

# Efikasnost redukcije buke ventilatora pomoću ANC sistema

Violeta Stojanović  
SP Komunikacione tehnologije  
Visoka tehnička škola  
Niš, Srbija  
e-mail violeta.stojanovic@vtsnis.edu.rs

Zoran Milivojević  
SP Komunikacione tehnologije  
Visoka tehnička škola  
Niš, Srbija  
e-mail zoran.milivojevic@vtsnis.edu.rs

**Sadržaj –U ovom radu prikazani su simulacioni rezultati redukcije nivoa buke u amfiteatru koju izaziva ventilator. Kompenzacija buke ostvaruje se ANC sistemom. U prvom delu rada opisan je simulacioni model sistema. U drugom delu rada prikazani su rezultati simulacije i izvršena analiza rezultata.**

**Ključne reči – Redukcija buke, ANC sistem, akustički impulsni odziv.**

## I. UVOD

Kontrola, redukcija i zaštita od neželjenog akustičkog signala, buke, može se ostvariti pomoću: a) pasivne, b) aktivne ili c) kombinovane tehnike. Pasivna tehnika podrazumeva korišćenje materijala sa dobrim apsorpcionim svojstvima. Za nju je karakteristična mala efikasnost na niskim frekvencijama (ispod 500Hz). Razlog tome je činjenica da je na niskim frekvencijama talasna dužina zvučnog signala velika u poređenju sa dimenzijama apsorbera. Aktivna tehnika je pokazala dobre rezultate u minimiziranju akustičkog poremećaja na niskim frekvencijama. Osnovne principe aktivne tehnike, odnosno, aktivne kontrole buke (engl. *Active Noise Control*, ANC), postavio je Paul Lueg u svom patentu 1934. godine [1]. Detektovanje zvučnog signala pomoću mikrofona, obrada dobijenog električnog signala i pobuđivanje sekundarnog izvora, čine osnovu sistema za aktivnu kontrolu. Ona podrazumeva superpoziciju dva akustička talasa, koji imaju istu amplitudu i frekvenciju i suprotne faze, čiji je rezultat međusobno poništavanje (Hansen i Snajder 1997) [2]. U svom radu May i Olson razmatraju primenu sistema za aktivnu kontrolu buke u kabinama aviona i automobila [3]. William Conover analizira primenu aktivne kontrole za redukciju buke kod distributivnih transformatora [4]. Intenzivnom razvoju ove oblasti doprinela je primena digitalnih tehnika obrade signala.

U ovom radu primenjen je simulacioni model ANC sistema kod redukcije buke ventilatora u amfiteatru. Određen je akustički impulsni odziv u tački gde se nalazi mikrofona (u kojoj se minimizira greška) i u tačkama prostorije koje se nalaze u ravni mikrofona. Za određivanje akustičkog impulsnog odziva amfiteatra korišćena je *image* metoda koja je predložena od strane Allen-a i Berkley-a [5]. Implementacija ove metode opisana je u [6]. Simulacija je obavljena za slučaj primene opisanog sistema u prostoriji pomoću sinusne pobude.

Organizacija rada je sledeća. U sekciji 2 opisan je princip rada ANC sistema za redukciju buke ventilatora, adaptivni algoritam ANC sistema i predloženi simulacioni model za rešavanje problema buke u prostoriji. U sekciji 3 prikazani su proces simulacije, rezultati i analiza rezultata. Sekcija 4 je zaključak.

