helppokäyttöinen ja avointa koodia valmiiksi kirjoitettuna löytyy paljon. Toisaalta kortin käyttö rajoittuu kahden mikrofonin ja kaiuttimen käyttöön ilman lisäosia. Lisäosien lisääminen on kallista ja on kirjoitettava ylimääräistä koodia, jotta niitä voidaan käyttää. (Grylin & Hedborg 2007, 23.)

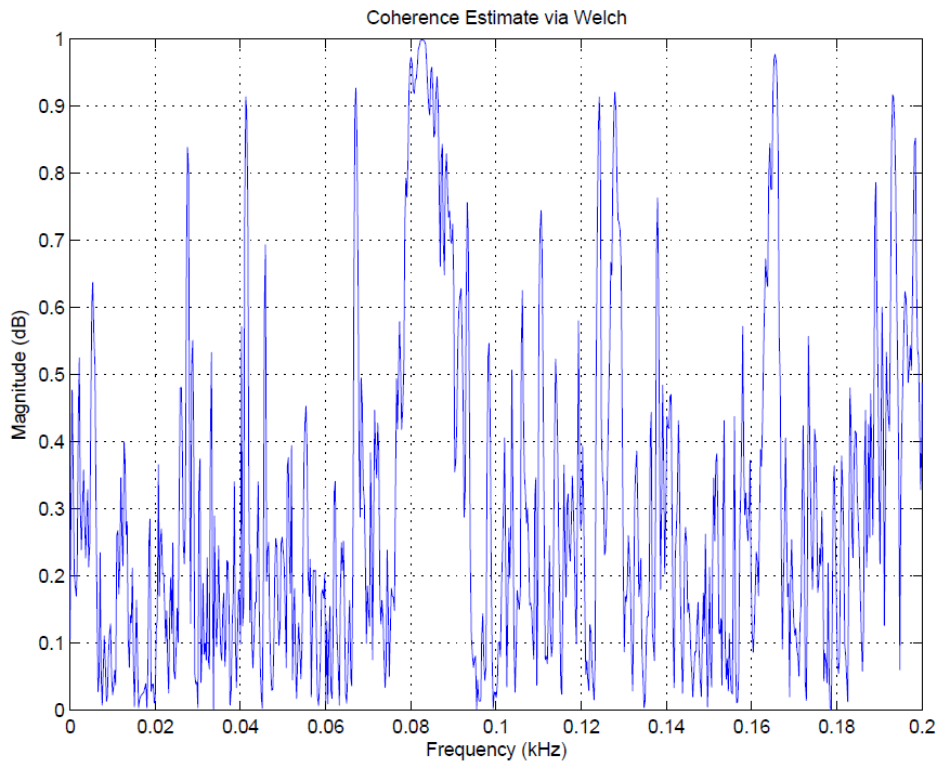
Vertailtaessa DSP:tä (digitaalinen signaaliprosessori) PC:hen, DSP on paljon nopeampi ja suorituskykyisempi. Esimerkkinä silmukkaan äänikortilta kaiuttimille, ilman välityksellä mikrofonille ja takaisin äänikortille kuluu aikaa PC:llä ja

Matlab-ohjelmistolla 80ms. Samaan silmukkaan DSP:llä kuluu 3,6ms, joten DSP soveltuu paremmin reaaliaikaiseen signaalinkäsittelyyn. (Grylin & Hedborg 2007, 27–28.)

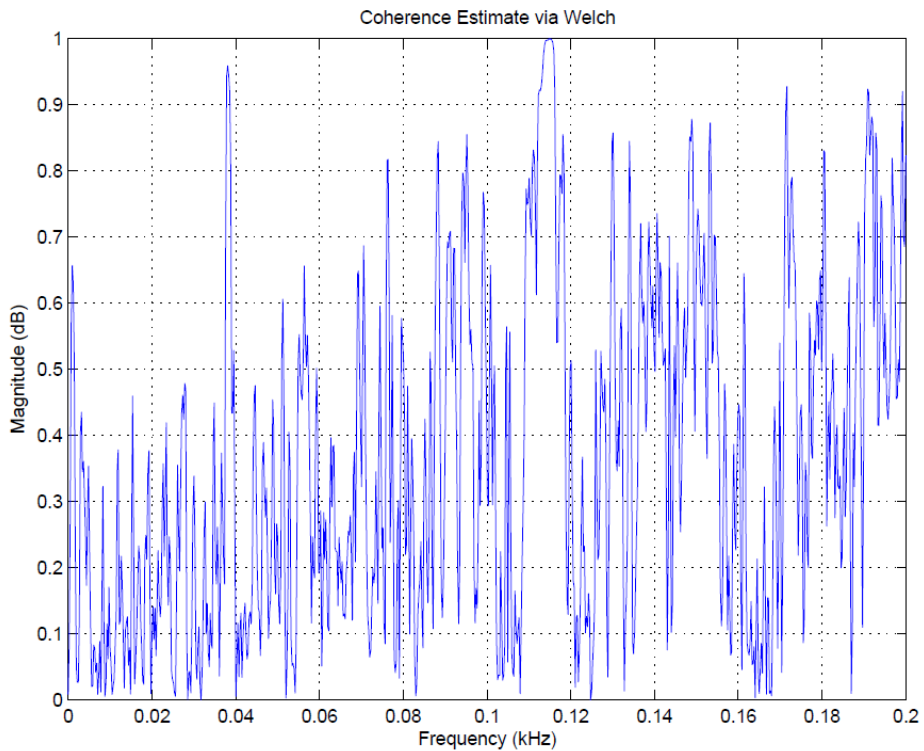
Jotta järjestelmällä saadaan aikaan hyviä tuloksia, referenssi- ja virhemikrofonilla mitattu ääni pitää olla toisistaan vahvasti riippuvaista. Riippuvuutta kuvataan koherenssiarviolla. Koherenssista käytetään arvoa nollan ja yhden välillä määntyillä taajuuksilla. Arvo 1 kuvastaa vahvaa koherenssia. Seuraavat kuvat (15, 16 & 17) kuvaavat koherenssia taajuuksilla 0-200 Hz moottorin käydessä eri kierrosnopeuksilla. (Grylin & Hedborg 2007, 29.)



Kuvio 15. Koherenssiarvio referenssi- ja virhemikrofonin välillä moottorin kierrosluvun ollessa 840 rpm (alkuperäinen kuvio ks. Grylin & Hedborg 2007, 30)

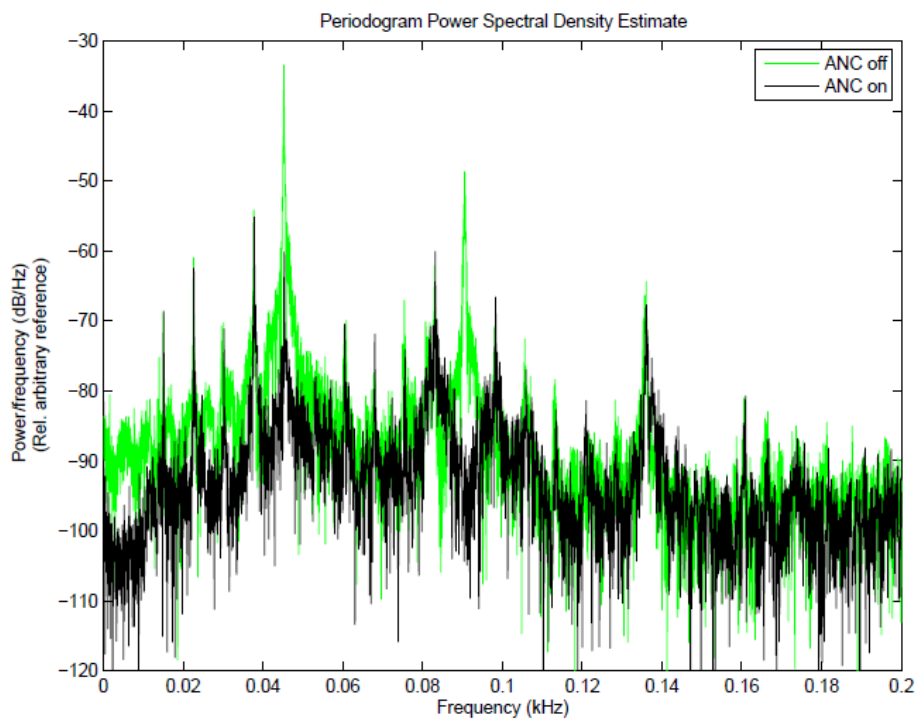


Kuvio 16. Koherenssiarvio referenssi- ja virhemikrofonin välillä moottorin kierrosluvun ollessa 1500 rpm (alkuperäinen kuvio ks. Grylin & Hedborg 2007, 30)

