

KUORMA-AUTON OHJAAMON AKTIIVINEN MELUNVAIMENNUS

Marko Antila ja Antti Lankila

VTT
PL 1300, 33101 TAMPERE
marko.antila@vtt.fi

1 JOHDANTO

Kiinnostus henkilöautojen sisämelun aktiiviseen vaimentamiseen (Active Noise Control, ANC) on lisääntynyt viime vuosina. Useita kokeiluja aktiivijärjestelmillä on tehty, ja joitain aktiivisella äänenhallintajärjestelmällä varustettuja autoja on jo markkinoilla. Yleensä näissä järjestelmissä on pyritty vaimentamaan moottorin pyörimisnopeuteen kytkettyneitä tonaalisia komponentteja eli kerrannaisia. Kuorma-autoihin tällaisia kokeiluja on tehty vähemmän, vaikka moottorin pyörimisnopeudesta johtuva melu saattaa olla henkilöautoa huomattavasti voimakkaampaa.

Olemme kokeilleet aktiivisen äänenhallintajärjestelmän soveltamista kuorma-autoon laboratorio-olosuhteissa. Kuorma-auton ohjaamoon on tuotettu erilaisia ääniherätteitä, ja niitä on pyritty vaimentamaan aktiivisin menetelmin. Ennen käytännön järjestelmän rakentamista on mahdollisen aktiivijärjestelmän suorituskykyä arvioitu käyttäen simulointityökalua, jossa eri kerrannaiskomponentteja voidaan vaimentaa halutulla tavalla käyttäen säätöjärjestelmän mallia, ja tuottaa kuunneltavia ääninäytteitä.

2 KUORMA-AUTON AKTIIVISEN VAIMENTAMISEN MAHDOLLISUUDET

Periodisen melun aktiivinen vaimentaminen suljetussa tilassa on periaatteessa hyvin tunnettua. Hyvä yleiskatsaus aiheeseen on Nelsonin et al. tekemänä viitteessä [1]. Siihen liittyvät käytännön kokeilut ovat viitteessä [2], ja erityisesti autosovellusten kokeilut viitteessä [3]. Autojen aktiivinen äänenhallinta on esitelty viitteessä [4]. Sekä henkilöautoihin että työkoneisiin on viime vuosina kokeiltu aktiivista äänenhallintaa. Henkilöautopuolella on erityisesti keskitytty äänen aktiiviseen profilointiin (Active Noise Profiling, ANP) [5], [6], [7] myös pelkästään henkilö- ja pakettiautojen sisämelua vaimentaviakin sovelluksia on ollut useita [8], [9], [10], [11], [12]. Tällöin äänen psykoakustinen arviointi tulee erityisen tärkeäksi [13], [14]. Lisäksi pelkästään ääntä vaimentaviakin sovelluksia on ollut useita sekä autoihin että työkoneisiin, kuten pieniin kunnossapitoon tarkoitettuihin työkoneisiin [15], [16], maansiirtokoneisiin [17], trukkeihin [18] ja traktoreihin [19]. Kuorma-autojen ohjaamomelun vaimennuksiin keskittyviä tutkimuksia on ollut vähän [20], [21].

