

Funkcionalnost softvera za merenje i analizu zvučne izolacije

Stefan Dimitrijević

Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Beograd, Srbija
stefan.dimitrijevic@viser.edu.rs

Draško Mašović, Đorđe Grozdić

Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
drasko.masovic@gmail.com, djordjegrozdic@gmail.com

Sadržaj— Istraživanja u oblasti građevinske akustike, kakva su na primer potrebna za merenje zvučne izolacije, ponekad zahtevaju analize koje se ne mogu obaviti korišćenjem komercijalnih softvera. Ovaj problem se može prevazići upotrebom namenski pravljenog softvera za merenje zvučne izolacije. U ovom radu su opisane funkcije jednog takvog softvera i prikazani rezultati jedne njegove praktične primene.

Cljučne riječi— zvučna izolacija; slabljenje; impulsni odziv

I. UVOD

Merenje zvučne izolacije detaljno je opisano u međunarodnim i odgovarajućim domaćim standardima [1] i [2]. U njima je detaljno opisan postupak merenja zvučne izolacije, ali i način prikazivanja rezultata merenja. U te svrhe, na tržištu postoji veliki izbor softvera i fonometara, koji se razlikuju po svojoj složenosti. Mnogi od takvih softverskih alata zahtevaju upotrebu dodatnih softvera u cilju potpunijeg uvida u rezultate merenja. Ne tako retko, ovakvi dopunski softveri u velikoj meri prevazilaze budžet laboratorija koje se bave naučno-istraživačkim radom.

I pored svih naprednih komercijalnih softvera, merenje zvučne izolacije zahteva upotrebu namenskih softvera koji ponekad prevazilaze mogućnosti standardnih mernih uređaja. Takva su na primer *in situ* merenja gde želimo da na detaljniji način imamo uvid u energije snimljenih impulsnih odziva, ali i mogućnost prikaza parametara za učitani impulsni odziv. Za ovakav tip merenja često je potrebno dvokanalno merenje. Takođe, sa pojavom novog standarda [3] nastala je potreba za fleksibilnijim softverom čija je osnovna uloga da olakša i ubrza proces prikaza parametara od interesa, ali i za odabirom različitih vrsta pobudnih signala koje taj standard preporučuje.

Ovaj rad je imao za cilj da opiše namenski softver za merenje zvučne izolacije, ali i da prikaže njegovu praktičnu primenu i rezultate te primene. Od posebnog značaja je implementacija softvera u merenjima na licu mesta, tj. *in situ*. U tu svrhu su obavljena merenja impulsnog odziva sa determinističkim [4] pobudnim signalom su jednoj učionici na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Snimanja su obavljena profesionalnom opremom, a celokupni proces generisanja, snimanja i obrade signala izvršen je u pomenutom namenskom softveru koji je napravljen u softverskom paketu MATLAB r2010a [5].

Osim namenskog softvera, za merenje zvučne izolacije korišćena su dva neusmerena merna mikrofona, pojačavač snage, zvučnik i laptop računar. Sam proces merenja je ubrzan primenom dvokanalnog snimanja impulsnih odziva. Rezultati izmerenih impulsnih odziva su upoređeni sa odzivima dobijenih korišćenjem u softverskom paketu DIRAC [6], pri istim uslovima merenja u oba slučaja.

Rad je koncipiran u šest celina. U drugoj celini su opisane funkcije namenskog softvera, ali i uloge njegovih pojedinačnih delova u celokupnom procesu merenja i obrade. U trećem delu je opisan novi standard za merenje zvučne izolacije. U četvrtoj celini je dat opis korisničkog interfejsa. a u petoj celini su prikazani rezultati praktične primene softvera u merenju zvučne izolacije. U šestoj, poslednjoj celini je dat zaključak ovog rada.

