

FIZIČKI MODEL SISTEMA ZA AKTIVNO POTISKIVANJE BUKE
PHYSICAL MODEL OF AN ACTIVE NOISE CANCELLATION SYSTEMSava Njegovan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – DIGITALNA OBRADA SIGNALA**

Kratak sadržaj – *Ovaj rad istražuje mogućnost aktivnog potiskivanja buke (ANC) putem primene digitalne obrade signala u kombinaciji sa feedforward upravljanjem koristeći adaptivni filter. Eksperimentalna postavka simulira klimatizacioni sistem, dok se implementirani algoritam fokusira na generisanje signala za potiskivanje periodične buke koju je potrebno prethodno identifikovati.*

Ključne reči: *ANC sistemi, Digitalna obrada signala, Adaptivni filteri*

Abstract – *This paper explores the possibility of active noise cancellation (ANC) through the application of digital signal processing in combination with feedforward control using an adaptive filter. The experimental setup simulates an air conditioning system, while the implemented algorithm focuses on generating a signal for attenuating periodic noise that needs to be identified beforehand.*

Keywords: *ANC systems, Digital Signal Processing, Adaptive filters*

1. UVOD

Koncept aktivnog potiskivanja buke (ANC - Active Noise Control) datira još iz 1930-ih godina, ali zbog tehničkih ograničenja, praktična primena ovih sistema nije bila moguća sve do devedesetih godina prošlog veka [1]. Upravo u tom periodu, razvoj kontrolnih algoritama i unapređenje računarske moći digitalnih signalnih procesora omogućili su brz razvoj ovih sistema. Danas se ANC sistemi široko primenjuju i postali su neizostavan deo naše svakodnevnice, prisutni u raznim oblastima i na tržištu [2].

U okviru ovog istraživanja, glavni fokus usmeren je na eksperimentalnoj verifikaciji sposobnosti ANC sistema da potisne buku putem primene tehnika digitalne obrade signala (DSP) i korišćenja adaptivnog filtera pri upravljanju. Eksperimentalna postavka prikazana u ovom radu simulira klimatizacioni sistem, čest izvor buke u prostorima gde ljudi borave, a implementirani algoritam je namenjen za jednokanalne sisteme sa upravljanjem u otvorenoj sprezi. Cilj algoritma jeste identifikovati neželjenu buku i generisati signal koji će ju potisnuti ili u idealnom slučaju potpuno eliminisati.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Nikola Jorgovanović, red. prof.

2. METOD

U realizovanom fizičkom sistemu klimatizacionu cev simulira PVC cev dužine 101 cm i prečnika 10,5 cm, dok buku koju proizvodi ventilator oponaša signal koji se generiše na zvučniku. Zvučnik je postavljen na jednom kraju cevi, dok je na drugom kraju cevi potrebno potisnuti buku.

Vrednost frekvencije odabiranja postavljena je na $f_s=8\text{kHz}$, uprkos činjenici da se za audio sisteme najčešće koristi vrednost od 44.1kHz. Frekvencija odabiranja je namerno redukovana kako bi se smanjili računarski zahtevi, s obzirom da se algoritmi za potiskivanje buke realizuju na standardnom PC računaru.

2.1. Oprema za realizaciju ANC sistema

Opremu čine dva mikrofona: RODE NT-USB Mini (Referentni mikrofon) i Blue Yeti (Mikrofon greške). Oba mikrofona su sa računarom povezani putem USB kablova. Zvučnik Logitech Z120 je korišten kao ANC zvučnik, odnosno za generisanje signala za potiskivanje buke.

2.1. Postavka eksperimenta

Buka na izvoru se snima referentnim mikrofonom, dok se buka na izlazu sistema, tj. na drugom kraju cevi snima mikrofonom za grešku. Cilj algoritma je generisanje zvuka na ANC zvučniku koji će potisnuti buku na mestu gde je postavljen mikrofon za grešku koji samim tim daje informaciju i o efektivnosti algoritma. Postavka sistema je prikazana na slici 1.

Softversko rešenje je implementirano u *MATLAB* okruženju, a za identifikaciju sistema i generisanje signala koji treba da potisne buku korišten je *FxLMS* algoritam [2].