## II. ANC SISTEM

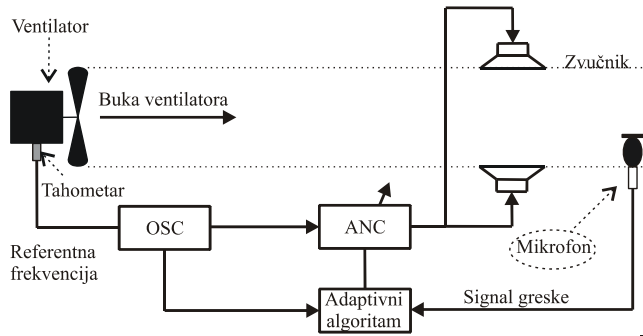
ANC sistem može biti usmeren na ostvarenje jednog od tri zahteva: a) postizanje minimuma ukupne akustičke snage zvučnog izvora, b) formiranje "zone tišine" i c) realizaciju sistema koji bi se ponašao kao apsorber neželjenog signala. U realizaciji ovih zahteva primenjuju se dve osnovne kontrolne strategije: a) kontrola unazad (*Feedback ANC*) gde ANC sistem generiše signal na osnovu električnog signala dobijenog mikrofonom na mestu gde se želi eliminacija buke i b) kontrola unapred (*Feedforward ANC*) gde se koherentni referentni električni signal šuma generiše na osnovu akustičkog šuma pre nego što akustički šum stigne do zvučnika za eliminaciju.

### A. Princip rada

Principijelna blok šema sistema za eliminaciju buke ventilatora prikazana je na Sl.1 [7].

Tahometar daje podatak o fundamentalnoj frekvenciji buke. U bloku OSC generiše se sinusoidni signal sa frekvencijom koja je jednaka fundamentalnoj frekvenciji buke. Adaptivnim algoritmom se menjaju parametri ANC sistema i obrađuju se sinusoidni signal i signal iz mikrofona. Električni signal za pobudu zvučnika se generiše na izlazu ANC sistema. Akustički signal iz zvučnika treba da bude sa takvom amplitudom i fazom da se, nakon superponiranja sa akustičkim signalom buke iz ventilatora, na mestu mikrofona, dobije minimalni akustički signal koji predstavlja akustički signal greške. Električni signal na izlazu iz mikrofona je električni signal greške i vodi se u ANC sistem.

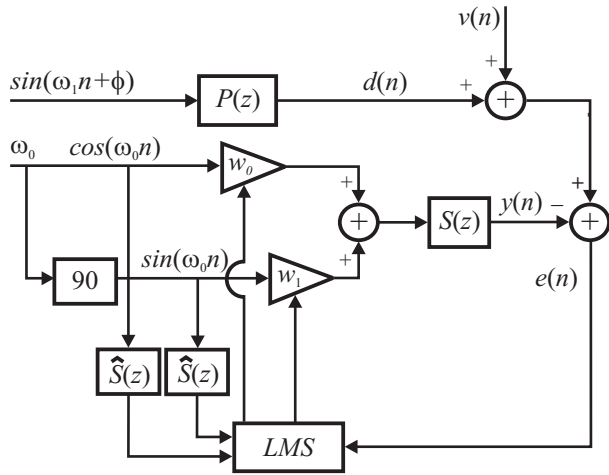
Parametre ANC sistema treba da podese adaptivni algoritam tako da kroz određeni broj iterativnih koraka signal greške bude jednak nuli. U prostoriji u kojoj se primenjuje simulacioni model nalaze se ventilator, zvučnik i mikrofona. Posmatraju se: a) primarni put koga akustički signal buke prelazi od ventilatora do mikrofona i b) sekundarni put koga akustički signal iz zvučnika prelazi do mikrofona.



Slika 1. Blok šema sistema za smanjenje buke ventilatora.

Karakteristike ovih puteva mogu se opisati pomoću akustičkog impulsnog odziva  $h(n)$ .

Akustičko-električna ekvivalentna šema ANC sistema za redukciju buke ventilatora prikazana je na Sl.2 [7]. Oznake su sledeće:  $P(z)$  transfer funkcija primarnog puta,  $S(z)$  transfer funkcija sekundarnog puta i  $\hat{S}(z)$  model sekundarnog puta. U ovom radu uzima se da je  $S(z)$  jednako  $\hat{S}(z)$  kao i da je pomeraj  $v(n)=0$ . Efekat modela sekundarnog puta na performanse sistema analizirane su u [8-11].



Slika 2. Akustičko-električna blok šema sistema za redukciju buke ventilatora.

