

# Aktivno dušenje hrupa s sistemom Silentium S-Cube

Jurij Munda<sup>1</sup>, Damjan Zazula<sup>1</sup>, Nikola Holeček<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UM FERl, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

<sup>2</sup>Gorenje d.d., Partizanska 12, 3320 Velenje, Slovenija

E-pošta: jurij.munda@uni-mb.si

## Active Noise Control Using Silentium's S-Cube

*Active noise control (ANC) is a technique that listens to a noise source and generates counter sound waves to stop further spatial spreading of the noise. S-Cube is one of commercially available systems that combine a referential and an error microphone with a loudspeaker. Its development environment S-ANC Tools supports the system calibration, which is based on measuring the transfer paths between the loudspeaker and the microphones. The calibration procedure builds up a prediction model which executes ANC by a signal processor on the S-Cube board.*

*We experimented with this system to find out about its efficiency in a rather low frequency band (100 – 1100 Hz). An experimental setup was used to generate a range of frequencies, whereas one of them was involved in the calibration phase and the ANC efficiency was tested with the others. Our results confirm that ANC works well in narrow frequency bands around the calibration one. By using a digital sound level meter, we also demonstrated that the noise suppression is limited to a smaller spatial volume around the error microphone.*

*Nevertheless, ANC levels mainly exceed 2-3 dBA, which is considered encouraging for experiments with ANC in household appliances.*

## 1 Uvod

Živimo v času, ko postaja onesnaženost bivalnega okolja s hrupom vedno bolj pereč problem. Omejevanje zvočne emisije je med pomembnejšimi postavkami pri izboljševanju kakovosti aparatov in naprav za dom. Uvedba smernic evropskega združenja 92/75/EWG, ki predpisuje deklariranje emisijske ravni hrupa pri gospodinskih aparatih in informiranje potrošnikov o ravni zvočne emisije z ustrezno nalepko, je usmerila razvojna prizadevanja za tiho delovanje naprav. Izkušnje potrjujejo, da je mogoče uspešno dušiti zvok, če upoštevamo temeljne fizikalne mehanizme, ki sodelujejo pri nastanku in prenosu zvoka.

Če želimo znižati raven hrupa, moramo najprej identificirati vir, ki generira dominantno zvočno komponento, torej primarni vir hrupa. Zvok se od primarnega vira prenaša v okolje z vzburjanjem [1]. Vzburjanje je mehanizem, ki proizvaja vibracije. V električnem motorju, na primer, je vibracija posledica neuravnoteženega rotorja ali karbonskih krtačk, ki

zadevajo segmente komutatorja. Vibracije vira vplivajo na druge dele aparata mehanske strukture in se tako posredno akustično razširijo tudi izven aparata. Vibracije tvorijo zunaj aparata zvočne valove, ki potujejo po zraku [2, 3].

V praksi poznamo tri različne metode za nadzor zvočne emisije. Osnovno je dušenje neposredno pri aktivnem primarnem viru zvoka v napravi. Dušenje na poti širjenja z dodajanjem različnih disipativnih materialov pomeni sekundarni način, ki je pasiven. Če pa hrup dušimo z dovajanje kompenzacijske energije, govorimo o aktivnem nadzoru hrupa (*active noise control*, ANC). Metodo lahko uporabimo pri kontinuiranih in diskretnih virih zvočnega valovanja v nizkofrekvenčnem območju. Temelji na destruktivni superpoziciji primarnega zvočnega valovanja, ki povzroča hrup, in kompenzacijskega zvočnega valovanja, ki ga oddaja zvočnik in katerega frekvence se amplitudno ujemajo s frekvenčnim spektrom hrupa, vendar nihajo protifazno. S tem dosežemo interferenčno slabljenje [4].

Sistem za aktivno dušenje hrupa (ADH), imenovan S-Cube, je bil doslej uporabljen v posebnih strežniških omarah (ASE), nekaterih računalnikih (Cray PC) in pri vzglavnikih za letalske sedeže [5]. Njegovo uspešnost smo želeli sami preveriti s poskusi, pri katerih smo se osredotočili na nižjefrekvenčne motnje, ki jih ni lahko dušiti s pasivnimi sredstvi, torej z zvočno izolacijskimi materiali. V poglavju 2 opisujemo zasnovo sistema za aktivno dušenje hrupa, v poglavju 3 razložimo, kako smo se lotili poskusov, poglavji 4 in 5 pa prinašata rezultate in razpravo o njih.