2.3. FxLMS algoritam

FxLMS (Filtered-*x LMS*) algoritam je poboljšana verzija klasičnog *LMS* (Least Mean Square) algoritma, posebno prilagođena za primenu u ANC sistemima. Oba ova algoritma se koriste za obradu signala i koriste *LMS* adaptivni filter. *LMS* filter prilagođava svoje koeficijente u realnom vremenu kako bi smanjio kvadratnu grešku između željenog i izlaznog signala. Na ulaz ovog filtera se dovodi ulazni signal koji treba obraditi. Pored ulaznog signala *LMS* algoritam zahteva i referentni tj. željeni signal. *LMS* filter primenjuje koeficijente na ulazni signal kako bi generisao izlazni signal. Ovaj izlazni signal se zatim upoređuje sa referentnim signalom kako bi se izračunala greška.



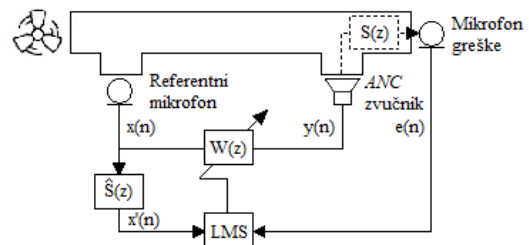
Slika 1. Fizički model ANC sistema

Ključna karakteristika *LMS* algoritma je njegova sposobnost da se adaptira. Na osnovu izračunate greške, algoritam koristi gradijentni pristup kako bi prilagodio koeficijente filtera. Koraci obrade signala, izračunavanja greške i prilagođavanja koeficijenata se ponavljaju iterativno u realnom vremenu. Algoritam se kontinuirano prilagođava kako bi smanjio grešku i približio izlazni signal referentnom signalu.

FxLMS algoritam je jedna od najčešćih tehnika adaptivnog filtriranja koja se koristi za realizaciju ANC sistema [3]. Pored digitalnog adaptivnog *LMS* filtera $W(z)$ čiji se koeficijenti računaju u realnom vremenu tokom rada sistema, ovaj algoritam uzima u obzir postojanje akustičnog odziva koji obuhvata prostiranje zvuka od ANC zvučnika do mikrofona za grešku. Upravo uzimanje u obzir ovog sistema, koji je na slici 2 označen sa $S(z)$, predstavlja unapređenje *FxLMS* u odnosu na *LMS* algoritam. U *embedded* sistemima koji se koriste za ANC, sistem $S(z)$ pored akustičnog odziva od zvučnika do mikrofona greške obuhvata hardverske komponente kao što su *D/A* konvertor, audio pojačavač, zvučnik, mikروفon greške, anti-aliasing filter i *A/D* konvertor [2]. U odnosu na *embedded* sistem koji je namenjen za rad u realnom vremenu, kod standardnog *PC* računara hardverska arhitektura je znatno kompleksnija, a operativni sistemi nisu optimizovani za brzu obradu. Fizički model realizovan u ovom radu, sa softverskim rešenjem implementiranim u *MATLAB*-u na *PC* računaru, iz navedenih razloga ograničava performanse ANC sistema i prouzrokuje veće kašnjenje što može znatno uticati na efikasnost algoritma.

Da bi se *FxLMS* algoritam mogao implementirati prethodno je neophodno odraditi *offline* identifikaciju sistema $S(z)$ i u ovom radu je za njegovu estimaciju korišten *FIR* filter. Identifikacija ovog sistema se vrši pomoću prethodno navedenog *LMS* adaptivnog filtera koji iz iteracije u iteraciju izračunava procenjene koeficijente filtera sve dok se koeficijenti ne ustale. Proces identifikacije pomoću *LMS* adaptivnog filtera se vrši generisanjem belog šuma sa ANC zvučnika. Generisani beli šum predstavlja ulazni signal u filter i za

identifikaciju se koristi zato što ima konstantnu spektralnu gustinu na svim frekvencijama [4]. Za referentni signal se koristi signal snimljen sa mikrofona greške, a cilj je minimizovati grešku tj. razliku izlaznog signala iz estimiranog filtera i referentnog signala. U 3. odeljku prikazani su rezultati verifikacije identifikacije sistema $S(z)$ putem upoređivanja impulsnog odziva stvarnog i procenjenog sistema. Kada je proces identifikacije sistema $S(z)$ završen, dobijeni koeficijenti filtera $\hat{S}(z)$ se čuvaju kako bi *FxLMS* algoritam bio spreman za primenu.