### B. Adaptivni algoritam

Referentni signal je  $x(n) = A \cos(\omega_0 n)$ . Može se uzeti da je  $A=1$ , zbog korišćenja jednostavnijeg matematičkog aparata. Za  $n$ -tu iteraciju dobija se [6]:

$$w_0(n+1) = w_0(n) + \mu e(n) [S(z) \cos(\omega_0 n)], \quad (1)$$

$$w_1(n+1) = w_1(n) + \mu e(n) [S(z) \sin(\omega_0 n)], \quad (2)$$

gde je  $\mu$  veličina koraka iteracije a  $\omega_0$  normalizovana kružna učestanost:

$$\omega_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_s}, \quad (3)$$

gde je  $f_s$  frekvencija semplovanja. Cilj diskretnog sistema sa Sl. 2 je minimiziranje razlike  $e(n)$  između primarnog šuma  $d(n)$  i generisanog šuma (antišuma)  $y(n)$ . Tada je funkcija prenosa [12]:

$$H(z) = \frac{z^2 - 2z \cos \omega_0 + 1}{z^2 - 2z \cos \omega_0 + 1 + \beta S(z) [z \cos(\omega_0 - \phi_s) - \cos \phi_s]}, \quad (4)$$

gde su  $A_s$  i  $\phi_s$  amplituda i faza funkcije  $S(z)$ , a  $\beta = \mu A^2 A_s$ . Amplituda signala greške je:

$$A_e(\omega_0, \omega_1) = \frac{2A_d |\cos \omega_1 - \cos \omega_0|}{\sqrt{[(2-\beta)(\cos \omega_1 - \cos \omega_0)^2 + (\beta \sin \omega_1)^2]}}, \quad (5)$$

gde je:

$$\omega_1 = 2\pi \frac{f_1}{f_s}, \quad (6)$$

normalizovana kružna učestanost. Signal greške može da se zapiše kao:

$$e(n) = A_e(\omega_0, \omega_1) \cos(\omega_1 n + \phi), \quad (7)$$

gde  $\phi$  predstavlja fazni ugao. Kada su frekvencije međusobno jednake dobija se:

$$A_e(\omega_0, \omega_1) \Big|_{\omega_0 = \omega_1} = 0, \quad (8)$$

Iz jednačine (8) vidi se da je preostali šum jednak 0 kada je frekvencija referentnog signala  $\omega_0$  striktno jednaka primarnoj frekvenciji  $\omega_1$ .

### C. Simulacioni model

Simulacioni model za redukciju buke predložen u ovom radu, određen je na osnovu akustičko-električne blok šeme prikazanoj na Sl. 2

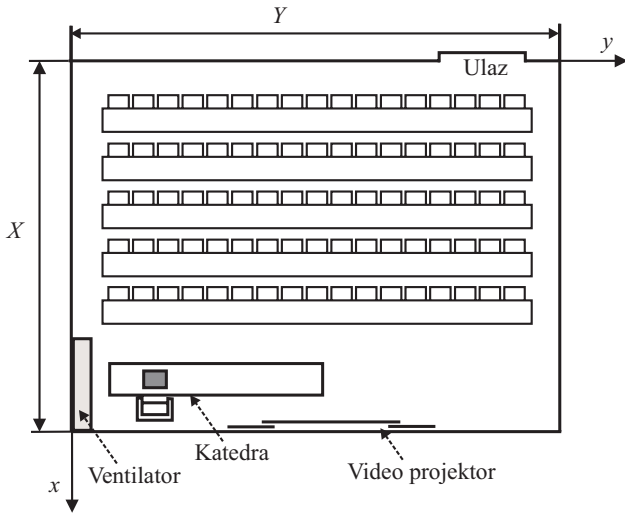
Signal greške ( $e_{k_0 l_0}(n)$ ) se minimizira LMS algoritmom i detektuje na lokaciji  $(k_0, l_0)$ . Signal buke,  $e_{kl}$ , koji nastaje kao posledica delovanja izvora buke i ANC sistema, izračunat je u tačkama prostorije  $(k, l)$ , gde je  $0 \leq k \leq K-1$  i  $0 \leq l \leq L-1$ .

