

ILMANVAIHDON UUSIA ÄÄNENVAIMENNINRATKAISUJA

Seppo Uosukainen

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Ilmatekniikka ja akustiikka
PL 1803, 02044 VTT
Seppo.Uosukainen@vtt.fi

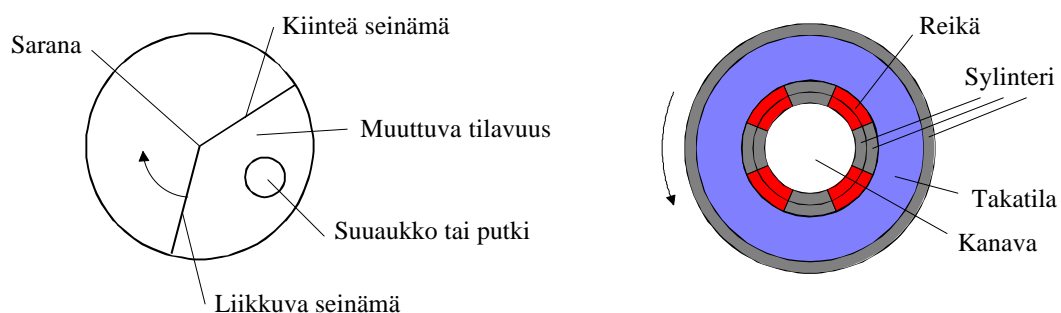
1 JOHDANTO

Absorptioon perustuviissa akustisissa vaimentimissa käytetään nykyään pääosin kuitupohjaisia materiaaleja tai vaahtomuovia. On syntynyt tarve kehittää pinnoitettuja kuitumateriaaleja sisältävien äänenvaimentimien vaihtoehdoksi kuiduttomia äänenvaimenninratkaisuja, erityisesti ympäristöissä, joissa ei saa esiintyä kuitupäästöjä ja joissa on erityisvaatimuksia hygienialle (esimerkiksi sairaalat, lääkeaineteollisuus, mikroelektroniikkateollisuus, elintarviketeollisuus), tai ympäristöissä, joissa kuitupohjaisten absorbenttien hajoaminen voi olla ongelma. Kirjallisuuden pohjautuvassa esitelmässä esitetään tältä pohjalta kehitettyjä kuiduttomia ilmastointikanavien äänenvaimennukseen soveltuvia uusia vaimenninratkaisuja rajautuen passiivisiin komponentteihin.

2 HELMHOLTZIN RESONAATTORIIN PERUSTUVAT RATKAISUT

2.1 Itse virittyvä Helmholtzin resonaattori

Koska ilman absorbentteja toteutetun Helmholtzin resonaattorin vaimennuskaista on tyypillisesti melko kapea, se ei sellaisenaan sovellu tilanteeseen, missä vaimennettavan melun taajuus sisältö tai ympäristöolosuhteet vaihtelevat merkittävästi. Tähän on ratkaisuna itse virittyvä (self-tuning, auto-tuning) Helmholtzin resonaattori, jonka resonanssitaajuutta muutetaan adaptiivis-passiivisesti (adaptive-passive) joko resonaattorin tilavuutta tai suuaukkojen pinta-alaa muuttamalla [1]. Kuvassa 1 on esitetty ratkaisu kummastakin periaatteesta. Itse virittyvällä Helmholtzin resonaattorilla resonanssitaajuutta voidaan tyypillisesti säätää puolentoista – kolmen oktaavin puitteissa ja melun lisäysvaimennus (*IL*, Insertion Loss) on tyypillisesti 10...30 dB. Säädettävällä reiällä saadaan parempi suorituskyky [1].



Kuva 1. Itse virittyvän sylinterimäisen Helmholtzin resonaattorin muuttuvan tilavuuden toteutus liikkuvalla väliseinämällä (vasen) ja muuttuvan reikäpinta-alan toteutus (oikea). Jälkimmäisessä uloin sylinteri on lukittu keskimmäiseen ja sisin on vakioasennossa, jolloin uloimman sylinterikuoren kiertäminen muuttaa reiän pinta-alaa. Sininen osa = akustinen tilavuuselementti, akustinen kapasitanssi (ilmajousi), punaiset osat = liikkuvan ilman muodostama massaelementti rei'issä. Samaa värikoodia käytetään muissakin kuvissa.