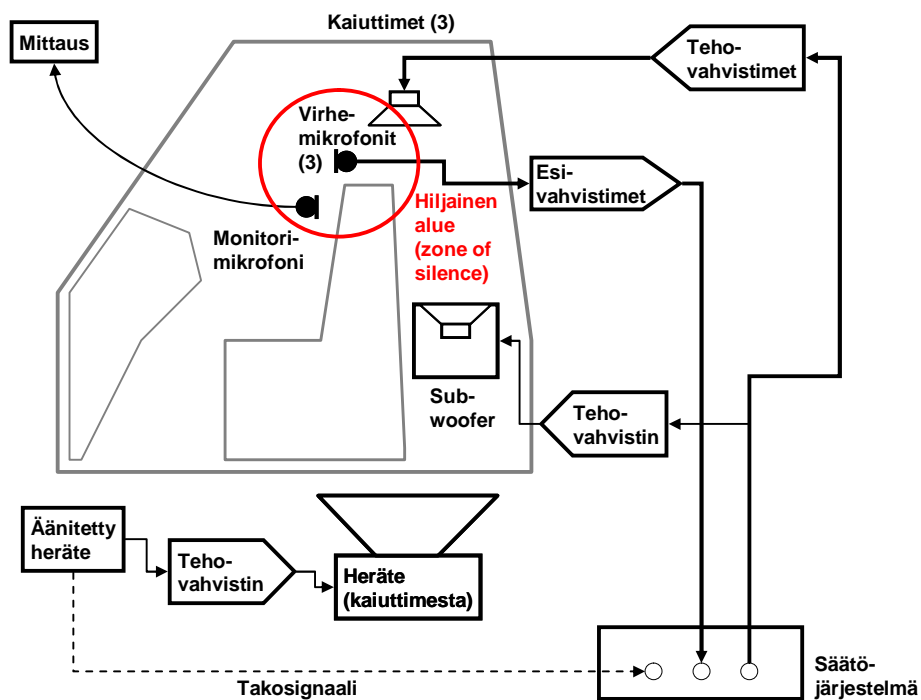
Tutkimusten tuloksena on, että periodisen melun vaimentaminen autojen ja työkoneiden ohjaamossa onnistuu myös käytännössä. Suurimpina haasteina ovat ohjaamoon syntyvän hiljaisen alueen koko sekä aktiivisen vaimennuksen kyky seurata jatkuvasti muuttuvaa moottorin pyörimisnopeutta ja sen tuottamia kerrannaisia. Erityinen haaste kuorma-autojen ohjaamossa ovat isojen moottorien tuottamien pienitajuisten komponenttien vaimennus. Lisäksi hyötyajoneuvojen ja työkoneiden apujärjestelmät kuten hydraulikka tuottavat lisää vaimennettavia kerrannaiskomponentteja suoran moottorimelun kerrannaisten lisäksi.

3 JÄRJESTELMÄN TOTEUTUS KUORMA-AUTOON

Aktiivisen äänenhallinnan järjestelmä rakennettiin Dongfeng Motor Co:n kuorma-auton ohjaamoon. Järjestelmä toteutettiin käytännössä Kiinassa olevaan kuorma-autoon (Kuva 1, vasemmalla), sekä samanaikaisesti testausta ja kehitystä varten VTT:n aktiivisen äänenhallinnan laboratorioissa olevaan kuorma-auton ohjaamoon (Kuva 1, oikealla). Järjestelmä koostuu ohjaamoon asennetuista lisäkaiuttimista, virhemikrofoneista sekä säätöjärjestelmästä (Kuva 2). Yksi lisäkaiuttimista on pienitaajuisia ääniä hyvin toistava subwoofer. Vahvistinelektronikkana on käytetty tavallisia audiokäyttöön tarkoitettuja 24 V vahvistimia. Herätteenä on käytetty sekä keinotekoisia, eri kerrannaisia sisältäviä herätteitä sekä Kiinassa oikeissa käyttöolosuhteissa tallennettuja herätesignaaleja.



Kuva 1. Dongfeng Motor Co:n kuorma-auto, johon kokeilujärjestelmä rakennettiin ja sen ohjaamo VTT:n aktiivisen äänenhallinnan laboratorioissa valmiina mittauksiin ja kokeiluihin.