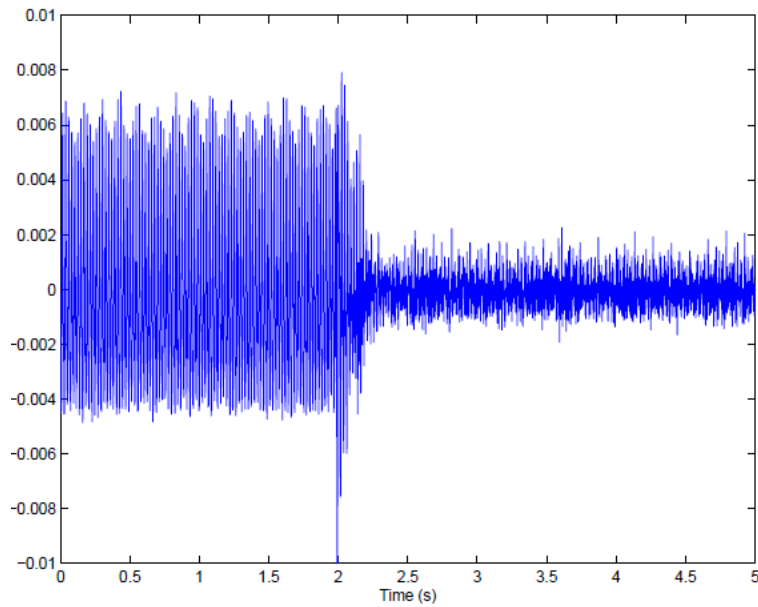


Kuvio 17. Koherenssiarvio referenssi- ja virhemikrofonin välillä moottorin kierrosluvun ollessa 2150 rpm (alkuperäinen kuvio ks. Grylin & Hedborg 2007, 31)

Järjestelmän toimivuutta testataan moottorin käydessä kolmella eri kierrosnopeudella: 840, 1500 & 2150 rpm, jotka ovat tyhjäkäynti-, työskentely- ja maksiminopeus. Tyhjäkäynnillä äänenpainetaso aleni 15,5 dB:ä (ks. kuvio 18) ja merkittävän muutoksen taajuusspektrissä näkee 45 Hz:n ja 90 Hz:n kohdalla. Kuviossa 19 nähdään aika välillä 2,0–2,3 s suodatin kerrointen lähentyminen ja maksimaalisen äänenvaimennuksen saavuttaminen. (Grylin & Hedborg 2007, 31 & 33.)

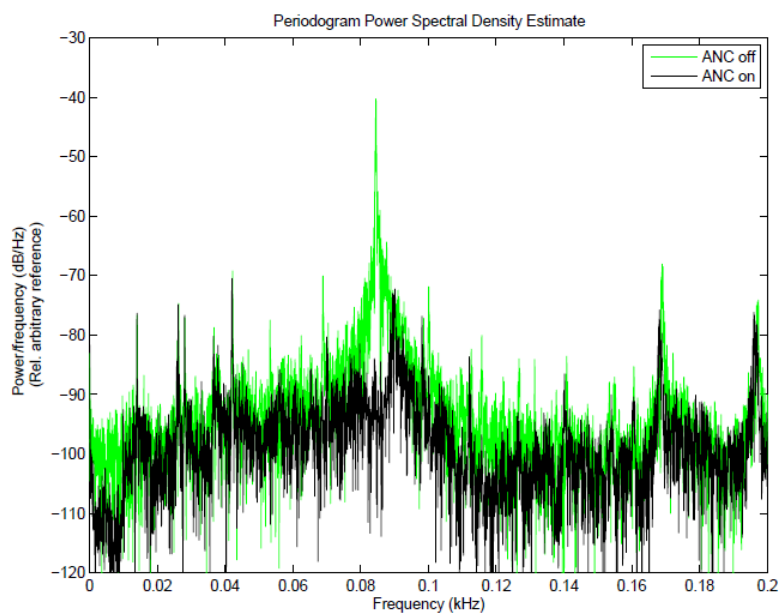


Kuvio 18. Virhemikrofonilla mitattu taajuusspektri tyhjäkäynnillä (alkuperäinen kuvio ks. Grylin & Hedborg 2007, 34)



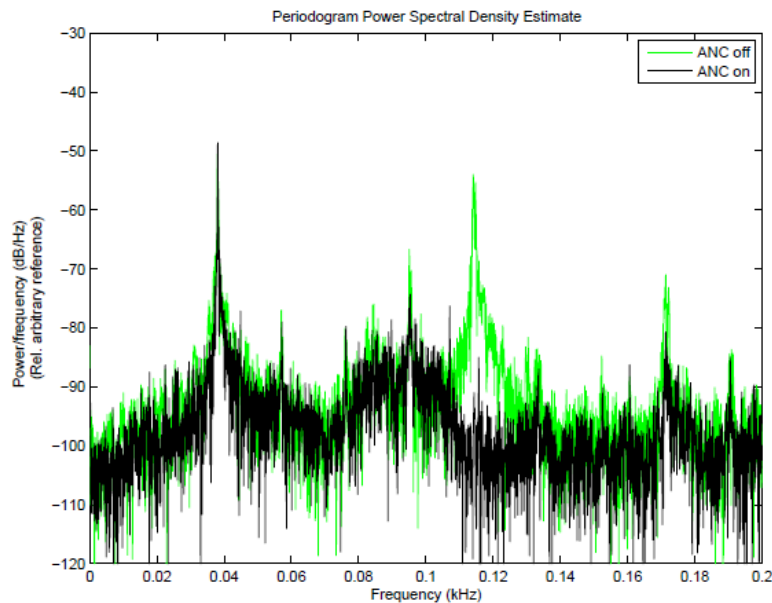
Kuvio 19. Virhesignaalin aikakuvaaja, järjestelmä kytketään päälle 2,0 sekunnin kohdalla (alkuperäinen kuvio ks. Grylin & Hedborg 2007, 33)

Työskentelynopeudella äänenpainetaso aleni 17,5 dB:ä. Kuviossa 20 nähtävä äänihiikki 84 Hz:n kohdalla vaimenee hyvin. (Grylin & Hedborg 2007, 33.)



Kuvio 20. Virhemikrofonilla mitattu taajuusspektri työskentelynopeudella (alkuperäinen kuvio ks. Grylin & Hedborg 2007, 35)

Maksinopeudella äänenvaimennusjärjestelmästä ei ole niin merkittävää hyötyä kuin aikaisemmissa tapauksissa. Matalilla taajuuksilla ei ole niin paljoa energiaa kuin edellisissä tapauksissa (ks. kuvio 21). Äänenpainetaso aleni 2,5 dB:ä. (Grylin & Hedborg 2007, 31 & 33.)