Za predloženi simulacioni model: a) određeni su akustični impulsnici odzivi između zvučnika  $(k_{L_s}, l_{L_s})$  i pozicije minimizacije buke  $(k_0, l_0)$ , b) određene su karakteristike prenosne funkcije  $S(z)$ , c) određene su karakteristike prenosnih funkcija između zvučnika i tačaka prostorije  $(k, l)$ ,  $S_{kl}(z)$ , d) određena je prenosna funkcija od izvora buke  $(k_F, l_F)$  i tačke  $(k_0, l_0)$ ,  $P(z)$ , kao i f) prenosna funkcija od izvora buke i tačke  $(k, l)$ ,  $P_{kl}(z)$ .

## III. SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA

### A. Simulacija

Na Sl. 3 prikazan je amfiteatar na koji je primenjen simulacioni model ANC sistema.



Slika 3. Prikaz amfiteatra.

Dimenzije amfiteatra su:  $X$ ,  $Y$ ,  $H$ . Simulacija je vršena u  $K \times L$  tačaka. Indeksi u okviru grida su:  $0 \leq k \leq K-1$  i  $0 \leq l \leq L-1$ . Između susednih tačaka grida rastojanja po  $x$ -osi i  $y$ -osi su  $d_x$  i  $d_y$ .

ANC sistem za redukciju buke ventilatora ( $k_F, l_F$ ) sastavljen je od zvučnika i mikrofona koji se nalaze u tačkama ( $k_{L_s}, l_{L_s}$ ) i ( $k_0, l_0$ ), respektivno. Važi:  $0 \leq x_0, x_{L_s}, x_F \leq X$ ;  $0 \leq y_0, y_{L_s}, y_F \leq Y$ .

Kao mera efikasnosti dejstva ANC sistema na redukciju buke primenjena je apsolutna srednja vrednost  $\overline{E_{k,l}}$ . Apsolutna srednja vrednost za celu prostoriju je  $\overline{E}$ . Efikasnost dejstva u referentnoj tački ( $k_0, l_0$ ) je određena veličinama  $\eta_{k_0, l_0}$  i  $\varepsilon_{k_0, l_0}$  (dB).

Simulacija je izvršena za sinusnu akustičku smetnju u tački  $M(k_0, l_0, h_0)$ , gde se nalazi mikrofonski (u kojoj se minimizira greška), i u tačkama koje se nalaze u ravni mikrofona (tačka  $M(k, l, h_0)$ ).

Impulsni odzivi prostorije određeni su algoritmom opisani u radu [6].

Dimenzije amfiteatra su:  $X=11.5\text{m}$ ,  $Y=11.25\text{m}$ ,  $H=5\text{m}$ . Kapacitet je  $9 \times 17=153$  sedišta.

Nivo buke cele prostorije izračunat je u  $K \times L=47 \times 46=2162$  tačke, pri čemu je  $d_x=d_y=0.25\text{m}$ . Broj iterativnih koraka je  $N=4000$ , a broj koraka analiziranog vremenskog perioda je  $T=400$ . Kod izračunavanja impulsnog odziva amfiteatra [6], za koji se vrši simulacija, uzeti su realni refleksijski koeficijenti zidova, poda i tavanice: 0.95, 0.85, 0.88, 0.88, 0.85 i 0.88. Pozicija ventilatora je ( $k_F, l_F, h_F$ ) = (10, 0, 4.5), pozicija mikrofona je ( $k_0, l_0, h_0$ ) = (5, 5, 1.5) i pozicija zvučnika je ( $k_{L_s}, l_{L_s}, h_{L_s}$ ) = (5.5, 0, 2).

Parametri algoritma su:  $\mu = 0.1$ ,  $f_0 = 15.097\text{Hz}$ ,  $f_s=4\text{kHz}$ ,  $A=1$ ,  $A_s=2.5$ ,  $\beta=0.25$ .