2.2 Mikroreikäresonaattori

Maa [2, 3] on alkujaan esittänyt mikroreikäresonaattorin akustisen toiminnan ja mitoituksen peruseriaatteet. Kirjallisuudesta löytyy nykyään lukuisia aiheeseen liittyviä artikkeleita.

Helmholtzin resonaattorin suuauko(i)ssa syntyy myös akustisia häviöitä ilman viskositeetin takia. Näitä voidaan huomattavasti lisätä pienentämällä aukkojen halkaisijaa alle 1 mm:n suuruusluokkaan, jolloin reiän dimensiot ovat samaa suuruusluokkaa viskoottisen rajakerroksen paksuuden kanssa. Tällöin puhutaan mikroreikäresonaattorista. Reikien tilalla voi olla myös kapeita rakoja. Tyypillinen reikä-pinta-alasuhte on noin 0.4...2 %. Akustisten häviöiden optimimitoituksella reikien akustinen resistanssi on lähellä ilman karakteristista impedanssia. Laaja-kaistaisen toiminnan aikaansaamiseksi rei'issä liikkuvan ilman massa tulisi saada kohtuullisen pieneksi, mikä mikrorei'illä toteutuu automaattisesti. Reikälevy voidaan toteuttaa myös rei'iteytyllä kalvolla tai karkealla kudoksella, esimerkiksi lasikuitukankaalla.

Mikroreikäresonaattorilla voidaan toteuttaa optimaaliset akustiset häviöt parin oktaavin kais-talla ilman takatilan absorbenttejä. Lisäksi mikroreikäresonaattorilla on se etu tavanomaiseen Helmholtzin resonaattoriin nähden, että virtaus ilmastointikanavassa ei synnytä pienissä rei'issä ääntä siinä määrin kuin suuremmissa. Toiminnallinen taajuusalue voi olla jopa 3...4 oktaavia. Absorptiokerroin maksimi viritystaajuudella on luokkaa 0.8...1 ja lisäysvaimennus (*IL*) tyypillisesti 20...25 dB. Resonaattorin resonanssitaajuuden viritys tapahtuu levypaksuuden, reikien halkaisijan ja lukumäärän sekä takatilan tilavuuden mitoituksella. Mikroreikälevyjä voi olla useita päällekkäin eri reikäkoilla, jolloin resonaattorille saadaan useampi resonanssitaajuus ja sen toiminnallinen taajuusalue saadaan suuremmaksi, ollen kahden reikälevyn rakenteella jopa 4...5 oktaavia. Viritystaajuudet vaihtelevat välillä 30...1000 Hz. Käytetyllä levymateriaalilla ei ole paljoa vaikutusta resonaattorin toimintaan. Muun muassa metallilevyjä, akryylilasilevyjä, muovikalvoja, pahvilevyjä ja vanerilevyjä on käytetty. Reiät voidaan tehdä poraamalla tai meistä-mällä (metallit, lasimateriaalit), laserilla (lasimateriaalit), lävistämällä kuumilla neuloilla (muovikalvot) tai kutomalla (lasikuitukankaat).

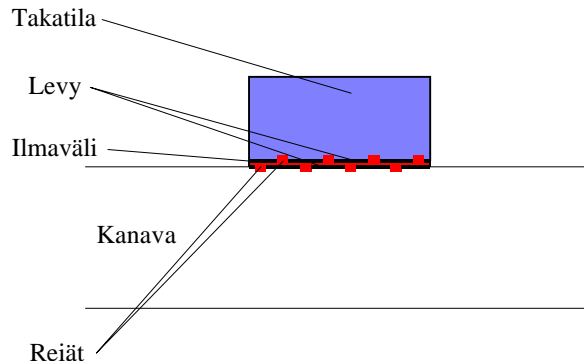
2.3 Huokoisella levyllä varustettu Helmholtzin resonaattori

Huokoisten levyjen [4] absorptio-ominaisuudet perustuvat akustisesti mikroreikien tavoin käytäytyvien huokosten lisäksi levyjen värähtelyresonansseihin. Tyypillisiä arvoja huokoisille le- vyille: huokosten halkaisija 0.4 mm, huokoisuusaste 60 %. Ohuilla, kevyillä huokoisilla levyillä varustetulla Helmholtzin resonaattorilla voidaan aikaansaada suuri absorptiokerroin jopa pienil- lä taajuuksilla (0.3...0.5 alle 100 Hz:n taajuuksilla, suuremmilla taajuuksilla jopa yli 0.9). Toi- mintataajuuksien viritys tapahtuu huokosten koon, huokoisuuden, levyn tiheyden ja paksuuden sekä takatilan syvyyden mitoituksella.