Kuvio 21. Virhemikrofonilla mitattu taajuusspektri maksiminopeudella (alkuperäinen kuvio ks. Grylin & Hedborg 2007, 36)

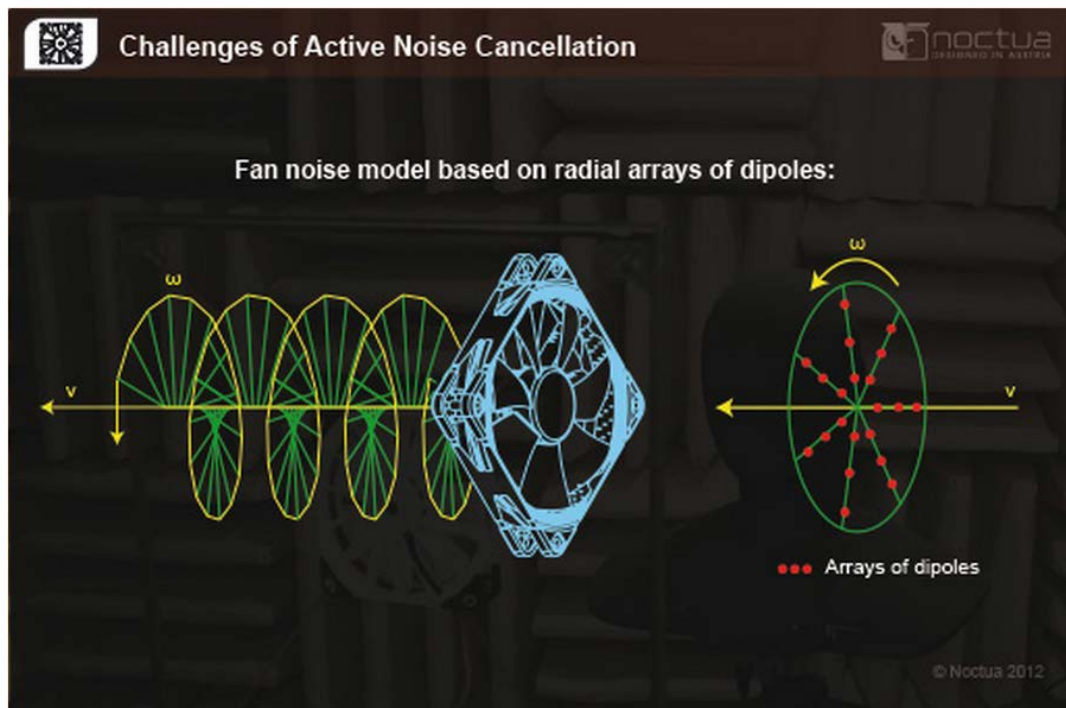
Työssä kokeiltiin aktiivista äänenvaimennusta kahdella eri järjestelmätyypillä. Seuraavassa taulukossa (taulukko 1) on äänenpainetasojen muutokset yhteenvetona:

Taulukko 1. Myötäkytketyn ja takaisinkytketyn järjestelmien tulokset

rpm	Δ SPL	
	Feedforward	Feedback
840	15.5 dB	10.7 dB
1500	17.5 dB	14.9 dB
2150	2.5 dB	4.8 dB

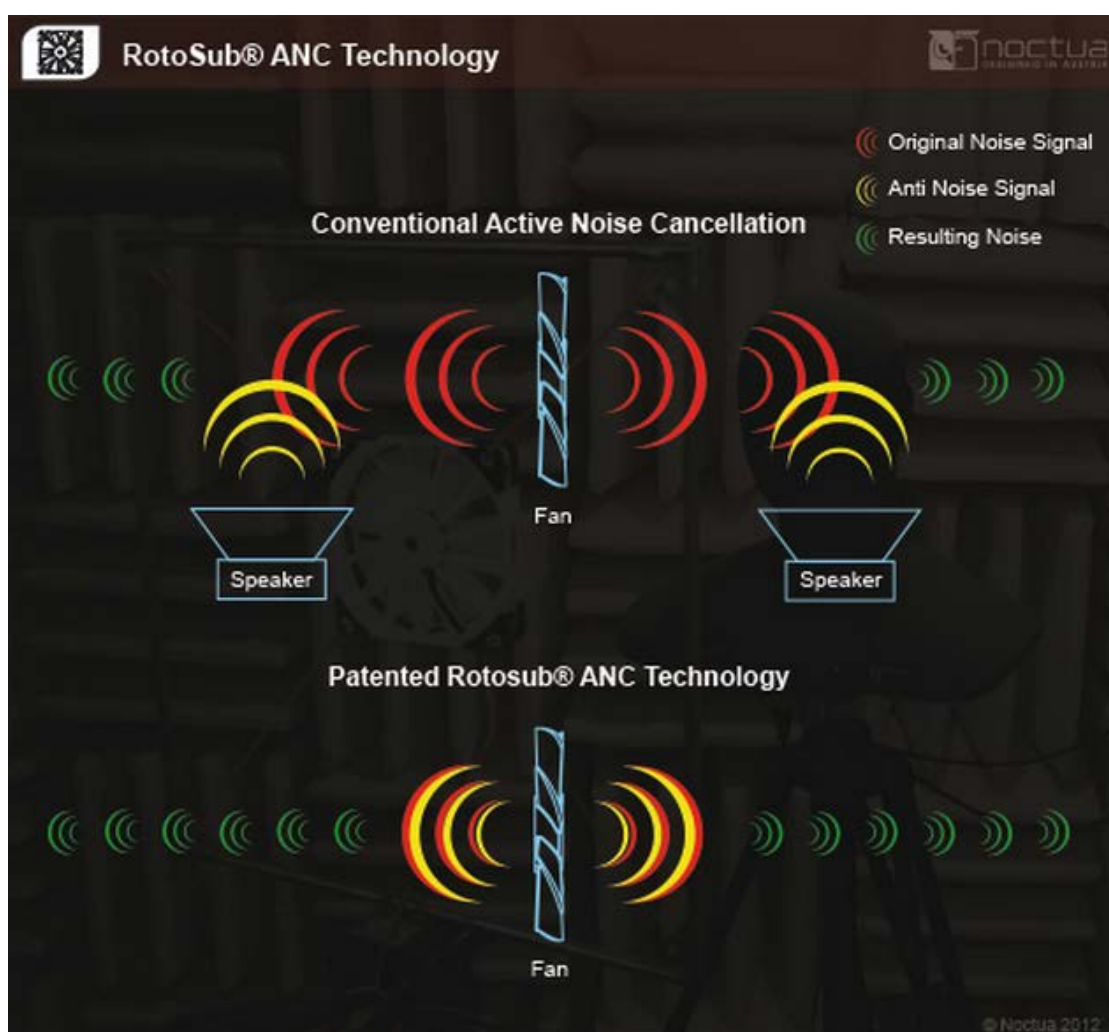
4.3 RotoSub – Noctua ANC project

Aktiivinen äänenvaimennus toimii yleensä tehokkaasti vain kontrolloiduissa ympäristöissä, kuten kuulosuojaimissa tai auton sisätiloissa ja määrättyissä sijainneissa (paikallinen äänenvaimennus), koska vaimennettavan ääniaallon ja ohjausaallon on oltava tarkalleen 180 astetta eri vaiheessa ja amplitudin on oltava sama, jotta ne kumoavat toisensa. Aksiaalituulettimet tuovat lisähaastetta, koska ne tuottavat pyöriviä ääniaaltoja (ks. kuvio 22), jotka omaavat erittäin monimutkaisia vaiherakenteita ja ovat täten vaikeasti vaimennettavia aktiivisella äänenvaimennuksella. (Noctua ANC project.)