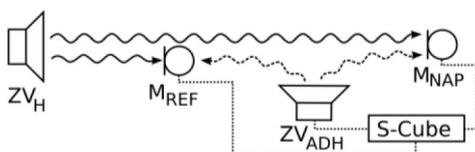
## 2 Zasnova sistema S-Cube

S-Cube (Silentium, Ltd., Izrael) je sistem za aktivno dušenje hrupa. Zasnovan je s signalnim procesorjem, ki je povezan s krmilniki za priklop zvočnikov in mikrofonov. Signalni procesor izvaja programske algoritme, ki aktivno dušijo hrup s predikcijsko povezavo (*feedforward*) in modeliranjem [6].

Sistem S-Cube prilagodimo za uporabo v različnih okoljih tako, da ga vnaprej umerimo. Umerjanje opravimo s programsko aplikacijo, tj. v razvojnem okolju, imenovanem S-Cube Development Kit.

Razvojno okolje je sestavljeno iz dveh osnovnih programov, ki tečeta na osebnih računalnikih. To sta Monitor in S-ANC Tool. Program Monitor se poveže z vezjem S-Cube, iz njega prenese zajete signale ter vanj naloži program za signalni procesor. Program S-ANC

Tool je namenjen za analizo posnetih signalov ter izračun filtra za dušenje hrupa s signalnim procesorjem. Za ta izračun uporablja matlabove funkcije, zato moramo na osebni računalnik namestiti tudi matlabov prevajalnik-izvajalnik (Matlab Compiler Runtime). Programa Monitor in S-ANC Tool med seboj komunicirata s pomočjo zbirke. Monitor ima štiri osnovne funkcije: zajem signalov za umerjanje sistema, testiranje zvočnika za ADH, testiranje filtra za dušenje hrupa in vklop oz. izklop dušenja hrupa. Slednje je uporabno, ko sistem deluje samostojno v končnem izdelku. Program S-ANC Tool ima tri osnovne funkcije: umerjanje sistema, izračun in simulacija filtra za dušenje hrupa ter ovrednotenje filtrovega dušenja (ob pomoči programa Monitor in njegove funkcije za testiranje filtra).



Slika 1: Postavitev elementov v sistemu S-Cube za aktivno dušenje hrupa

Na sliki 1 so prikazane glavne komponente sistema: izvor hrupa ( $ZV_H$ ), zvočnik za aktivno dušenje hrupa ( $ZV_{ADH}$ ), referenčni mikrofoni ( $M_{REF}$ ), mikrofoni za merjenje nezadušenega ostanka hrupa – napake ( $M_{NAP}$ ) in krmilno vezje (S-Cube). Pri umerjanju sistema je treba izmeriti prenosne karakteristike med zvočnikom  $ZV_{ADH}$  ter mikrofonom  $M_{REF}$  in  $M_{NAP}$ . Program S-ANC Tool nato izračuna model, ki vsebuje predikcijsko funkcijo PF (*prediction function*) [7]. Ta je osnova za delovanje sistema za aktivno dušenje hrupa.

## 2.1 Postopek umerjanja

Proizvajalec sistema za delovanje ne predpisuje uporabe specifičnih mikrofонов in zvočnikov, zato je treba sistem pred uporabo umeriti. Pri tem se optimizirajo ravni ojačenja za posamezne analogne komponente. Nastaviti moramo štiri parametre: ojačenje pretvornikov A/D za  $M_{REF}$  in  $M_{NAP}$  (ravni 0–7), ojačenje pretvornika D/A za  $ZV_{ADH}$  (ravni 0–7) in ojačenje ojačevalnika za  $ZV_{ADH}$  (ravni 0–3).