2.4 Kaksilevyinen Helmholtz-resonaattori

Kaksilevyisessä Helmholtz-resonaattorissa [5] on kaksi päällekkäistä reikälevyä, joiden reiät (tai raot) eivät ole keskenään kohdakkain. Levyjen välinen kapea alle 1 mm ilmatila toimii mik- roreikien tavoin tuottaen ilman viskositeetin takia akustisen resistanssin, jolla voidaan toteuttaa optimaaliset akustiset häviöt. Toinen levyistä voidaan tehdä myös lyhyemmäksi kuin toinen, jolloin ensiksi mainittua voidaan liikuttaa ja levyjen reikien suhteellista sijaintia voidaan muut- ta. Järjestelmällä pääsee samansuuruisiin absorptio-ominaisuuksiin kuin mikroreikäresonaatto- reilla. Viritystaajuudella (tyypillisesti 200...700 Hz) saadaan noin 0.6...1 absorptiokerroin. Op-

timitaajuuksien ja vaimennuksen viritys tapahtuu reikien tai rakojen dimensioiden, määrän ja suhteellisen sijainnin, ilmavälin syvyyden ja levyjen paksuuden sekä takatilan syvyyden avulla. Kuvassa 2 on esitetty resonaattorin rakenneperiaate.



Kuva 2. Kaksilevyinen Helmholtz-resonaattori.

3 KALVORESONAATTORIT

Kalvoresonaattori on rakenteeltaan ja toimintatavaltaan kuten levyresonaattori sillä erotuksella, että levyelementti on korvattu joustavalla kalvolla (esim. muovi). Kalvon mahdollinen esikiristys jäykistää rakennetta ja esikiristyksen ollessa riittävä takatilan ilmajousi ei vaikuta järjestelmän ominaisuuksiin, jolloin kalvon omat ominaismuodot ja niihin liittyvät ominaistajuuudet toimivat levyresonaattorin kaltaisesti. Pienemmällä esikiristyksillä kalvon ominaismuodot vaikuttavat edelleen, mutta takatilan tilavuuden jäykistävä vaikutus nostaa niiden ominaistajuuksia. Usein takatilan vaikutus halutaan eliminoida, mikä onnistuu riittävää esikiristystä tai riittävän syvää takatilaa käyttäen. Vaimennuskaistat ovat tyypillisesti kapeita. Absorbenttien lisäämisellä vaimennus saadaan taajuuden funktiona tasaisemmaksi ja myös takatilan vaikutusta saadaan sillä vähennettyä. Kalvon ominaistajuuksien viritys tapahtuu kalvon massan ja esikiristyksen sekä takatilan tilavuuden mitoituksella.