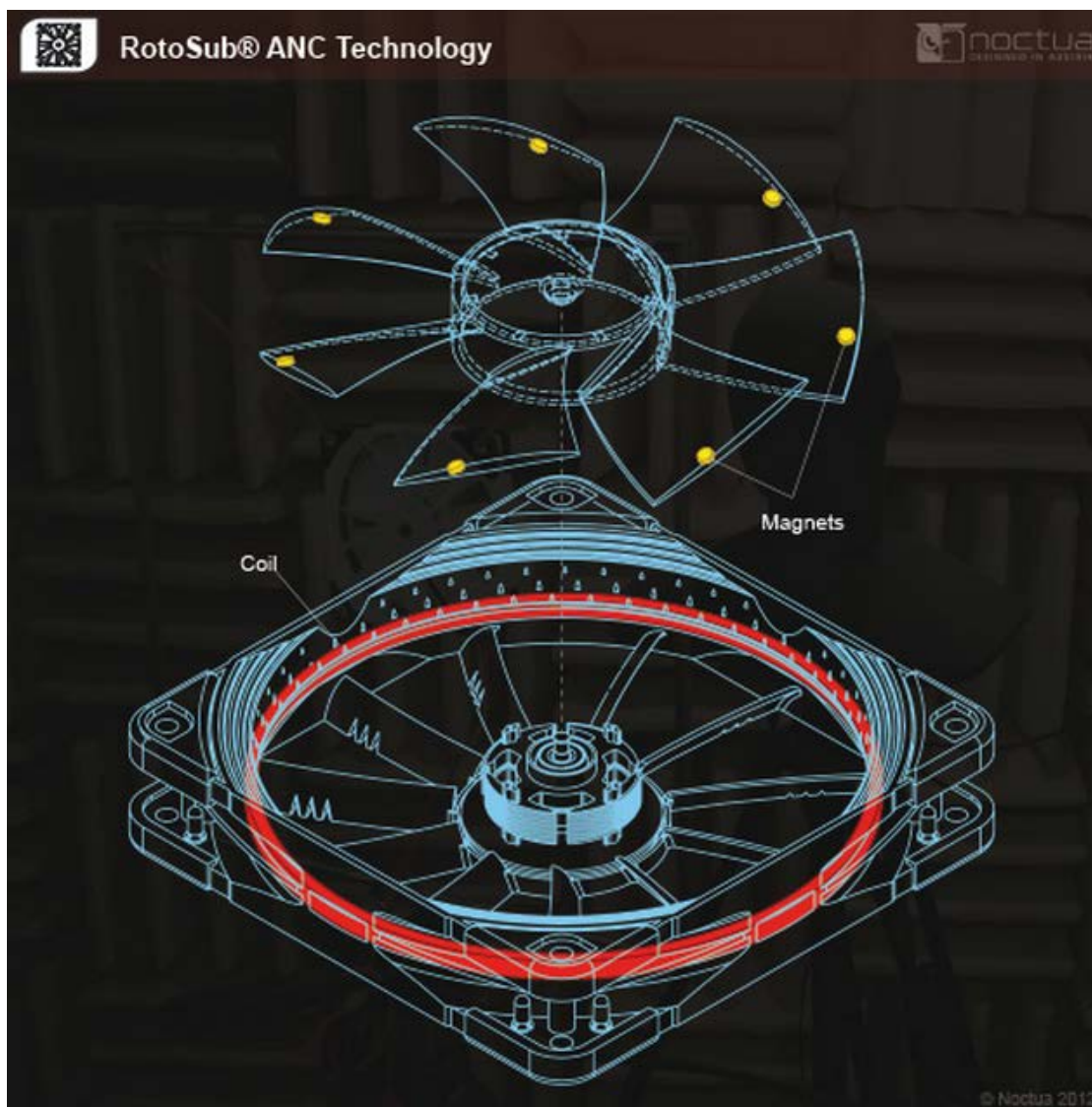


Kuvio 22. Aksiaalituulettimen tuottamat ääniaallot (ks. alkuperäinen kuvio Noctua ANC project)

Patentoitu RotoSub®-teknologia mahdollistaa tuulettimen itsensä tuottaa ohjaussignaalin (ks. kuvio 23). Ohjaussignaali luodaan tuulettimen lavoissa olevien magneettien ja kiertoradan ympärillä olevan käämin avulla (ks. kuvio 24). Tällä tavalla ohjaussignaali saadaan täsmällisesti vastaamaan 180-asteen vaihe-erolla alkuperäisen ääniaallon vaihetta ja pyörähdysmallia. Vaimennus tapahtuu aksiaalituulettimen sisäänotto- ja ulostulopuolella ja se on erittäin riippumaton ympäristöstään. (Noctua ANC project.)

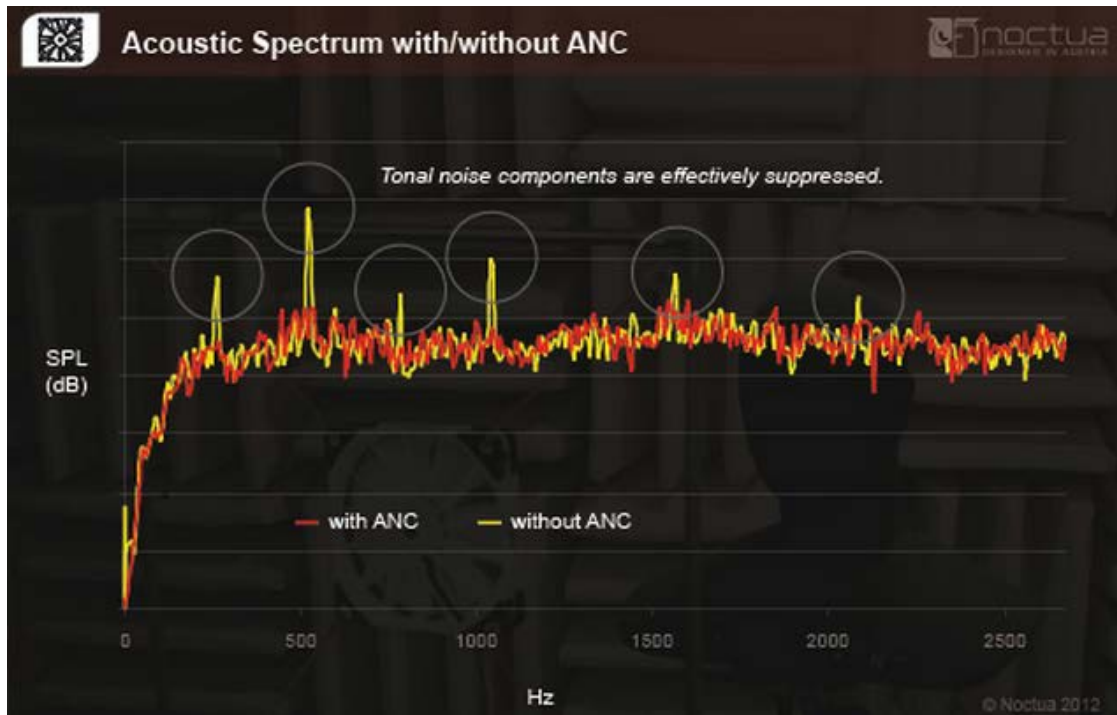


Kuvio 23. Perinteisen aktiivisen äänenvaimennuksen ja RotoSub®-teknologian vertailua (ks. alkuperäinen kuvio Noctua ANC project)



Kuvio 24. Tuulettimen lapojen magneetit ja pyörimisrataa ympäröivä käämi (ks. alkuperäinen kuvio Noctua ANC project)

Ensimmäiset testitulokset, 2500 kierrosta minuutista pyörivällä Noctua NF-F12 \varnothing 120mm aksiaalituulettimen prototyyppillä, johon on integroitu RotoSub®-teknologia, osoittavat huomattavan äänenvaimennuksen tuulettimen pyörimistajuuksella ja sen kerrannaisilla (ks. kuvio 25). Tuotekehityksen tavoitteena on saavuttaa laajakaistaisempi taajuussisältö, joka on ihmiskorvalle miellyttävämpää kuunneltavaa. (Noctua ANC project.)



Kuvio 25. Taajuusspektri järjestelmän ollessa päällä ja pois päältä (ks. alkuperäinen kuvio Noctua ANC project)

5 Projektin käytännön toteutus

5.1 Äänitasojen mittaaminen (SALAINEN)

5.2 Aktiivisen äänenvaimennusjärjestelmän suunnittelu

5.2.1 Äänenvaimennustekniikan valinta

Työssä päätettiin toteuttaa mukautuva aktiivinen myötäkytketty äänenvaimennusjärjestelmä. Kappaleessa 3.1 on kuvattu, että myötäkytketty järjestelmä on

takaisinkytkettyä järjestelmää parempi suorituskyvyltään ja vakaudeltaan. Myötäkytketyllä järjestelmällä voidaan myös vaimentaa laajakaistaista ääntä ja korkeitakin taajuuksia. Esimerkiksi Välimäen, Antilan, Rantalan ja Linjaman tutkimuksessa ”Aktiivinen melunvaimennus ilmastointiputkessa” vaimennuksen kohteena oleva taajuusalue on 0–900 Hz.

5.2.2 Komponenttien valinta (OSITTAIN SALATTU)

Työssä elektroninen ohjainjärjestelmä päätettiin toteuttaa Texas Instrumentsin *TMS320C6713 Development Start Kit*-korttia käyttäen (ks. kuvio 35). Näytteenottotaajuuden täytyy olla vähintään kaksi kertaa yhtä suuri kuin korkein vaimennettavana oleva taajuuskomponentti, näytteenottotaajuus kuitenkin valitaan käytännössä ainakin 2,2-kertaiseksi (Välimäki ym. 1997, 3). Snyderin (2000, 99) mukaan parempi vaihtoehto on kymmenkertainen näytteenottotaajuus korkeimpaan vaimennettavana olevaan taajuuskomponenttiin nähden. Kortin mukana toimitettava ohjelmisto, *Code Composer Studio*, tukee oletuksena 8, 16, 24, 32, 44,1, 48 ja 96 kHz:n näytteenottotaajuuksia, mikä on riittävä tässä sovelluksessa. Kortilla on myös kaksi linjasisääntuloa (3,5mm) sekä kaksi linjaulostuloa (3,5mm), joten se soveltuu ääniä käsitteleviin sovelluksiin mainiosti. *TMS320C6713* voi käsitellä liukulukuja pelkkien kokonaislukujen laskemisen sijaan. Tällöin ei synny niin suurta kvantisointivirhettä eli pyöristysvirhettä, koska desimaalin paikkaa kyetään siirtämään. Liukulukuja käyttävä digitaalinen signaaliprosessori on kokemattoman käyttäjän helpompi säätää. (Snyder 2000, 103.)