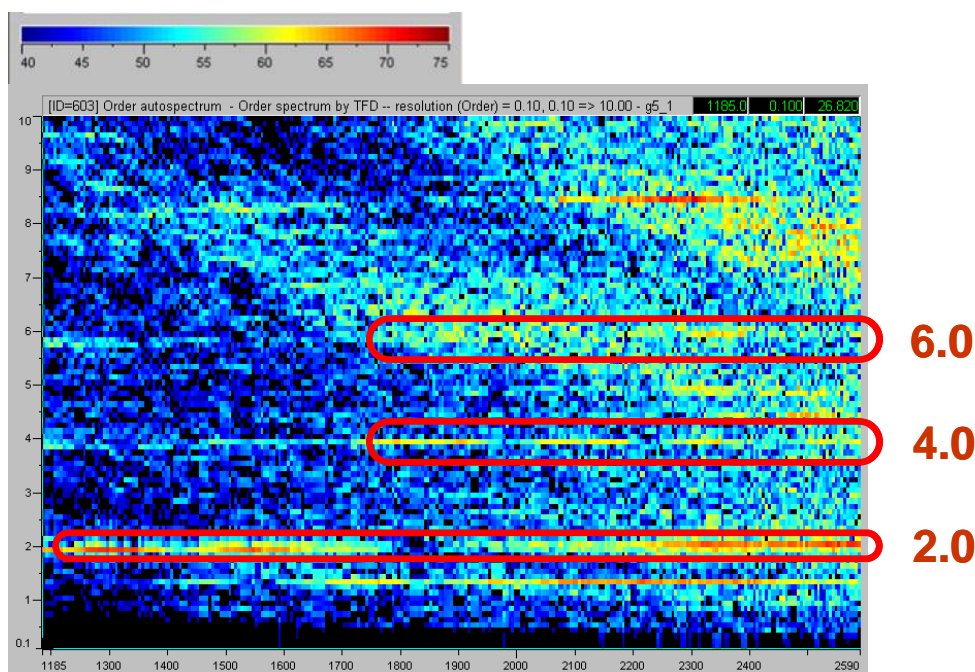


Kuva 2. Järjestelmän periaatteellinen kokoonpano.

4 MOOTTORIN TUOTTAMAT HERÄTTEET

Moottorin ääni koostuu joukosta harmoonisia kerrannaisia, jotka ovat peräisin moottorin mekaanisesta toiminnasta. Kerrannaiskomponentit ovat kokonais- tai murtolukusuhteessa moottorin pyörimistaajuuteen. Niiden suhde määrää sen miltä moottori kuulostaa.

Kuva 3 esittää tutkittavana olleen kuorma-auton moottorin tuottamaa melua 5-vaihteella ylösajossa. Melutaso on A-painotettu. Moottori on suora 4-sylinterinen diesel. Kuvasta havaitaan että 2. kerrannainen (palotajuus) on dominoiva, ja lisäksi 4. ja 6. harmooninen näkyvät selvästi. Parittomia tai puolikaskerrannaisia ei juurikaan näy, mikä on odotettavaa ja tyypillistä tälle moottorityypille [6]. Myös murtolukukerrannainen 8,4 näkyy joillain pyörimistaajuuksilla, mutta se on liian korkealla taajuudella, jotta sitä voisi tehokkaasti aktiivisesti vaimentaa. Lisäksi on näkyvissä kerrannainen 1,3, mutta se tulee esiin vain 5-vaihteella ja on siten todennäköisesti peräisin voimansiirrosta.