### B. Rezultati simulacije

Primenom procesa simulacije za sinusnu pobudu dobijeni su sledeći rezultati:

$$\overline{E_{F_{k_0, l_0}}} = 2.7 \times 10^{-3}, \quad \overline{E_{L_{s_{k_0, l_0}}}} = 2.9 \times 10^{-3}, \quad \overline{E_{k_0, l_0}} = 0.028 \times 10^{-3},$$

$$\eta_{k_0, l_0} = 97.6, \quad \varepsilon_{k_0, l_0} = 91.6\text{dB},$$

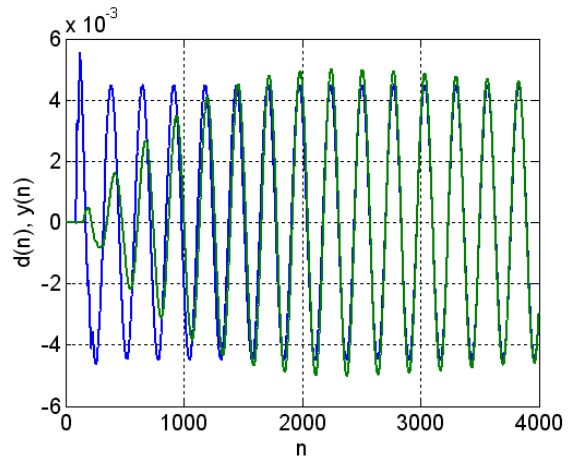
$$\overline{E_F} = 4.1 \cdot 10^{-3}, \quad \overline{E_{L_s}} = 4.2 \cdot 10^{-3}, \quad \overline{E} = 2.9 \cdot 10^{-3}.$$

Vremenski dijagram signala buke  $d(n)$  i kompenzacionog signala  $y(n)$  prikazani su na Sl.4, a vremenski dijagram signala greške na Sl.5.

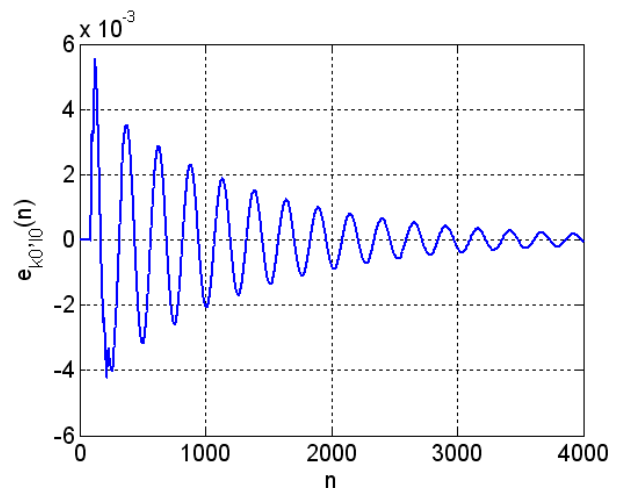
Prostorne raspodele signala nivoa buke ventilatora  $E_F$  i zvučnika  $E_{L_s}$  prikazane su na Sl.6 i Sl.7. Na Sl.8 dat je prikaz prostorne raspodele nivoa buke superponiranog signala  $E$ . Sl.9 prikazuje izofonske linije prostorije. Površina amfiteatra sa kompenzovanom bukom data je na sl.10.