Toinen valintakriteeri oli se, että Texas Instrumentsilla on tehty aktiivisia äänen- vaimennussovelluksia TMS320-perheen digitaalisillasisaaliprosessoreilla. Myös lukemattomia tuotekehitysprojekteja, tutkimuksia ja kouluprojekteja aktiivisen äänen- vaimennuksen parissa on tehty, joissa on käytetty juuri Texas Instrumentsin *TMS320C6713 Development Start Kit*-korttia.



Kuvio 35. Texas Instruments TMS320C6713 Development Start Kit

Työssä referenssi- ja virhemikrofoneiksi valittiin RØDE:n *smartLav+* kondensaattorimikrofonit (ks. kuvio 36). Valintaperusteena oli Kletschkowskin *Adaptive feed-forward control of low frequency interior noise*-kirjan kappaleessa 11 esitelty *Active Noise Control Around Human Head*-tutkimus, jossa on käytetty korkealaatuisia ja herkkiä Brüel & Kjærin 4188-kondensaattorimikrofoneja. BK-4188 mikrofoniin herkkyyden on 31.6 mV/Pa ja taajuus alue 8 Hz–12.5 kHz. *smartLav+* mikrofoniin on kohtalaisen hyvä herkkyyden, 17.8 mV/Pa, verrattuna Brüel & Kjærin mikrofoniin, koska tyypillisesti pienillä kondensaattorimikrofoneilla herkkyyden on 5 mV/Pa. Myöhemmin huomattiin, että Snyderin (2000, 81) mukaan järjestelmässä tulisi käyttää edullisia kondensaattorimikrofoneja, jotka ilman virtalähdettä ja johdotuksia tulisi maksaa vähemmän kuin 5 dollaria. Ratkaisu, johon on päädytty, on näiden kahden väliltä. Yhtenä rajoittavana tekijänä komponenttien valinnassa oli myös toimeksiantajan toive, että komponentit hankitaan yrityksiltä, joissa heillä on oston tila valmiina.



Kuvio 36. RØDE smartLav+

Työssä ohjainlähteeksi valittiin Creative GigaWorks T20 Series II-stereokaiuttimet (ks. kuvio 37).. GigaWorks T20 kaiuttimien maksimi äänenpainetaso L_p on 80 dB. Äänitehotason ja äänenpainetason välinen suhde on kuvattu kaavassa 2.

$$L_w = L_p + 10 * \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) dB \quad (2)$$

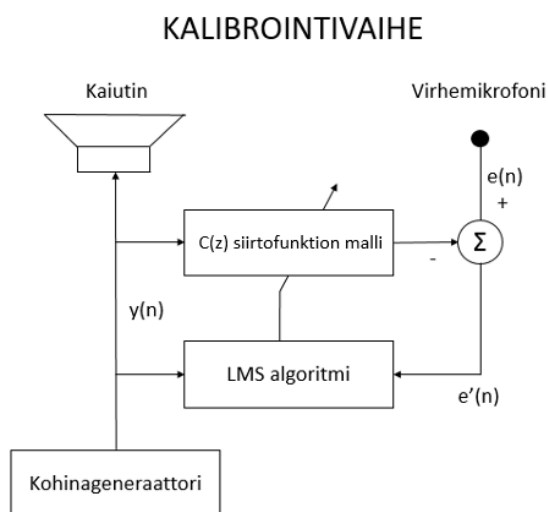
Kaavassa $Q = 2$, puolipallolle ja etäisyys $r = 0,9$ m olettaen, että kaiuttimet ovat työtilan perällä. Kaavasta on jätetty tilan jälkikaiun huomioiva osa pois siksi, että kaapin äänitehotaso on mitattu puolikaiuttomassa huoneessa. Tulokseksi tulee $L_w = 72,9$ dB, joka on enemmän kuin kaapin tuottama äänitehotaso, joten kaiuttimien teho riittää. Kaiuttimien taajuusvaste on 50 Hz ~ 20 kHz eli ne pääsevät tarpeeksi alhaisille taajuuksille.



Kuvio 37. Creative GigaWorks T20 Series II–stereokaiuttimet

5.2.3 Ohjausohjelman suunnittelu

Ohjausohjelma koostuu kahdesta eri vaiheesta: kalibrointivaiheesta (ks. kuvio 38) ja vaimennusvaiheesta (ks. kuvio 39). $C(z)$ on FIR-suodatin, joka omaa kiinteät suodattimen kertoimet kalibroinnin jälkeen.



1. Luo valkoista kohinaa, toista sitä kaiuttimella ja tuo se myös suodattimelle $C(z)$ ja LMS algoritmille.

2. Laske $e'(n)$ seuraavalla kaavalla:

$$e'(n) = e(n) - \sum_{i=0}^{M-1} C_i(n)y(n-i)$$

jossa M on suodatin kerrointen lukumäärä

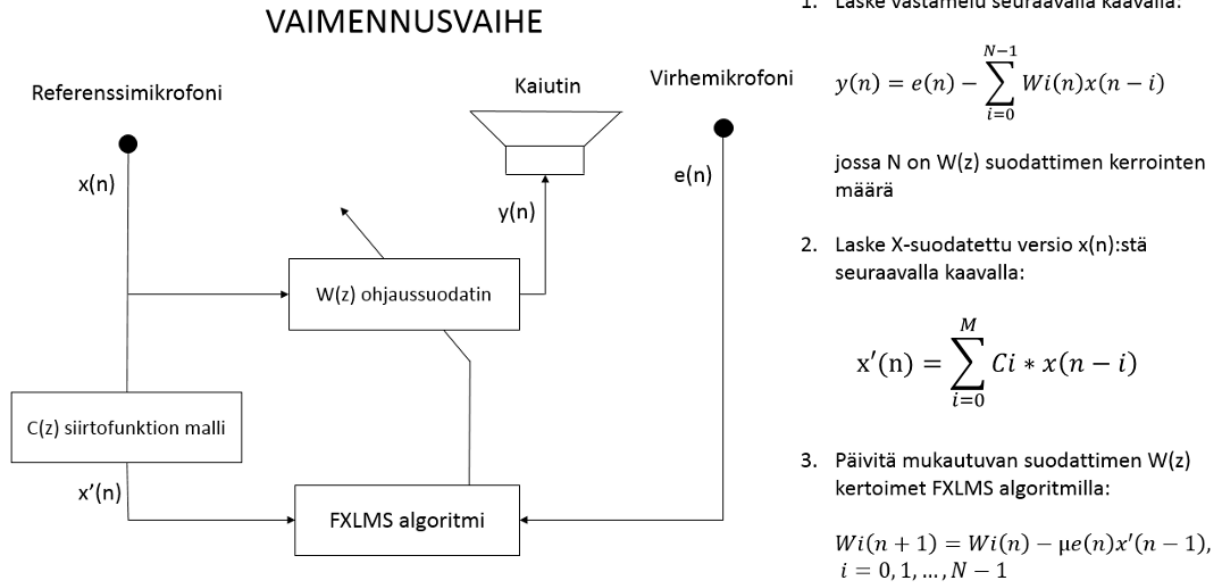
3. Päivitä $C(z)$ suodattimen kertoimet käyttäen LMS algoritmia:

$$C_i(n+1) = C_i(n) + \mu e'(n)y(n-1), \quad i = 0, 1, \dots, M-1$$

jossa μ on lähenemiskerroin

4. Jatka kalibrointia noin 10 sekuntia ja tallenna suodattimen kertoimet ja käytä niitä vaimennusvaiheessa

Kuvio 38. Kalibrointivaihe



Kuvio 39. Vaimennusvaihe

Vaimennusvaiheen askeleita toistetaan niin kauan kuin järjestelmä on päällä. Reaaliaikaista kumoamispolun siirtofunktion mallinnusta ei tarvitse ohjelmassa tehdä, koska suojavaappi käynnistetään ja sammutetaan päivittäin, joten pitkäaikaisesti tapahtuvat siirtofunktion muutokset tulevat huomioon. $W(z)$ ohjaussuodatin on mukautuva IIR-suodatin. Kuo ja muut ovat kuvanneet FxLMS-pohjaisen ohjelman toiminnan, jonka perusteella edellä esitetty ohjelmasuunnitelma on tehty (Kuo ym. 1996, 22–23 & 85–95).