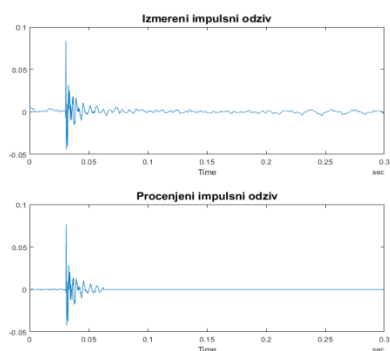


Slika 2. *FxLMS* algoritam

3. REZULTATI RADA

Pre nego što je aktiviran ANC sistem, sproveden je proces *offline* identifikacije sistema $S(z)$. Radi provere tačnosti ovog procesa identifikacije, izvršeno je poređenje impulsnog odziva stvarnog sistema sa impulsnim odzivom procenjenog filtera $\hat{S}(z)$. Rezultati dobijeni tokom ovog procesa verifikacije sistema $S(z)$ prikazani su na slici 3.

Ventilatori u klimatizacionim sistemima su izvor periodične buke, pa je i ovaj model testiran nad takvim signalima. ANC sistem počinje da podešava koeficijente adaptivnog filtera nakon 3,5 sekunde od puštanja buke i pokretanja programa. Pored toga, nakon što algoritam konvergira, tj. podesi koeficijente filtera tako da se buka potisne, iterativno ažuriranje koeficijenata se zaustavlja i koeficijenti filtera se zaključavaju. Trenutak zaključavanja koeficijenata u implementiranom algoritmu zavisi od vrednosti signala greške, a optimalna vrednost je izabrana nakon više testiranja.



Slika 3. Poređenje impulsnih odziva sistema $S(z)$ i $\hat{S}(z)$

Na slici 4 prikazan je rezultat potiskivanja periodične buke na 800Hz u vremenskom domenu. Plavom bojom je prikazan signal sa referentnog mikrofona, a crvenom signal koji registruje mikrofona za grešku. Ovo je ujedno i jedan od najboljih rezultata koji su dobijeni pri testiranju.

Na slici 5(a) prikazan je amplitudski spektar signala pre potiskivanja, dok je na slici 5(b) prikazan amplitudski spektar signala posle potiskivanja. Crvenom bojom je označen spektar signala sa mikrofona greške.

Uočava se da je komponenta na frekvenciji 800 Hz smanjena sa -11 dB na -37 dB nakon primene potiskivanja.

4. DISKUSIJA

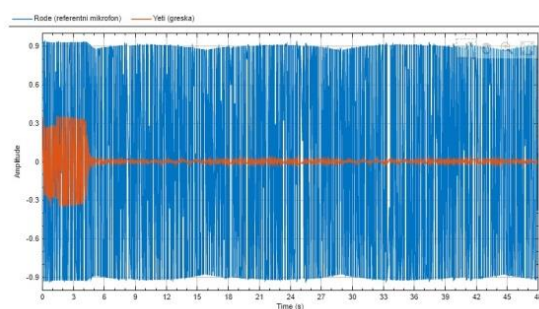
Testiranje sistema za aktivno potiskivanje buke na periodičnim signalima pokazalo je odlične rezultate za određene periodične signale. Sistem je efikasno smanjio prisutnost buke u tim uslovima, potvrđujući teorijsku osnovu sistema. Naredni korak istraživanja treba da se usredsredi na proširenje funkcionalnosti sistema kako bi se omogućila uspešna implementacija i testiranje na aperiodičnim signalima. Ovakav pristup će omogućiti sistem da efikasno reaguje na širok spektar signala.

Tokom implementacije, identifikovane su određene prepreke koje su uticale na performanse sistema. Upotreba opreme koja nije prvobitno namenjena za ANC prouzrokovala je povećano kašnjenje i ograničenja u prilagođavanju parametara sistema. Jedan od primetnih problema tokom analize rezultata je bila prisutnost distorzija harmonika što se i vidi na spektru signala prikazanom na slici 5.