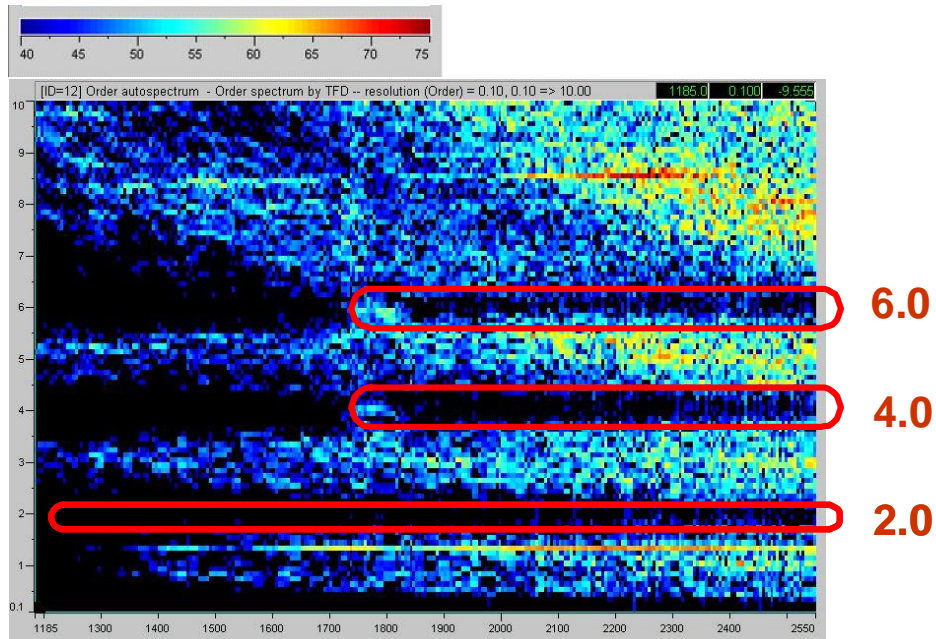


Kuva 3. Kuorma-auton moottorin tuottamat kerrannaiset eri pyörimistaajuuksilla. Pystyakselilla on kerrannaisen numero, vaaka-akselilla moottorin pyörimisnopeus ja väriskaala ilmaisee äänenpainetason.