5.2.4 Järjestelmän rakentaminen

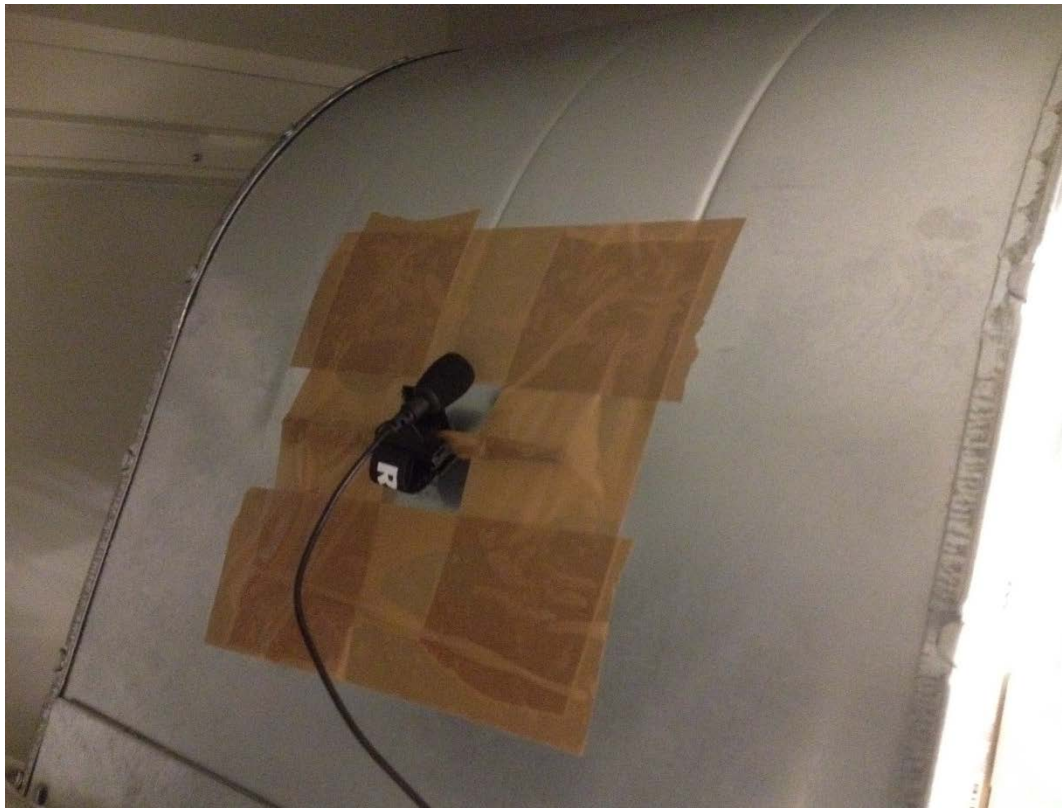
Järjestelmän referenssimikrofoni sijoitettiin keskipakopuhaltimen kuomuun kiinni (ks. kuvio 40). Referenssimikrofoni ei saa olla vaimennettavan taajuuden amplitudin nollakohdassa (Kuo, Panahi, Chung, Horner, Nadeski & Chyan 1996, 39). Jänniteohjattua keskipakopuhallinta ohjataan 64 %:n nopeudella

maksiminopeudesta kaapin kalibroiduilla perusasetuksilla. Puhaltimen maksinopeus on 1285 rpm ja puhaltimessa on 48 lapaa, joten lapataajuudeksi tulee ~ 658 Hz:ä kaavasta 3:

$$\frac{1285 \cdot \frac{1}{\text{min}} \cdot 0,64 \cdot 48}{60\text{s}} = \sim 658 \text{ Hz} \quad (3)$$

Kaava 4 on aallonpituuden kaava, jossa λ on aallonpituus ja v on äänennopeus ja f on taajuus. 658 Hz:n taajuudella aallonpituus on siis 0,521m. Suurin amplitudi syntyy puhaltimen lavan leikatessa ilmaa, ja koska referenssimikrofoni on kuomussa kiinni, se ei ole amplitudin nollakohdassa.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4)$$



Kuvio 40. Referenssimikrofoni puhaltimen kuomussa kiinni

Virhemikrofoni päätettiin sijoittaa etupaneeliin, mahdollisimman lähelle käyttäjän päätä, johon vaimennettava alue halutaan luoda (ks. kuvio 41).



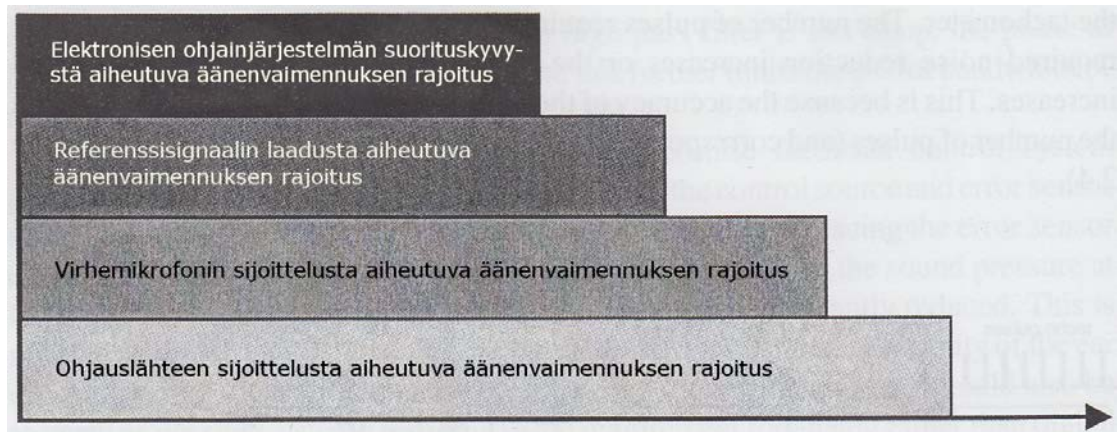
Kuvio 41. Virhemikrofoni etupaneelissa

Sekundäärinen äänilähde eli kaiuttimet päätettiin alustavasti sijoittaa työtilan perälle (ks. kuvio 42).



Kuvio 42. Kaiuttimet työtilan perällä

Ensimmäinen tekijä, joka vaikuttaa maksimaalisen globaalisen äänenvaimennuksen saavuttamiseen on ohjauslähteen sijoittaminen (ks. kuvio 43). Yksinkertaisessa ilmastointiputkeen rakennetussa järjestelmässäkin on väliä ohjauslähteen sijoittamisella. Järjestelmä toimii paremmin tietyillä ohjauslähteen sijainneilla. Toinen vaimennukseen vaikuttava tekijä on virhemikrofonin sijoittaminen. Kolmas vaimennukseen vaikuttava tekijä on referenssisignaalin laatu. Vain virhe- ja referenssisignaalin koherenssissa olevia taajuuskomponentteja voidaan vaimentaa. Viimeisenä vaimennukseen vaikuttavana tekijänä on elektronisen ohjausjärjestelmän suorituskyky. (Hansen 2001, 19–20.)



Kuvio 43. Äänenvaimennusta rajoittavien tekijöiden hierarkia (alkup. englanninkielinen kuvio ks. Hansen 2001, 20)

Aktiivisen äänenvaimennus järjestelmän suorituskykyä voidaan mitata virhe- ja referenssisignaalin koherenssilla seuraavalla kaavalla (5):

$$C_{dx}(\omega) = \frac{|S_{dx}(\omega)|^2}{S_{dd}(\omega)S_{ee}(\omega)} \quad (5)$$

jossa $S_{ee}(\omega)$ on virhesignaali, $S_{dd}(\omega)$ on referenssisignaali, ω on määrätty taajuus ja $C_{dx}(\omega)$ on koherenssi, jota mitataan arvona 0–1.