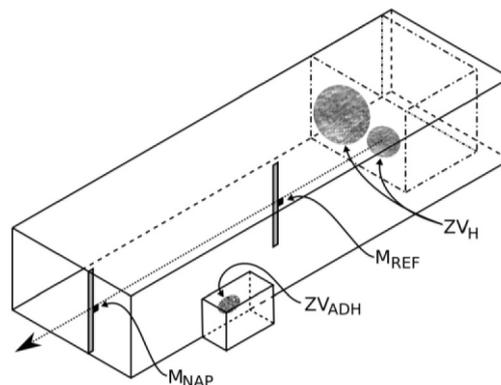
Umerjanje izvedemo v treh korakih. Najprej ugotovimo vpliv izvornega hrupa ( $ZV_H$ ) na referenčni mikrofoni ( $M_{REF}$ ) in mikrofoni za napako ( $M_{NAP}$ ). Tako dobimo prenosno funkcijo MTF (*microphone transfer function*). V naslednjih dveh korakih je izvor hrupa izklopljen, vključi pa se zvočnik za aktivno dušenje hrupa ( $ZV_{ADH}$ ), ki tekom umerjanja predvaja beli šum. V drugem koraku se posname vpliv  $ZV_{ADH}$  na  $M_{NAP}$  in to funkcijo imenujejo STF (*speaker transfer function*). V tretjem se posname vpliv  $ZV_{ADH}$  na  $M_{REF}$  in dobljeno prenosno funkcijo imenujemo EC (*echo cancellation*). Raven ojačenja pri referenčnem mikrofoni moramo nastaviti tako, da je med prvim korakom umerjanja amplituda hrupa na  $M_{REF}$  med 0,15 in 0,25 glede na

skalo, ki jo določa uporabniški vmesnik za S-ANC Tool. Ravni ojačenja za  $ZV_{ADH}$  in  $M_{NAP}$  nastavimo tako, da v drugem in tretjem koraku amplituda na  $M_{NAP}$  ne preseže vrednosti 0,99.

## 3 Eksperimentalno okolje in protokol

Da bi preverili učinkovitost sistema S-Cube, smo si postavili eksperimentalno okolje (slika 2), pri katerem smo se zgledovali po referenčnih rešitvah iz uporabniške dokumentacije [5].

Sistem je prvenstveno namenjen za dušenje hrupov s frekvencami med 200 in 1000 Hz. Njegova učinkovitost je zadovoljiva le, če so vse komponente vgrajene v dušnik (*muffle*), s katerim omejimo zvočno valovanje zgolj na vzdolžno.  $M_{REF}$  se ne sme nahajati v bližnjem polju izvornega hrupa, tako da pri najnižji frekvenci 200 Hz in temperaturi zraka 25 °C potrebujemo vsaj 43 cm razdalje. Zaradi zakasnitev v sistemu za aktivno dušenje mora biti razdalja med  $M_{REF}$  in  $ZV_{ADH}$  čim večja. Tipična zakasnitev zvočnikov in signalnega procesorja je za frekvence med 200 in 1000 Hz pod 0,4 ms, kar pomeni, da mora biti med  $M_{REF}$  in  $ZV_{ADH}$  vsaj 14 cm.



Slika 2: Eksperimentalno okolje

Dušnik za naše poskuse je narejen iz valovite lepenke, dolg je 155 cm in je na zadnji strani zaprt. Izvor hrupa smo emulirali z zvočniškim sistemom Yamaha Studio Monitor HS8, ki smo ga vgradili v notranjost dušnika. Zvočniki imajo v opazovanem frekvenčnem intervalu linearno reprodukcijo zvokov [8].

Zvočnik za aktivno dušenje ( $ZV_{ADH}$ ) smo morali vgraditi v ločeno ohišje, saj je sicer nanj kvarno vplival zvočni tlak iz izvora hrupa. Pri izdelavi ohišja smo se poskušali držati navodil iz uporabniške dokumentacije in spletnih virov [9]. Ohišje je izdelali iz iverne plošče debeline 18 mm, notranjost ohišja je v celoti zapolnjena s peno. Ohišje smo tudi dobro zatesnili. Empirično smo tudi dognali, da moramo za uspešno dušenje v izbranem frekvenčnem območju oba mikrofona poravnati z visokotonskim zvočnikom v emuliranem izvoru hrupa. To smo naredili tako, da smo mikrofona dvignili na tanke lamele-podstavke in slednje pritrdili na ustrezno mesto v dušniku.

Ker uporabljeni mikrofoni in zvočniki v sistemu nimajo linearnih karakteristik, meritve pa so morale biti

čim bolj enostavne in primerljive, smo se odločili, da ne bomo sistema umerjali za vsako novo frekvenčno vsebino hrupa, temveč smo opravili začetno umeritev sistema tako, da smo vsa ojačenja nastavili na srednje ravni. Nato smo za vsako izmed opazovanih frekvenc spreminjali jakost hrupa, tako da smo za izvorni hrup na zvočniku  $ZV_H$  računalniško nastavljali ojačenje v ravneh med 0 in 50. Pri tem smo želeli zadostiti naslednjim pogojem: amplituda na  $M_{REF}$  je morala biti čim bližje nivoju 0,25, sistem je moral biti stabilen in S-ANC Tool je moral biti sposoben izračunati veljaven filter. Opazili smo namreč, da je program S-ANC Tool v primeru, ko je bila izračunana amplituda za  $ZV_{ADH}$  večja kot 0,5 ali izračunana amplituda za PF večja kot 1, javil, da filter ni veljaven. Te primere smo rešili tako, da smo znižali jakost hrupa. Naš pogoj za stabilnost je zahteval, da v primeru, ko izvor hrupa ne deluje, sistem za dušenje hrupa ne sme aktivirati zvočnika  $ZV_{ADH}$ .