II. FUNKCIJE SOFTVERA ZA MERENJE ZVUČNE IZOLACIJE

Računarski softver, realizovan u softverskom paketu MATLAB r2010a, predstavlja aplikaciju specijalizovanu za merenje zvučne izolacije, impulsnog odziva prostorije i prikaz njegovih energija (tercnih i ukupnih), u realnom vremenu. Grafički prikazi impulsnih odziva, njihovih energija i ukupnog slabljenja mogu se izvršiti na dva načina: postupkom novog merenja i učitavanjem prethodno snimljenih impulsnih odziva. Snimljeni i učitani impulsni odzivi su WAV nekomprinovani fajlovi. Rezultati (učitanih ili izmerenih impulsnih odziva) se u okviru grafičkog interfejsa samog softvera prikazuju tabelarno. Kao krajnji parametar od značaja, softver prikazuje ukupno slabljenje (po tercnim oktavama i ukupno). S obzirom da namenski softver prikazuje razliku u energijama impulsnih odziva, opcija merenja i učitavanja kalibracionog signala nije realizovana. Prethodno učitani WAV impulsni odzivi se mogu pripremiti u bilo kom od softvera za editovanje audio signala (*Sound Forge* [7], *Dirac*, itd.). Nakon pokretanja novog merenja (ili učitavanja prethodno snimljenih impulsnih odziva) moguće je pokrenuti analizu unutar samog programa. Osnovni rezultat analize predstavlja ukupno slabljenje prostorija, ali i vrednosti energija (ukupne i terčne) snimljenih (tj. učitanih) impulsnih odziva. Takođe, u softveru se grafički prikazuju sledeće informacije:

- Vremenska karakteristika impulsnih odziva;
- Frekvencijska karakteristika impulsnih odziva;
- Krive opadanja nivoa.

Grafički prikaz je određen prethodno izabranim brojem kanala. Naime, u zavisnosti od potreba korisnika, moguće je prikazivati rezultate jednokanalnog i dvokanalnog merenja. Za potrebe samog merenja zvučne izolacije, prikazuje se slabljenje po formuli:

$$D = L_2 - L_1 \tag{1}$$

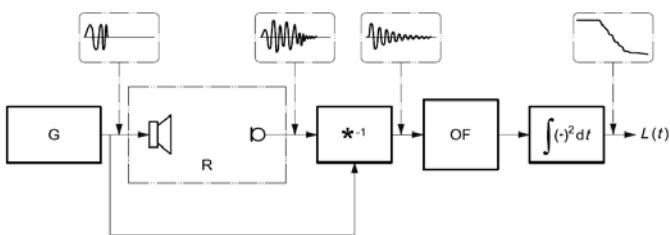
gde L_2 predstavlja energiju impulsnog odziva u prijemnoj, a L_1 energiju impulsnog odziva u predajnoj prostoriji. Program dalje računa i tabelarno prikazuje RMS energije za svaki impulsni odziv, ukupne i po tercnim oktavama.

Vremenske i frekvencijske karakteristike impulsnih odziva, kao i krive opadanja nivoa moguće je odrediti za bilo koje trajanje signala. Kao što možemo i da pretpostavimo, sam proces obrade će trajati duže za veće ulazne fajlove, ali u proseku ne više od nekoliko minuta. Ova opcija softvera omogućuje korisnicima da uporede rezultate korišćenjem različitih dužina pobudnih signala, što se može ogledati u dobijenom boljem SNR.

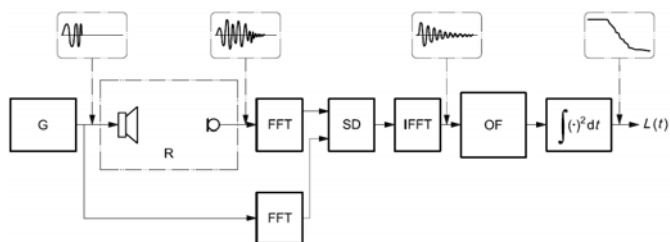
III. NOVI METOD MERENJA ZVUČNE IZOLACIJE

Osnovna ideja za realizaciju ovakvog namenskog softvera bila je potreba za testiranjem novog standarda za merenje zvučne izolacije.

Prostorija u kojoj se prenosi zvuk može se aproksimirati linearnim i vremenski invarijantnim sistemom. U ovakvim sistemima je moguće uspostaviti vezu između zvučne pobude i odziva i lako naći odziv prostorije pod uslovom da nam je pobuda poznat signal. Sa poznatim ulaznim signalom (ekscitacijom) i izlaznim signalom (odzivom) sistema i korišćenjem dekonvolucije (u vremenskom domenu), ili spektralnog deljenja (u frekvencijskom domenu), dobija se impulsni odziv. Ovaj postupak je šematski prikazan na Slici 1. i Slici 2.