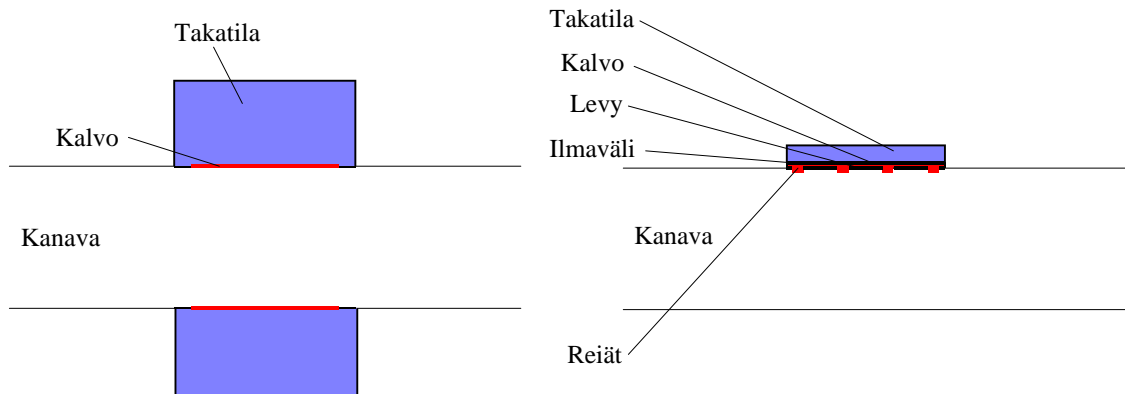
3.1 Rumpuvaimennin

Kalvoresonaattorin tehokkaimmin ääntä vaimentavat kalvon ominaismuodot ovat kaksi alinta. Rumpuvaimennin (Drum Silencer) [6] on kaksiosainen kalvoresonaattori, jonka kalvot on esikiristetty voimakkaasti toiminnallisen taajuusalueen – kahden alimman ominaismuodon ominaistajuuuden – saamiseksi suuremmille taajuuksille ja ko. ominaismuotojen vaimennuskyvyn tehostamiseksi. Äänenvaimennin toimii äänen heijastusperiaatteella enemmän kuin absorptioperiaatteella. Toteutusperiaate on esitetty kuvassa 3. Kalvorakenteena käytetään metallikalvoja. Takatilan syvyyttä voidaan pienentää tai pienten taajuuskomponenttien vaimennusta voidaan tehostaa käyttämällä takatilassa ilmaa kevyempää kaasua, esimerkiksi heliumia, jolloin takatila on tehtävä kaasutiiviiksi esim. muovikalvon avulla. Resonaattorikalvon kiinnityksen reunahäviöt sekä tiivistekalvon sisäiset ja hankaushäviöt lisäävät akustisia häviöitä. Tyypillinen saavutettava läpäisyvaimennus (TL) ominaistajuuksilla on noin 20...40 dB. Toiminnallinen taajuuskaista on noin 1.6...2.5 oktaavia.

3.2 Rei'itetty levy ja kalvo

Samalla tavoin kuin mikroreikäresonaattorilla, akustisia häviöitä saadaan aikaiseksi rakenteella, jossa rei'itetyn levyn takana huomattavasti alle 1 mm:n etäisyydellä on ohut kalvo ja kalvon

takatila on syvyydeltään alle 1 mm [7]. Häviöt tässä rakenteessa perustuvat ilman viskoottisiin häviöihin levyn ja kalvon välissä ja takatilassa. Häviöt ovat sitä suuremmat, mitä enemmän äänen tulosuunta poikkeaa normaalista levyn pintaan nähden. Tyypillinen savutettava absorptiokerroin on 0.6...0.9 viritystaajuudella (tyypillisesti 300...1500 Hz). Järjestelmän toiminnallinen taajuusalue viritetään kalvon massalla ja esikiristyksellä, kalvon takatilan syvyydellä sekä pintalevyn reiätysasteella. Kuvassa 3 on esitetty järjestelmän periaatteellinen rakenne.



Kuva 3. Kalvoresonaattoreita: rumpuvaimennin (vasen) ja rei'itetty levy ja kalvo -rakenne (oikea).

3.3 Laajakaistainen reaktiivinen vaimennin

Helmholtzin resonaattorit, levyresonaattorit ja kalvoresonaattorit ovat tyypillisesti kapeakaistaisia äänenvaimentimia. Tämä johtuu pääasiassa ko. äänenvaimentimien massan ja jäykkyyden suurista arvoista. Laajakaistainen reaktiivinen vaimennin (Broadband Reactive Muffler) [8] on kalvoresonaattori, jossa kalvon esikiristuksen ja taivutusjäykkyyden sekä takatilan ilmajousen tuottamaa jäykkyyttä vähennetään rakenteessa toteutetulla negatiivisella jäykkyydellä ja kalvon massan ja väliaineen aiheuttaman massakuormituksen inertiaa vähennetään rakenteessa toteutetulla negatiivisella inertialla, jolloin äänenvaimentimen toiminnallinen taajuusalue saadaan suuremmaksi. Negatiivinen jäykkyys toteutetaan käyttämällä ferromagneettista kalvoa ja takatilan pohjana kestomagneettia. Kalvo ja magneetti vetävät toisiaan puoleensa ja sitä enemmän, mitä lähempänä ne ovat toisiaan, mikä ilmenee negatiivisena jäykkyytenä. Negatiivinen inertia toteutetaan kanavaseinille symmetrisesti pareittain asetetuilla kalvoelementeillä, jolla rakenteella kanavan parittomien aaltomuotojen vaikutus inertiakuormitukseen häviää ja alimman aaltomuodon (tasoaalto) negatiivinen inertiakuormitus korostuu. Pareittain asetettuja kalvoelementtikombinaatioita on kaksi. Äänenvaimentimen toiminnallinen taajuusalue ulottuu melkein nollataajuudesta ensimmäisen poikittaisen aaltomuodon rajataajuudelle. Saatava läpäisyvaimennus (TL) on luokkaa 14...30 dB.