Kaavasta 6 nähdään, että mahdollisimman pienen virhesignaalin saavuttamiseksi koherenssin on oltava mahdollisimman lähellä arvoa 1.

$$S_{ee}(\omega) = (1 - C_{dx}(\omega))S_{dd}(\omega) \quad (6)$$

Desibeleinä vaimennuksen määrä ilmoitetaan seuraavalla kaavalla (7):

$$Vaimennus (dB) = -10 \log_{10}(1 - C_{dx}(\omega)) \quad (7)$$

Arvolla $C_{dx}(\omega) = 0,99$ määrätyn taajuuskomponentin vaimennus on maksimissaan -20 dB. Kun koherenssi $C_{dx}(\omega) = 0,9$, maksimaalinen vaimennus laskee jo -10 dB:iin. (Kuo & Morgan 1996, 57–58.)

Virhe- ja referenssimikrofonien sijoittaminen onkin siis hyvin tärkeää ja Rosenhousen (2001, 224) mukaan järjestelmän säätämistä yrityksen ja erehdyksen kautta voidaan pitää yhtenä parhaista lähestymistavoista tiettyjen ongelmien ratkaisemisessa.

6 Tulokset (SALAINEN)

7 Pohdinta (OSITTAIN SALAINEN)

7.1 Projektin työvaiheet ja eteneminen lyhyesti

Opinnäytetyön aihe sai alkunsa lokakuussa 2014 toimeksiantajana toimineen yrityksen aihe-ehdotuksista. Aihe-ehdotuksista ”Mikrobiologisen suojakaapin äänitason ja laminaarisuuden kehittäminen” oli mielenkiintoisin. Joulukuussa 2014 aihetta rajattiin tästä edelleen äänitasojen kehittämiseen, tarkemmin äänen vaimentamiseen, ja lopulta aktiivisen äänenvaimennuksen hyödyntämiseen mikrobiologisessa suojakaapissa. 23.12.2014 Kojair Tech Oy:n tehtaalla pidetyssä ”kickoff-palaverissa” kirjoitettiin opinnäytetyösopimus ja keskusteltiin projektin budjetista, läpiviennistä ja realistisista tavoitteista. Palaverissa olivat suunnitellusti läsnä opinnäytetyöntekijä ja yrityksen tuotekehityspäällikkö. Motivaatio työhön oli erittäin suuri todella mielenkiintoisen aiheen ansiosta.

Työ aloitettiin laatimalla projekti aikataulu (liite 5) ja opinnäytetyön sisällysluettelo kokonaisuuden ja eri työvaiheiden hahmottamiseksi. Aikataulu ja opinnäytetyön sisällysluettelon rakenne esiteltiin ohjaavalle opettajalle viikolla 2 pidetyssä tapaamisessa. Aikataulu ja sisällysluettelon rakenne olivat opinnäytetyöntekijän ja ohjaavan opettajan mielestä sellaiset, joiden perusteella työtä oli hyvä alkaa tekemään. Tapaamisessa kävi ilmi, että myös ohjaava opettaja olisi halunnut olla aloituspalaverissa mukana. Myös siinä mielessä, että yrityksen toimintaan olisi voinut tutustua joten sovittiin, että kevään aikana pidetään välipalaveri Kojair Tech Oy:n tehtaalla, jossa tarkastellaan työn etenemistä ja tutustutaan yrityksen toimintaan.

Projektin esitietojen hankintaan käytettiin internetin hakukoneita sekä kirjaston palveluita: paikallista aineistoa, Primo Central- ja Nelli-hakuja sekä Melindan kansalliskirjastoa ja yliopistojen yhteistietokantaa kaukolainojen tilaamiseksi. Näiden kanavien kautta löytyi kattavasti aineistoa projektin esitietoja varten. Etenkin Melindan kaukolainapalvelun kautta hankitut teokset ovat osoittautuneet erittäin hyödyllisiksi työn tekemisessä.

Projektia jatkettiin aikataulun mukaisesti kirjoittamalla teoriaosuus melusta ja sen vaikutuksesta terveyteen, jotta työssä määriteltyihin tavoitteisiin pyrkiminen on perusteltua. Näin myös koulutusohjelmaan liittyvä linkki saatiin sidottua, koska yhtenä työn tavoitteista on parantaa työergonomiaa. Osiossa 2 todetaan, että mikrobiologisen suojakaapin tuottamalla äänenpainetasoilla on pahimmassa tapauksessa jopa merkittäviä terveydellisiä haittoja.

Toisena tehtävänä samanaikaisesti oli etsiä sopiva paikka mikrobiologiselle suojakaapille Jyväskylän ammattikorkeakoulun tiloista. Sopiva paikka löytyi tilasta AK13 yhteistyöllä turvallisuuskoordinaattori Timo Hiltusen kanssa ja kaappi toimitettiin sinne Kojair Tech Oy:n toimesta aikataulun mukaisesti viikolla 7.

Seuraavana tehtävänä oli äänenpainetason mittausta varten tarvittavan välineistön hankinta ja siihen tutustuminen sekä äänenpainetason mittauksen tekeminen. Mittauksissa käytettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun fysiikan laboratorion Brüel & Kjærin *Investigator 2260* äänitasomittaria. Mittarin toimintaan antoi lyhyen perehdytyksen laboratoriovastaava Pertti Ahonen. Laajemmin mittarin toimintaan tutustuttiin käyttöohjeiden ja testaamisen kautta. Kaapille päätettiin tehdä mittaus, joka noudattaa EN 12469:2000-standardia. AK13-tilan rajoitteiden vuoksi äänitasomittaria ei voitu asettaa samaan paikkaan kuin EN 12469:2000-standardi määrittää.

Työhön tarvittavien komponenttien valinta ja tilaaminen suoritettiin ennen aikataulussa olevaa kahden viikon lomaa, mikä oli hyvä asia toimitusaikojen vaikuttamisen kannalta aikatauluun.

Lomareissun jälkeen alkoi tutustuminen Texas Instrumentsin *TMS320C6713 Development Start Kit*-korttiin. Korttiin tutustuttiin tekemällä Chassaingin ja Reayn (2008) kirjassa olevat harjoitustehtävät sekä testaamalla kortille kirjoitettuja demo-ohjelmia. Aktiivisen äänenvaimennusjärjestelmän fyysinen puoli toteutettiin tässä vaiheessa sijoittamalla kaappiin referenssimikrofoni, virhemikrofoni ja ohjauslähteenä toimivat kaiuttimet.

Vielä 26.3.2015 Kojair Tech Oy:n tehtaalla pidetyssä välipalaverissa opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa toimiva prototyyppi järjestelmästä. Kuitenkin vain viikkoa myöhemmin, opinnäytetyöntekijän vieraillessa IT-dynamolla digi-

taalista signaalinkäsittelyä ja ohjelmointia opettavien opettajien luona, työn todellinen haasteellisuus valkeni. Viikolla 15 työn tavoitteita päätettiin muuttaa ja todettiin, että toimivaa prototyyppiä ei kyetä toteuttamaan.

Viimeisillä viikoilla keskityttiin opinnäytetyöraportin kirjoittamiseen. Toteutuksena ohjausohjelmasta tehtiin kaavio ja kuvaus sen toiminnasta. Referenssi- ja virhesignaaleista tehtiin koherenssiarvio.

7.2 Työvaiheiden arviointi

Projektin aiheen rajaus onnistui mielestäni todella hyvin, koska se keskittyi selkeästi vain yhteen asiaan ja tavoitteeseen. Aihe oli myös erittäin mielenkiintoinen ja motivaatiota löytyi erittäin paljon.

Työn aikataulu ja sisällysluettelon rakenne vaikuttivat myös järkeviltä ja hyvin jäsennellyiltä. Tosin projektisuunnitelma ja aikataulu ovat vain paras arvaus siitä mitä tulee tapahtumaan.

Esitietojen hankinta ja teorian kirjoittaminen sujuivat myös mutkattomasti. Käytin mielestäni monipuolisesti eri tiedonhankintakanavia ja työssä käytetty aineisto on kattavaa.

Kaapin sijoittaminen Rajakadulle tapahtui kitkattomasti ja aikataulun puitteissa.