Slika 1. Nalaženje impulsnog odziva dekonvolucijom



Slika 2. Nalaženje impulsnog odziva spektralnim deljenjem

Na šemi je sa G označen generator *sweep* signala [7] i [8], R predstavlja prostoriju, simbol $*^{-1}$ dekonvoluciju, OF oktavno filtriranje, SD spektralno deljenje, FFT brzu Furijeovu transformaciju a IFFT inverznu Furijeovu transformaciju.

Računanje slabljenja zvuka se obavlja pomoću sledeće formule:

$$D = 10 \lg \left[\frac{\int_0^{\infty} h_1^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h_2^2(t) dt} \right] dB \tag{2}$$

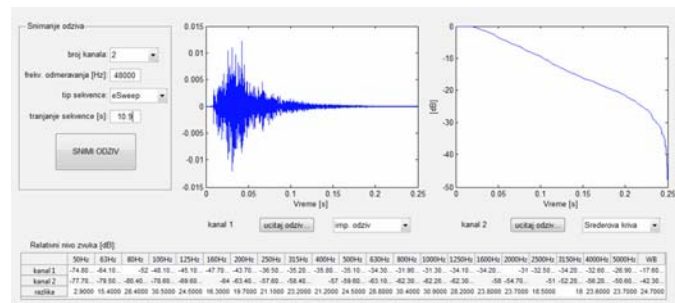
gde $h(t)$ izmereni impulsni odziv.

Položaj zvučnog izvora i mikrofona u prostoriji je isti kao i u klasičnoj metodi merenja nivoa zvuka. Eksitacija signala se vrši u dužem vremenskom periodu kako bi se postigao veći dinamički opseg i smanjenje uticaja spoljašnjeg šuma. Prilikom pobuđivanja prostorije zvukom, potrebno je voditi računa o snagama eksitacionog signala sa kojima se radi. Sa povećanjem snaga povećava se i distorzija usled nelinearnosti zvučnika.

Nova metoda, kako je to istaknuto u standardu , donosi brojne prednosti u odnosu na klasični metod, pre svega u pogledu boljeg potiskivanja spoljašnjeg šuma i proširenja mernog opsega.

IV. KORISNIČKI INTERFEJS

Na Slici 3. je prikazan grafički korisnički interfejs realizovanog softvera. Prozor programa se sastoji od tri celine. U nastavku su dati detaljniji prikazi opisane funkcije svake od njih.



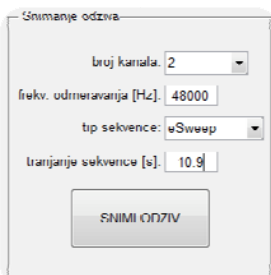
Slika 3. Grafički interfejs softver

A. Snimanje odziva

Na Slici 4. je prikazan grafički prikaz ove grafičke celine:

- 1) Broj kanala (podešavanje broja kanala koji se koriste)
- 2) Frek. odmeravanja (ova opcija omogućuje korisniku upisivanje proizvoljne vrednosti frekvencije odmeravanja)
- 3) Tip sekvence (biranje tipa pobudnog signala)
 - a) eSweep
 - b) Beli šum
 - c) Roze šum
- 4) Trajanje sekvence (dužina pobudnog signala)

Ova sekcija nalazi se u gornjem levom prozoru programa. Obuhvata osnovna podešavanja koja definišu sam postupak novog merenja, koje može biti jednokanalno (ukoliko se impulsi snima u svakoj prostoriji pojedinačno) ili dvokanalno (ukoliko impulsne odzive u prijemnoj i predajnoj prostoriji snimamo istovremeno). Nakon toga, korisnik upisuje vrednost frekvencije odmeravanja koja može biti proizvoljna, ali i tip pobudnog signala (eSweep, beli šum ili roze šum). Na kraju, korisnik upisuje dužinu trajanja sekvence, koja takođe može biti proizvoljna, ali čija vrednost utiče na dužinu same obrade podataka.