4 JOUSTAVA PANEELI

Osa kanavaseinästä voidaan korvata joustavalla paneelilla [9]. Seinämän impedanssimuutos saa aikaan ääniheijastuksen paneelin kummassakin liitoskohdassa kanavaseinämään, paneeliin syntyy etenevä taivutusaalto ja paneelin sisäinen vaimennus kuluttaa syntyneen taivutusaallon energiaa enemmän kuin akustisen aallon energia vähenee ilmassa edetessään. Kun paneeli on hyvin joustava, akustista energiaa siirtyy paneelin taivutusaallon energiaksi enemmän kuin paneelin värähtely tuottaa ääntä. Paneeli on viskoelastista materiaalia, tyypillisesti kumia, riittävän sisäisen vaimennuksen aikaansaamiseksi.

Saatava äänenvaimennus on suurempi, mikäli taivutusvärähtelyn etenemisnopeus paneelin ylävirran puoleisessa päässä on lähellä äänen nopeutta ilmassa (hiukan alle) ja mikäli taivutusaallon etenemisnopeus vähenee asteittain toista päätä kohti. Tällöin ääni saadaan kytkeytymään hyvin taivutusvärähtelyksi paneelin ylävirran puoleisessa päässä ja loppuosa paneelia vaimentaa taivutusvärähtelyä tehokkaasti, mikäli paneelimateriaalilla on riittävän suuri häviökerroin. Tällöin paneeli ei juuri heijasta ääntä vaan ainoastaan absorboi sitä. Haluttu taivutusaallon nopeusprofiili saadaan aikaan esijännitetyllä kalvolla, jonka paksuus kasvaa alavirran suuntaan. Jos esitetynkaltaisella muuttuvapaksuisella paneelilla häviökerroin on vastaavasti pieni, absorptio on vähäistä, mutta rakenne heijastaa ääntä takaisin tehokkaasti koko pituudeltaan, eikä vain sen liitoskohdista kanavaseinämään, jolloin saadaan myös suuri läpäisyvaimennus.

Joustava paneeli ei ole resonanssityyppinen, joten se tuottaa luonnostaan laajakaistaisen äänenvaimennuksen, jossa läpäisyvaimennus (*TL*) on tyypillisesti 15...25 dB. Muuttuvapaksuisella paneelilla läpäisyvaimennus on tyypillisesti 25...55 dB. Paneeli vaimentaa kaikkia taajuuskomponentteja, joilla taivutusaallon etenemisnopeus on äänen nopeutta pienempi.

5 ALFA-TUOTTEET

Kuiduttomien absorptiotuotteiden kehityksen etujoukoissa on erityisesti Fraunhofer Institute of Building Physics (IBP), joka Kiinalaisen Tiedeakatemian (Chinese Academy of Science) ja teollisuuden kanssa on kehittänyt joukon erilaisia sekä passiivisia että aktiivisia äänenvaimennustuotteita, ns. Alfa-tuotteita (**A**lternative **F**iber-free **A**bsorbers) ilmastointikanaviin ja muihin sovelluskohteisiin asennettaviksi [10, 11]. Passiivisten ilmastointikanavaan tarkoitettujen Alfa-tuotteiden akustinen toiminta perustuu osin ilman viskoottisiin voimiin, jotka aiheuttavat äänikentän vaimentumista kapeissa ilmapäleissä sekä pienissä rei'issä ja raoissa ilman perinteisiä absorptiomateriaaleja [10]. Äänenvaimentimet voi tehdä mistä tahansa materiaalista, koska rakenteissa käytettävien kalvojen ja levyjen sekä muiden osarakenteiden materiaalivakiot sinällään vaikuttavat hyvin vähän vaimentimien akustiseen toimintaan. Tyypillisesti äänenvaimentimet ovat kevytrakenteisia, helposti puhdistettavia ja ne tuottavat pienen painehäviön.

MA(B) (Membrane Absorber (Box)) -vaimennin eli kalvoabsorbentti(laatikko) on kalvoabsorbenttitoimintaa hyväksikäyttävä Helmholtzin resonaattori, jossa sen laatikkoversiolla saadaan lisäksi aikaan viskoottisia häviöitä pinta- ja reikäkalvon välisessä ilmapäleissä. ASS (Angular Stack Silencer) eli särmiövaimennin on pitkiin putkiin ja pienten taajuuksien vaimentamiseen tarkoitettu levyresonaattorin kaltainen rakenne, jossa monikulmasärmiöksi muotoiltu teräslevy asennetaan poikkileikkaukseltaan pyöreän putken sisäpinnalle. CRS (Cleanable Reactive Silencer) on Helmholtzin resonaattori koostuen putkessa olevista rei'istä ja putken ympärille asetusta teräsrakenteisesta säiliöstä. Kaksi ensiksi mainittua ovat hermeettisesti suljettuja rakenteita.