Protokol za ugotavljanje učinkovitosti aktivnega dušenja hrupa je bil naslednji: najprej smo sistem umerili na izbrano frekvenco, nato smo merili dušenje pri drugih frekvencah. Opazovali smo sinusna nihanja v razponu med 100 in 1100 Hz. Za ta razpon smo se odločili, ker nas je zanimalo, kako se sistem obnaša izven meja svojega privzetega delovanja med 200 in 1000 Hz. Frekvenca 100 Hz nas je zanimala tudi zato, ker je pri njej prišel mikrofoni  $M_{REF}$  v bližnje zvočno polje izvora hrupa, kar se po navodilih proizvajalca sistema ne bi smelo zgoditi.

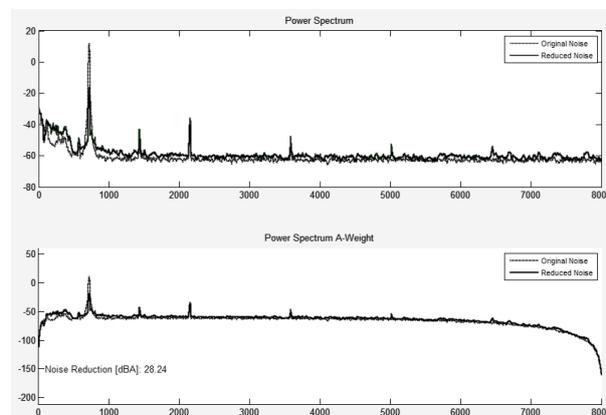
#### 4 Rezultati dušenja

Eksperimentalno smo določili ravni, s katerimi smo uravnavali jakost izvornega hrupa tako, da so bile pri vsakem poskusu zagotovljene enakovredne razmere, ne da bi sistem ponovno umerjali. Vrednosti so navedene v drugem stolpcu v tabeli 1. V naslednjih dveh stolpcih smo podali absolutni amplitudni ravni, izmerjeni na mikrofoni  $M_{REF}$  in  $M_{NAP}$ . V petem in šestem stolpcu so zbrane jakosti hrupa, izmerjene z ročnim merilnikom glasnosti CEL-240 (Casella, ZDA) v točki  $M_{NAP}$ , ko je bil sistem aktivnega dušenja vključen. Izmerili smo tudi jakost hrupa, ki jo v točki  $M_{NAP}$  dosega  $ZV_{ADH}$  med umerjanjem (ko na zvočnik predvaja beli šum). Ta je bila 96,6 dBA.

Tabela 1: Ravni hrupa (LVL), potrebne za enakovredne razmere pri različnih frekvencah, in izmerjena jakost aktivno zadušenega hrupa

| Frek. [Hz] | LVL (0-50) | $M_{REF}$ (0-1) | $M_{NAP}$ (0-1) | Jakost [dBA] | Dušenje [dBA] |
|------------|------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|
| 100        | 6          | 0,19            | 0,04            | 58,6         | 1,6           |
| 200        | 4          | 0,21            | 0,04            | 57,2         | 7,8           |
| 300        | 7          | 0,24            | 0,17            | 68,6         | 17,0          |
| 400        | 7          | 0,24            | 0,21            | 75,1         | 15,7          |
| 500        | 10         | 0,23            | 0,19            | 89,2         | -3,0          |
| 600        | 11         | 0,21            | 0,22            | 78,7         | 13,4          |
| 700        | 13         | 0,18            | 0,22            | 90,3         | 3,2           |
| 800        | 15         | 0,25            | 0,20            | 82,8         | 7,7           |
| 900        | 24         | 0,24            | 0,23            | 90,8         | 6,9           |
| 1000       | 21         | 0,20            | 0,29            | 90,0         | 6,6           |
| 1100       | 23         | 0,25            | 0,19            | 97,0         | 3,5           |