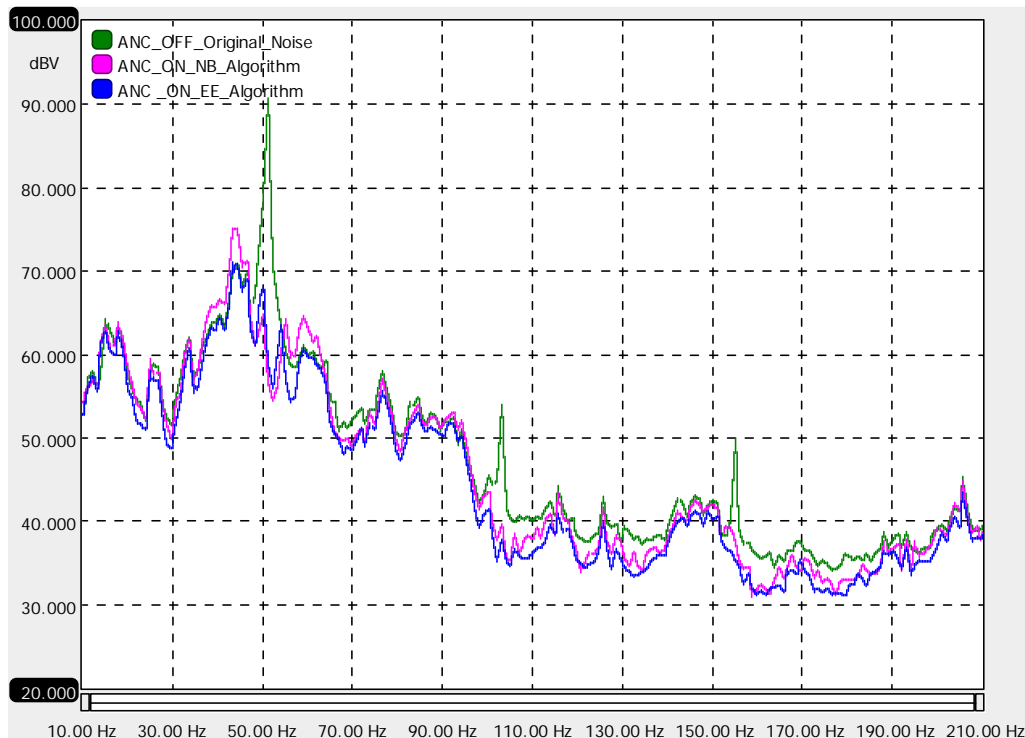
5 KERRANNAISTEN VAIMENTAMINEN

Koska kerrannaiset 2, 4 ja 6 ovat selkeimmin vaikuttamassa ääneen kuorma-auton ohjaamossa, niin niitä vaimennetaan aktiivisesti. Ensimmäiseksi vaimennuksen vaikutusta kokeiltiin VTT:n kehittämällä EOC (Engine Order Control) –työkalulla. EOC sisältää säätöjärjestelmän mallin, ja sillä voidaan muokata tallennettua melusignaalia, jos myös moottorin takosignaali on tallennettu samalla kertaa. Kuva 4 esittää tilannetta, jossa nämä kerrannaiset on vaimennettu teoriassa optimaalisella säätöjärjestelmällä. Säätöjärjestelmä pystyy painamaan kerrannaisten tason ympäröivää pohjatasoa alemmaksi. Toisaalta kokonaistaso alenee parhaimmillaan vain 4 dB, joten perinteisten meluntorjuntatoimenpiteiden korvaajaksi ei järjestelmästä ole.

Käytännön kokeilussa [21] suorituskyky on myös hyvä, ja kerrannaisia on pystytty tehokkaasti vaimentamaan. Erona teoreettiseen suorituskykyyn on se, että järjestelmä ei toimi kaikilla taajuuksilla yhtä hyvin ja saattaa myös joissain tilanteissa muuttua epästabiiliksi.



Kuva 4. EOC-työkalulla käsitelty ohjaamon melusignaali, josta havaitaan käsiteltyjen kerrannaisen pudonnon taustamelun tasolle ja jopa alemmaksi.



Kuva 5. Aktiivisen järjestelmän vaimennus käytännössä moottorin kierrosluvulla 1560 1/min. Vihreä käyrä kuvaa tilannetta ilman vaimennusta, ja violetti sekä vihreä käyrä vaimennuksia eri algoritmeja käyttäen [21].

6 YHTEENVETO

Kuorma-auton ohjaamon toteutettiin aktiivisesti ääntä vaimentava järjestelmä. Käytännön järjestelmässä pystyttiin vaimentamaan hyvin 2., 4. ja 6. moottorin kerrannaista. Vaimennus kuitenkin vaihtelee voimakkaasti eri taajuuksilla, koska ohjaamon akustiset ominaisuudet ovat taajuusriippuvia. Säätoalgoritmeja onkin kehitetty niin, että niiden toiminta olisi mahdollisimman riippumatonta ohjaamon akustisista ominaisuuksista.

Moniin käytännön seikkoihin, kuten mm. luotettavan ja tarkan moottorin pyörimisnopeustiedon saamiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Säätojärjestelmän kehittäminen onkin ollut eräs suurimmista haasteista käytännön järjestelmää toteutettaessa. Myös henkilöautoon verrattuna kuorma-auton suuremmat dimensiot tuovat uusia haasteita erityisesti pienten taajuuksien vaimentamiseen.

KIITOKSET

Tämä tutkimustyö on tehty Smart Materials Marie Curie Research Training Network EU Marie Curie –hankkeen puitteissa, toimeksiannossa Dongfeng Motor Company Ltd:lle, sekä VTT:n omarahoitteisessa ANRAC-hankeessa. Kirjoittajat kiittävät myös Smart Materials verkoston tutkijaa Guangrong Zouta merkittävästä osallistumisesta tähän paperiin liittyvään tutkimustyöhön.