6 YHTEENVETO

Edellä on esitetty kuiduttomia ilmanvaihtoon soveltuvia äänenvaimenninratkaisuja, jotka on tyypillisesti toteutettu ohuin metallikalvorakentein. Monille näistä on yhteistä, että niiden akustinen toiminta perustuu osin ilman viskoottisiin voimiin, jotka aiheuttavat äänikentän vaimentumista kapeissa ilmapäleissä sekä pienissä rei'issä ja raoissa ilman perinteisiä absorptiomateriaaleja. Uusien ratkaisujen erityispiirteenä on tyypillisesti hyvä suorituskyky pienillä taajuuksilla, mikä esimerkiksi puhallinmelun vaimentamisen kannalta on hyödyllistä. Uusista ratkaisuista erityisesti hermeettisesti suljetut ratkaisut puoltavat paikkaansa ilmanvaihtosovelluksissa niiden

puhdistettavuuden ja vähäisen likaantumisherkkyyden takia. Berhaultin [12] mukaan uusien materiaalien ja ratkaisujen rajoitettu tuotanto sekä puute niiden kokemuksista rajoittavat niiden soveltamista toistaiseksi vain erityisiin ja kalleimpiin sovelluksiin, mutta kuluvan vuosikymmenen ne tullevat olemaan merkittävimmissä asemassa meluntorjuntaratkaisuissa.

KIITOKSET JA JATKONÄKYMIÄ

Tämä tutkimus liittyy hankekokonaisuuden "Ilmanvaihdon modernit parannus- ja kunnostusratkaisut" (MIV, 2003 – 2005) konseptiin "Äänilähteiden paikallistaminen ja äänihaitan poistaminen". Hanketta toteuttavat Teknillisen korkeakoulun LVI-laboratorio, Kuopion yliopiston Ympäristötieteiden laitos sekä VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, ja sen rahoittajia ovat Tekes, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka sekä hankkeeseen osallistuvat yritykset. Tässä esitetyn aineiston pohjalta VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa on käynnistetty passiivisten uusien tuotteiden kehityshankkeita sekä ilmastointikanavasovellusten että muiden absorptiosovellusten osalta, joista jälkimmäisistä tuloksena on esim. viite [13].

LÄHTEET

1. SATO S & MATSUHISA H, Semi-active noise control by a resonator with variable parameters. *Inter-Noise 90*, 13–15.8.1990, Gothenburg, 1305–1308.
2. MAA D-Y, Direct and accurate impedance measurement of microperforated panel. *Inter-Noise 83*, 13–15.7.1983, Edinburgh, 363–366.
3. MAA D-Y, Microperforated-panel wideband absorbers. *Noise Control Eng J* **29**(1987)3, 77–84.
4. HOROSHENKOV K V & SAKAGAMI K, A method to calculate the acoustic response of a thin, baffled, simply supported poroelastic plate. *J Acoust Soc Am* **110**(2001)2, 904–917.
5. RANDEBERG R T, A Helmholtz resonator with lateral elongated orifice. *Acustica united with Acta Acustica* **86**(2000)1, 77–82.
6. CHOY Y S & HUANG L, Experimental studies of a drumlike silencer. *J Acoust Soc Am* **112**(2002)5, 2026–2035.
7. NILSSON A C & RASMUSSEN B, Sound absorption properties of a perforated plate and membrane construction. *Acustica* **57**(1985), 139–148.
8. HUANG L, A theory of reactive control of low-frequency duct noise. *J Sound Vib* **238**(2000)4, 575–594.
9. HUANG L, A theoretical study of duct noise control by flexible panels. *J Acoust Soc Am* **106**(1999)4, 1801–1809.
10. FUCHS H V & ZHA X, Transparent alternative sound absorbers for the plenum of the Bundestag. *Noise & Vibration Bulletin* (1995) January, p. 6.
11. <http://www.pia-alfa.de>.
12. BERHAULT J-P, Noise control materials – issues, global situation and trends. *Eurnoise 2001*, 14–17.1.2001, Patras, 556–559.
13. SIPONEN D, *Laajakaista-absorbentti*. Diplomityö, TKK, Espoo 2005.