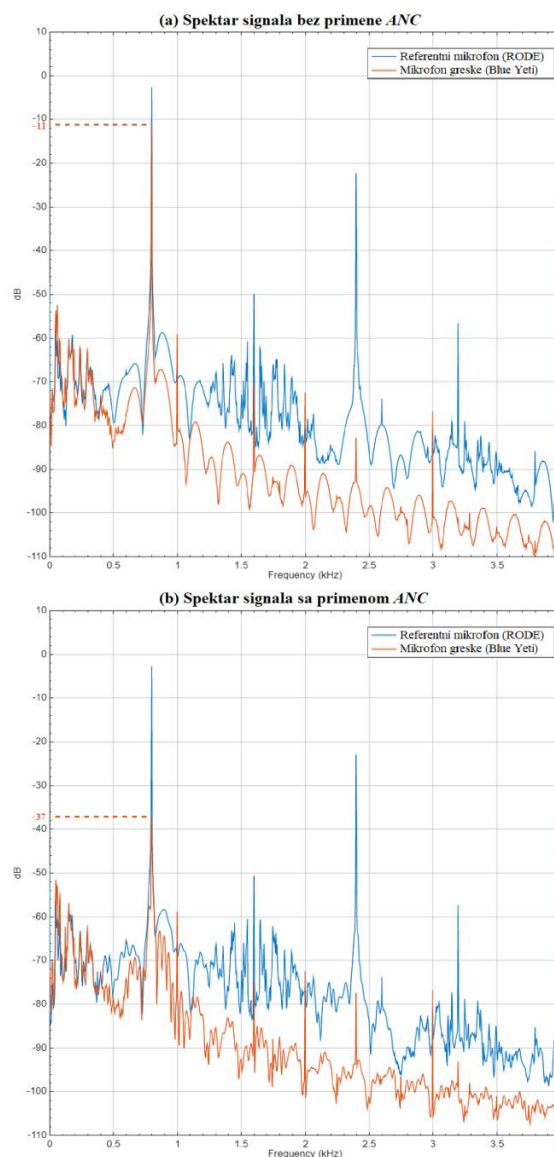
Ovo ističe važnost kvalitetne i adekvatne opreme za uspešno funkcionisanje ANC sistema, kao i potrebu za dodatnim istraživanjem kako bi se otklonili ovi problemi i poboljšala celokupna efikasnost sistema.

Što se tiče $FxLMS$ algoritma koji je korišćen za adaptivno upravljanje u ANC sistemu, njegova primena se pokazala adekvatnom.

Međutim, dalja optimizacija i prilagođavanje ovog algoritma može doneti dodatne koristi u pogledu performansi i stabilnosti sistema.



Slika 4. Rezultat potiskivanja periodičnog signala sa komponentom na 800Hz



Slika 5. Spektar signala bez i sa primenom ANC-a

5. ZAKLJUČAK

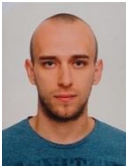
Cilj ovog rada je bilo pokazati mogućnost potiskivanja buke primenom *feedforward FxLMS* algoritma na realnom fizičkom modelu što je i postignuto. Ovaj master rad predstavlja nastavak istraživanja iz diplomskog rada koji se fokusirao na teorijskom razumevanju i simulaciji sistema za aktivno potiskivanje buke.

Pokazano je da praktična implementacija donosi sa sobom izazove koji se ne pojavljuju tokom simulacija, te je tokom ovog rada bilo potrebno razviti rešenja za realne probleme i tehničke prepreke.

6. LITERATURA

- [1] C.H.Hansen, "*Understanding Active Noise Cancellation*", London, Spon Press, 2001.
- [2] S.M.Kuo, "*Active Noise Control: A Tutorial Review*", Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 6, pp. 943-973, June 1999.
- [3] K.-C.Chen, C.-Y.Chang, S.M.Kuo, "*Active noise control in a duct to cancel broadband noise*", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 237, no. 1, 2017.
- [4] S.M.Kuo, "*Adaptive active noise control systems: algorithms and digital signal processing (DSP) implementations*", Wiley-Interscience; 1st edition (February 8, 1996)

Kratka biografija:



Sava Njegovan rođen je u Prnjavoru 1999. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Automatika i upravljanje sistemima – Biomedicinsko inženjerstvo odbranio je 2023.god.
kontakt: savanjegovan9@gmail.com