LÄHTEET

- 1 NELSON P A et al., The Active Minimization of Harmonic Enclosed Sound Fields, Part I: Theory. *J. Sound and Vibration*, Vol. 117, Issue 1, 22 August 1987, 1-13.
- 2 ELLIOTT S J et al., The Active Minimization of Harmonic Enclosed Sound Fields, Part III: Experimental Verification. *J. S. & Vibration*, Vol. 117, Issue 1, 35-58.
- 3 ELLIOTT S J, et al, The Active Control of Engine Noise Inside Cars. *Internoise 1988*, Avignon, Ranska, 30.8. 1.9.1988. INCE, 987 - 990.
- 4 SANO H et al., Recent Application of Active Noise and Vibration Control to Automobiles. *Active 2002*, 15.-17.7.2002, Southampton, Englanti, 29-42.
- 5 REES L E & ELLIOTT S J, LMS-based algorithms for automobile engine sound profiling. *Internoise 2003*, 25.-28.8 2003, Seogwipo, Korea, 1026-1033.
- 6 KRONAST M, MELLIN VP & CARME C, A Sound Quality Active Noise Profiling System For a Passenger Test Vehicle. *Euronoise 2006*, 30.5.-1.6.2006 Tampere.
- 7 MELLIN VP & ANTILA M, Henkilöauton moottoriäänen muokkausjärjestelmä. *Akustiikkapäivät 2007*, 27.-28.9.2007, Espoo, 6 sivua.
- 8 OVERBEEK M, Active Control of Periodic Noise, *Doctoral Dissertation*, TNO, Delft, Alankomaat, 1993.
- 9 TAMAMURA M & SHIBATA E, Application of Active Noise Control for Engine Related Cabin Noise. *JSAE Review*, Vol. 17/1, Jan 1996, 37-43(7).
- 10 CHEN H et al., Development of a Multiple Channel Active Noise Cancellation System for Car Cabins. *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 33, Number 4/ 2003, 422 – 439.
- 11 WINKLER J et al., Implementation of an Active Noise Control System in a Van. *Proc. Active 97*, Budapest, Unkari, 1997, 595-604.
- 12 BRAVO T & COBO P, “A Demonstration of Active Noise Reduction in a Cabin Van. *Acta Acustica united with Acustica*, 2001, Vol. 88, 493 – 499.
- 13 ANTILA M & KATAJA J, Aktiivisen äänenhallinnan psykoakustinen arviointi. *Akustiikkapäivät 2005*, 26.-27.9.2005, Kuopio, 30-35.
- 14 JÄRVELÄINEN H et al.J, *Työkoneiden ohjaamomelun häiritsevyys ja sen vähentäminen*. 1998, Otaniemi (Raportti 47)
- 15 ANTILA M & OLLIKAINEN VJ, Concurrent sound and ventilation quality study in a moving machinery cabin. *BNAM 2004*, 8. – 10.6.2004, Maarianhamina, 4 sivua.
- 16 ANTILA M & KATAJA J, Active Noise Control Experiments in a Moving Machinery Cabin. *Internoise 2004*, Praha, Tsekki, 22 – 25.8., 2004. INCE. Praha (2004), 4 sivua.
- 17 CARME C, FOHR F & BESOMBES M, Active Noise Reduction in the Cabin of an Earth-Moving Machine, *Active 2002*, ISVR, Southampton, Iso-Britannia, 285 – 290.
- 18 ANDRÉN L, Active Suppression of Vibration and Noise in Industrial Applications, Part V: Active Suppression of Noise in a Fork-lift Truck Cabin, *Doctoral Dissertation Series No. 2004:06*, Lund, Ruotsi, 2004, 193 – 213.
- 19 FABER B M, *Active Minimization of Acoustic Energy Density in a Mock Tractor Cab*. Master of Science Thesis, Brigham Young University, USA, 2004.
- 20 ANTILA M, HAO Y, LANKILA A & YU J, Possibilities and Benefits of Active Noise Control (ANC) in Truck Cabins. *Internoise 2008*, Shanghai, Kiina, 26 – 29.10.2008, 2004, 6 sivua.
- 21 ZOU G, ANTILA M, et al., Equalized Algorithm for a Truck Cabin Active Noise Control System. *Akustiikkapäivät 2009*, 14.-15.5.2009, Vaasa, 6 sivua.