### C. Analiza rezultata

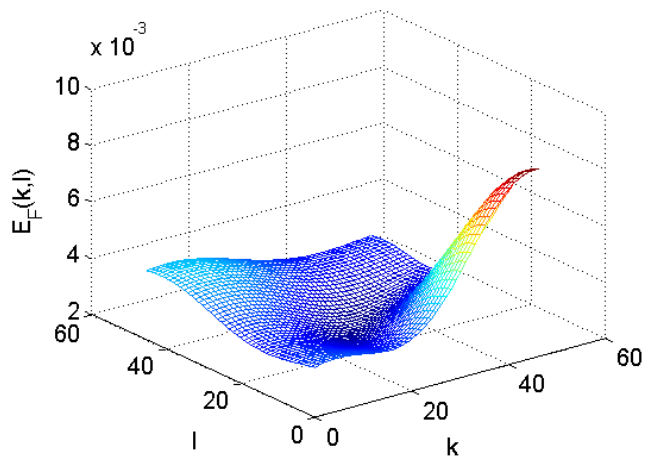
Upoređivanjem dobijenih srednjih vrednosti nivoa buke za celu prostoriju pre dejstva ANC sistema ( $\overline{E_F} = 4.1 \cdot 10^{-3}$ ) i u toku dejstva ANC sistema ( $\overline{E} = 2.9 \cdot 10^{-3}$ ) primećuje se da je srednji nivo buke smanjen. Vidi se da je kompenzacija buke ventilatora i za 91,6dB u referentnoj tački u kojoj se nalazi mikrofonski. Procenat uspešnosti kompenzacije je 30.2% (Sl 10).



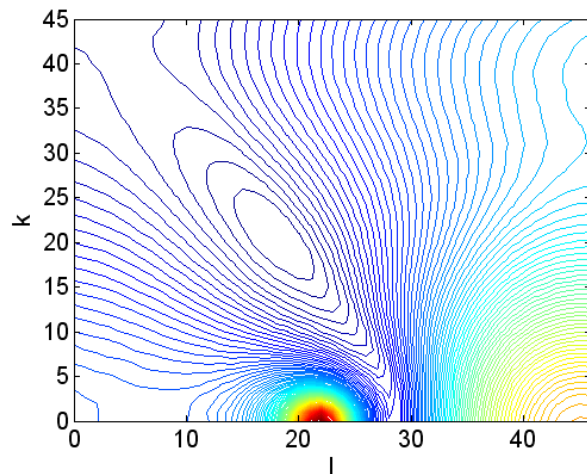
Slika 4. Signal buke  $d(n)$  i kompenzacioni signal  $y(n)$ .



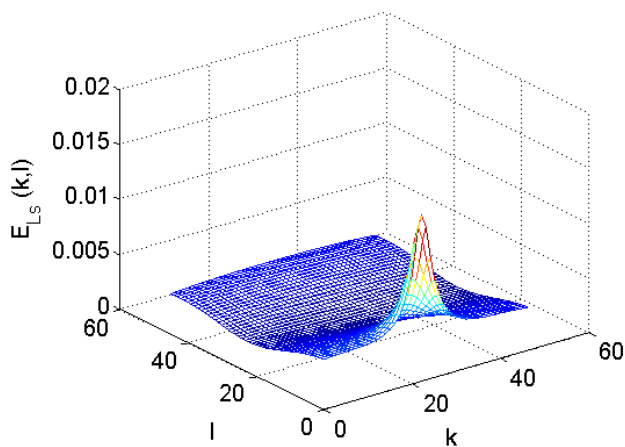
Slika 5. Signal greške.



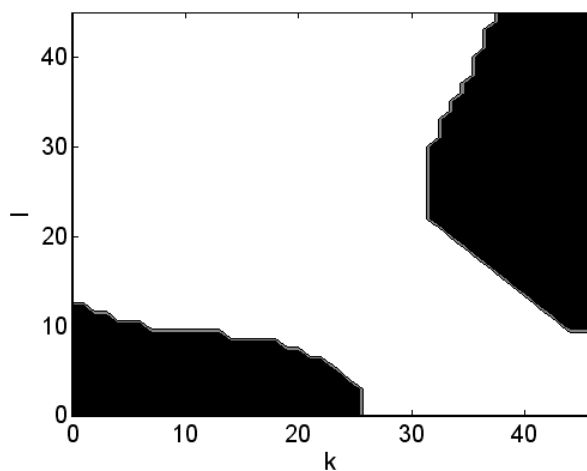
Slika 6. Signal nivoa buke ventilatora.