Käytännön toteutuksen haastavuus alkoi selviämään, kun harjoittelin DSP-kortin käyttöä. Harjoitusohjelmia tehdessä niiden yksinkertaisuus alkoi mietityttämään, sillä toteutettavassa ohjelmassa on niin monta eri komponenttia. Viimeinen varmistus työn haastavuudelle tuli IT-dynamon opettajilta ja motivaatio oli koetuksella. Tässä vaiheessa olisi ehdottomasti tarvittu yhteistyökumppani, jolla on kokemusta digitaalisesta signaalinkäsittelystä ja ohjelmoinnista, jotta oikeaan suuntaan ohjaaminen olisi onnistunut.

Työn tekemiseen syntyi uutta puhtia viikolla 15, kun hyväksyin itselleni, että toimivaa prototyyppiä ei saada toteutettua ja ilmoitin tästä ohjaavalle opettajalle ja toimeksiantajalle. Opinnäytetyöraportin kirjoittaminen astuikin päärooliin tässä vaiheessa.

Aiheen valinnassa tapahtui alun perin määriteltyjen tavoitteiden kannalta selkeä virhe, sillä toimivan prototyypin tekeminen tällä aikataululla olisi vaatinut vahvaa digitaalisen signaalinkäsittelyn ja ohjelmoinnin osaamista. Keskusteltuani digitaalista signaalinkäsittelyä ja ohjelmointia opettavien opettajien kanssa IT-dynamolla uskon, että aihe olisi ollut haastava jopa heidän opiskelijoilleen. Jos aiheen valintaa tarkastellaan toimeksiantajan näkökulmasta, on aihe erittäin herkullinen ja sillä on paljon potentiaalia. Toimeksiantajan toiveissa onkin että tuotekehitystyötä jatketaan. Muuttuneet tavoitteet ja aiheen poikkitieteellisyys huomioon ottaen aiheen valinta onnistui jollain tasolla.

Aiheeseen tutustumisen kautta syntynyt tietopohja ja tunne siitä, että aihe on vahvasti hallussa loivat harhakuivan ja vauhtisokeuden siitä, että pystyn toteuttamaan järjestelmän käytännössä. Myöhemmin kuitenkin tuli ilmi käytännön toteutuksen monimutkaisuus ja aikataulu tuli vastaan. Tavoitteita olisi tullut muuttaa hyvissä ajoin. Toisaalta tämä ei ole hukkaan heitettyä työtä vaan sopivien yhteistyökumppanien kanssa työn alkuperäiset tavoitteet ovat saavutettavissa. Uskon myös, että järjestelmän säätäminen ja fyysisen puolen optimointi eli mikrofonien ja kaiuttimien optimaalisen sijainnin hakeminen ja analysointi, onnistuu myöhemmässä vaiheessa tämän työn aikana hankitun tietopohjan ja aineiston avulla.

Tämän hetken tietämyksellä olisin rajannut tavoitteet seuraavanlaisiksi: luotettava äänenpainetason ja taajuusspektrin mittaus, hyvän koherenssin löytäminen dominoivilla taajuuskomponenteilla, eli referenssi- ja virhemikrofonin optimaalinen sijoittelu ja ohjausohjelmaan tutustuminen. Uskon, että aikataulussa varattu aika olisi riittänyt edellä määriteltyjen tavoitteiden saavuttamiseksi, mutta nyt tehtäviä oli liikaa.

7.3 Jatkotoimenpiteet

Työllistyn valmistumisen jälkeen toimeksiantajayritykseen ja tuotekehityspäällikkö on sitä mieltä, että tuotekehitystyötä kannattaa jatkaa. Aktiivinen äänenvaimennus onkin ainoa varsinaisista äänenvaimennuksen menetelmistä, joilla kaappia voidaan vaimentaa. Muita tapoja vähentää kaapin äänenpainetasoa on helpottaa ilmanvirtauksia ja kehittää työtasojen rei'ityksiä, jotta ilman kuristumisesta syntyvää suhinaa saadaan pienennettyä.

Ensin kaapista on kuitenkin mitattava luotettava taajuusspektri, josta nähdään onko taajuussisällössä matalia ja dominoivia taajuuspiikkejä, joita aktiivisella äänenvaimennuksella voidaan vaimentaa. Äänenpainetason ja taajuusspektin mittauksia varten on konsultoitava akustiikan ammattilaisia.

Mikäli kaapin tuottaman melun taajuussisältö osoittautuu niin tasaiseksi kuin mittaamieni ääninäytteiden taajuusspektrit osoittavat, ei hyvin toimivaa aktiivista äänenvaimennusjärjestelmää kaappiin voida toteuttaa.

Lähteet

Ampuja, O. & Peltomaa, M. 2014. Huutoja hiljaisuuteen – Ihminen ääniympäristössä. Tampere: Tammerprint.

Starck, J. & Teräsvirta, L. 2009. Melu. Tampere: Esa print.

Jauhiainen, T., Vuorinen, H. & Heinonen-Guzejev, M. 2007. Ympäristömelun vaikutukset. Helsinki: Edita Prima.

Heinonen-Guzejev, M., Jauhiainen T., Sala E., Ström U. & Vuorinen, H. 2012. Melulla on monia vaikutuksia terveyteen. Suomen lääkärilehti 36/2012 vsk 67, 2445-2450.

Heinonen-Guzejev, M. 2013. Melu uhkaa terveyttä. Hyvä terveys-lehti 22.6.2013. Viitattu 14.1.2015. http://www.hyvaterveys.fi/artikkeli/mika_vikana/melu_uhkaa_terveytta.

Minkälaisia ongelmia melusta voi aiheutua? Euroopan työterveys- ja työturvallisuusvirasto. Viitattu 14.1.2015. https://osha.europa.eu/fi/topics/noise/problems_noise_cause.html.

Ylivertaista puhdasilmateknologiaa turvalliseen, hiljaiseen ja varjottomaan työskentelyyn. Kojair Tech Oy. Viitattu 9.2.2015. http://www.kojair.com/fi/kojair_tech_oy.

Kojair Tech Oy. 2009. Anniversary publication. Esite. Viitattu 9.2.2015. http://www.kojair.com/files/187/KOJAIR_Anniversary_Publication.pdf.

Tokhi, M. & Leitch, R. 1992. Active Noise Control. Oxford: Clarendon Press.

Hansen, C. 2001. Understanding active noise control. Lontoo: Spon press.

Kuo, S. & Morgan, D. 1996. Active noise control systems – Algorithms and DSP implementations. New York: John Wiley & Sons.

Kletschkowski, T. 2012. Adaptive feed-forward control of low frequency interior noise. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V.

Snyder, S. 2000. Active noise control primer. New York: Springer-Verlag.

Rosenhausen, G. 2001. Active noise control – Fundamentals for acoustic design. Southampton: WIT Press.

Kuo, S., Panahi, I., Chung, K., Horner, T., Nadeski, M. & Chyan, J. 1996. Design of active noise control systems with the TMS320 family. Sovellusraportti. Texas Instruments Incorporated. Viitattu 20.3.2015.
<http://www.ti.com/lit/an/spra042/spra042.pdf>.

Chassaing, R. & Reay, D. 2008. Digital signal processing and applications with the TMS320C6713 DSK and TMS320C6416 DSK – Second edition. New Jersey: John Wiley & Sons.

Meluntorjunta. 2014. Työterveyslaitos. Viitattu 10.4.2015.
<http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/melu/meluntorjunta/sivut/default.aspx>

Sjösten, P. 2003. Active noise control of enclosed sound fields – optimizing the performance. Väitöskirja. Göteborg: Reproservice, Chalmers.

Grylin, P. & Hedborg, M. 2007. Active Noise Control of a Forest Machine Cabin. Diplomityö. Linköpingin teknillinen yliopisto, sähkötekniikan tiedekunta. Viitattu 14.4.2015. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:23741/FULLTEXT01.pdf>.

Noctua ANC project. Rascom Computer Distribution GmbH. Viitattu 16.4.2015. http://www.noctua.at/main.php?show=rotosub_anc_project

Välimäki, V., Antila, M., Rantala, S. & Linjama, J. 1997. Aktiivinen melunvaimennus ilmastointiputkessa. Akustiikkapäivät 1997. Tutkimusraportti. Viitattu 23.4.2015 <http://users.spa.aalto.fi/vpv/publications/akupvt97.pdf>.