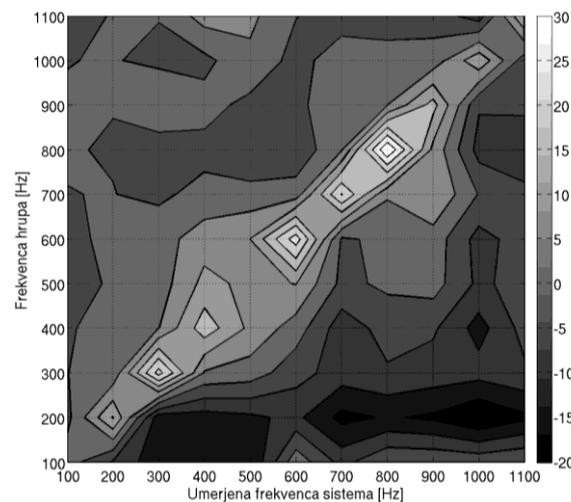
Uspešnost dušenja smo ugotavljali na dva načina. Uporabili smo podatke, ki nam jih je o dušenju v točki  $M_{NAP}$  sporočil S-ANC Tool, izvedli pa smo tudi meritve dušenja s pomočjo ročnega merilnika hrupa CEL-240. Na sliki 3 je prikazan rezultat analize dušenja ene meritve, kot ga prikaže program S-ANC Tool.



Slika 3: Prikaz močnostnega spektra hrupa pred dušenjem in po dušenju (temnejša črta) s sistemom S-Cube. Slika je dobljena kot zaslonski posnetek iz programa S-ANC Tool.

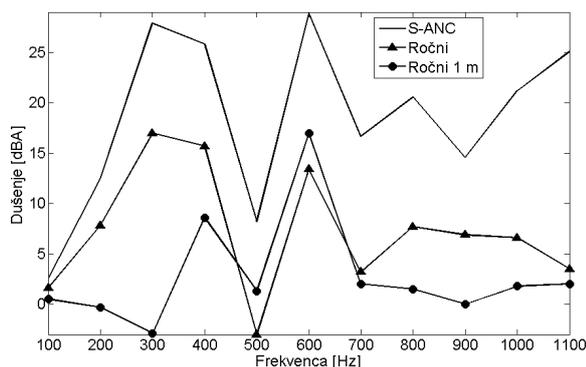
Orodje izračuna in prikaže močnostni spekter signala (neobteženega in z obtežitvijo A) ter izračuna dušenje. Pri meritvi, katere rezultate kaže slika 3, smo dušili hrup s frekvenco 700 Hz. Ob osnovni frekvenci so na grafu dobro vidni tudi višji harmoniki pri 1400 in 2100 Hz.

Rezultati meritev s programom S-ANC Tool in uspešnosti dušenja pri različnih frekvencah hrupa so prikazani na sliki 4.



Slika 4: Izmerjeno dušenje sistema [dBA] v točki  $M_{NAP}$

Z ročnim merilnikom hrupa smo merili zgolj dušenje pri frekvenci, na katero smo pred tem umerili sistem. Merili smo v dveh točkah, in sicer nekaj centimetrov od  $M_{NAP}$  in 1 m od  $ZV_{ADH}$  vzdolž dušnika. Rezultati meritev so prikazani na sliki 5.



Slika 5: Izmerjeno dušenje sistema pri umerjeni frekvenci v bližini mikrofona  $M_{NAP}$

## 5 Razprava in sklepi

Uspešnost ADH, ki jo razkriva poglavje 4, je bila izmerjena šele po več poskusih, ko smo uspeli odpraviti bistvene začetne pomanjkljivosti eksperimentalnega sistema. Tako se je, recimo, pokazalo, da ima kakovostna izdelava ohišja za  $ZV_{ADH}$  največji vpliv na delovanje sistema. Ohišje je bilo treba čim bolj zatesniti. Čeprav smo s tem precej zmanjšali moč zvočnika, smo se hkrati znebili neželenih odbojev in stojnega valovanja.

Pogoja za stabilnost sistema ni bilo mogoče vedno zlahka doseči. Pri 500 Hz in 1000 Hz je sistem zelo burno reagiral na zvoke, ki so prihajali kot odmevi iz zunanosti dušnika. Z reševanjem problema se bomo morali detajlneje ukvarjati v nadaljnjih raziskavah.

Iz tabele 1 vidimo, da je bil naš izvor hrupa pri nižjih tonih (do 500 Hz) mnogo močnejši, kot pri višjih frekvencah. Na to je vplivala uporaba dvosistemskega zvočnika z močnim basovskim zvočnikom. Temu smo morali prilagoditi izhodne amplitudne ravni pri računalniškem emuliranju izvora hrupa.