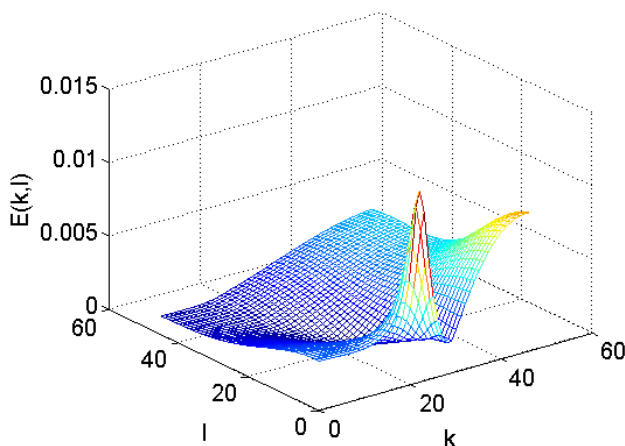
Slika 9. Izofonske linije prostorije.



Slika 7. Signal nivoa buke zvučnika.



Slika 10. Površina amfiteatra sa kompenzovanom bukom.



Slika 8. Nivo buke superponiranog signala.

### ZAKLJUČAK

U radu je prikazan simulacioni model za redukciju buke koji se bazira na implementaciji ANC sistema. Rezultati pokazuju efikasnost ovakvog koncepta kod redukcije buke koja nastaje od uređaja sa rotirajućim elementima. Primenom sistema nivo buke je smanjen, gledano u odnosu na površinu prostorije, na 69.8%, što daje preporuku za implementaciju u sistemima za rad u realnom vremenu.

### LITERATURA

- [1] P. Lueg, "Process of silencing sound oscillator", U.S. Patent No. 2043416, 1936.
- [2] D. J. Moreau, B. S. Cazzolato and A. C. Zander, "Active noise control at a moving virtual microphone using the SOTDF moving sensing method", Proceedings of ACOUSTICS, 2009 Adelaide, Australia, pp.1-8.
- [3] H. F. Olson and A. H. May, "Electronic sound absorber", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 25, pp.1130-1136, 1953.

- [4] W. B. Conover, "Fighting noise with noise", *Noise Control*, vol. 2, pp. 78-82, 1956.
- [5] J.B.Allen and Berkley, "Image method for efficiently simulating small-room acoustics", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol 65, no. 4, pp. 943-950, Apr. 1979.
- [6] E. A. P. Habets, "Room Impulse Response Generator", *internal report*, Sept. 2010.
- [7] X. Sun, N. Liu, G. Meng, "Adaptive frequency tuner for active narrowband noise control systems", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23 (2009), pp. 845–854.
- [8] J. Glover, "Adaptive noise cancellation applied to sinusoidal interfaces", *IEEE Transactionson Acoustics, Speech and Signal Processing ASSP-25* (1977) 484–491.
- [9] D. Morgan, "An analysis of multiple correlation cancellation loops with a filter in the auxiliary path", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing ASSP-28* (1980) 454–467.
- [10] C. Boucher, S. Elliott, P. Nelson, "Effect of errors in the plant model on the performance of algorithms for adaptive feedforward control", *IEE Proceedings - F* 138 (4) (1991).
- [11] S. Snyder, C. Hansen, "The effects of transfer function estimation errors on the filtered- x LMS algorithm", *IEEE Transactions on Signal Processing* 48 (4) (1994) 950–953.
- [12] S.J. Elliott, I.M. Stothers, P.A. Nelson, "A multiple error LMS algorithm and its application to the active control of sound and vibration", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing ASSP-35* (10) (1987) 1423–1434

#### ABSTRACT

In this paper, simulation results of the reduction of noise caused by the fan in the amphitheater are represented. Noise compensation is achieved by ANC system. In the first part of the paper, a simulation model of the system is described. The second part presents the results of simulation and analysis of results.

#### **EFFICIENCY OF REDUCING FAN NOISE BY ANC SYSTEM**

Violeta Stojanović, Zoran Milivojević