Na sliki 4 vidimo, da je aktivno dušenje bilo najučinkovitejše v razmeroma ozkih frekvenčnih pasovih, in sicer okoli 100 Hz nad in pod frekvenco umerjanja. Opazimo tudi, da se je pri večjem odstopanju od frekvence umerjanja pojavljalo nezaželeno ojačenje hrupa. To kaže na dejstvo, da je postopek, ki ga za dušenje tvori orodje S-ANC Tools in izvaja signalni procesor v vezju S-Cube, neprilagodljiv in nestabilen za frekvence, ki niso nastopale v času umerjanja sistema.

Slika 5 potrjuje, da se interna meritev, ki jo opravi program S-ANC Tool, približno ujema s podatki, ki smo jih izmerili z ročnim merilnikom glasnosti v okolici točke  $M_{NAP}$ . Ročna meritev na oddaljenosti 1 m od  $ZV_{ADH}$  kaže, da naša postavitve sistema uspe dobro zadržati hrup v izbrani točki, drugod v prostoru pa je dušenje bistveno slabše. To je bilo zaradi značilnosti zvočne valovne fronte in vplivov odmevov ter okoliških motenj mogoče pričakovati.

Sliki 4 in 5 tudi opozarjata, da je bilo dušenje pri umerjanju sistema na 500 in 1000 Hz slabše. Že med meritvami smo opazili, da program S-ANC Tool pri

običajnih ravneh hrupa (LVL) za ti dve frekvenci ni uspel izračunati veljavnega filtra, pri nižanih ravneh pa je delovanje sistema postalo precej nestabilno.

Slika 4 dodatno nakazuje, da dušenje sistema, ko je bil umerjen na 100 Hz (torej tako, da je bil  $M_{REF}$  zaradi tega v bližnjem polju izvora hrupa), ni prinašalo koristi, a tudi ni povzročilo škode, kar je po našem mnenju dober rezultat.

V zadnjih letih so emisije hrupa postale pomemben parameter pri prednostnem izboru hišnih aparatov in naprav. Proizvajalci tihih aparatov vedno pogosteje oglašajo nizko emisijo hrupa v reklamah, kjer uporabljajo izraze kot »zelo tiho delovanje«. Ker bo proizvodnja gospodinjskih aparatov pomembna dejavnost tudi v prihajajočih desetletjih, bo nujno potrebno strokovno znanje za konstruiranje visokoučinkovitih in skoraj popolnoma tihih naprav. To je izziv za konstruktorje, saj je nadzor hrupa med najbolj fasciniranimi, rentabilnimi in kompleksnimi področji snovanja ter izdelave strojev in naprav. Naše raziskave potrjujejo, da bo kombinacija aktivnega in pasivnega dušenja hrupa lahko pripeljala do zelene tihosti gospodinjskih aparatov.

## Literatura

- [1] O. Holst-Jensen: »Systematic design of low noise machinery,« Tenth international congress on sound and Vibration, Stockholm, 2003
- [2] G. Mozzon: »A New Experimental Method for the Identification of the Transmission Paths«, International Compressor Engineering Conference, 1990, str. 789-799
- [3] S. P. Rittmueller, J. A. Mann, D. K. Holger: »Iterative design method to reduce the exhaust and venting noise of a vacuum cleaner motor with minimum use of absorptive foam«, Noise Control Engineering Journal, vol. 45, no. 2, 1997, str. 63-68.
- [4] M. J. Crocker: »Recent advances in acoustics and vibration«, Proc. of First Congress of Slovenian Acoustical Society, Portorož, 1998, str. 47-66.
- [5] Dokumentacija S-Cube, Silentium ANC Workshop, priloženo razvojnemu okolju S-CUBE Development Kit.
- [6] S. J. Elliot, P. A. Nelson: »Active Noise Control«, IEEE Signal Processing Magazine, oktober 1993, str. 12-32.
- [7] H. Hamada: »The configuration of an adaptive prediction-type active noise control system«, Journal of the Acoustical Society of America, januar 1996, str. 2780.
- [8] Yamaha HS Series Owner's Manual, [http://usa.yamaha.com/products/music-production/speakers/hs\\_series/hs8/](http://usa.yamaha.com/products/music-production/speakers/hs_series/hs8/).
- [9] Audio Speaker Enclosures, <http://www.members.shaw.ca/loudspeakerbuilder.ca/enclosures.html>.