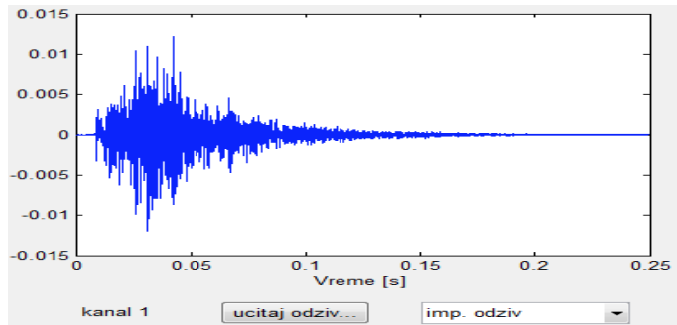


Slika 4. Snimanje odziva

B. Grafički prikaz merenja

Na Slici 5. možemo videti grafički prikaz ove celine namenskog softvera. U ovom delu sekcije, korisnik može imati uvid u:

- 1) vremensku karakteristiku impulsnog odziva
- 2) frekvencijsku karakteristiku impulsnog odziva
- 3) krivu opadanja nivoa zvuka u prostoriji.



Slika 5. Grafički prikaz impulsnog odziva

Osim grafičkog prikaza impulsnog odziva dobijenog pokretanjem (prethodno objašnjenog) postupka snimanja, u ovom delu programa možemo učitati i prethodno snimljene impulsne odzive. Nakon toga, korisnik može pomoću padajućeg menija birati prikaz vremenske i frekvencijske karakteristike impulsnog odziva, ali i grafički prikazati krivu opadanja nivoa zvuka u prostoriji. Ovdje je bitno spomenuti da se, za razliku od većine komercijalnih softvera, u ovom softveru prikazuju nenormalizovane vrednosti snimljenog (učitanog) impulsnog odziva. Na ovaj način, korisnik može imati uvid u tačne vrednosti energija snimljenog (učitanog) impulsnog odziva.

C. Prikaz rezultata merenja

Na Slici 6. možemo videti grafički prikaz ove celine namenskog softvera.

Realni nivo zvuka [dB]	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	WB	
kanal 1	-74.00	-64.10	-52	-48.10	-45.10	-47.70	-43.70	-36.50	-35.20	-35.10	-34.30	-31.90	-31.30	-34.10	-34.20	-31	-32.50	-34.20	-32.60	-26.90	-17.60		
kanal 2	-77.70	-79.50	-80.40	-78.60	-69.60	-64	-63.40	-57.60	-58.40	-57	-59.60	-63.10	-62.30	-62.20	-62.30	-58	-54.70	-51	-52.20	-56.20	-50.60	-42.30	
razlika	2.9000	15.4000	28.4000	30.5000	24.5000	16.3000	16.7000	21.1000	23.2000	21.2000	24.5000	28.8000	30.4000	30.9000	28.2000	23.8000	23.7000	18.5000	16	23.6000	23.7000	24.7000	

Slika 6. Tabela rezultata merenja

Nakon snimljenih (učitanih) impulsnih odziva, softver prikazuje energije po tercnim oktavama, ukupne energije, ali i slabljenje po tercnim oktavama kao i ukupno slabljenje. Podrazumeva se da je za prikaz slabljenja potrebno izabrati dvokanalno merenje (učitavanje), koje se vrši u prethodnim koracima.

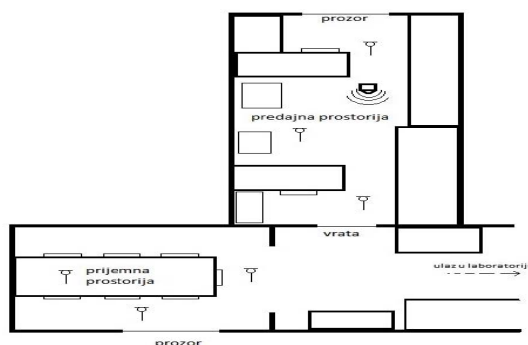
V. PRIMER MERENJA ZVUČNE IZOLACIJE PRIMENOM REALIZOVANOG SOFTVERA

Merenja zvučne izolacije obavljena su u prostorijama laboratorije za akustiku na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. U obe prostorije proizvoljno su odabrana po tri merna mesta vodeći računa o preporuci standarda o položaju mikrofona u prostoriji. Zvučnik se nalazio na sredini predajne prostorije, i njegov položaj je ostao nepromenjen do kraja merenja, kao što je prikazano na Slici 7. Položaj mikrofona je menjan, vodeći računa o preporučenoj udaljenosti od zida (ne manjoj od 0,7m).

Merna oprema se sastojala od:

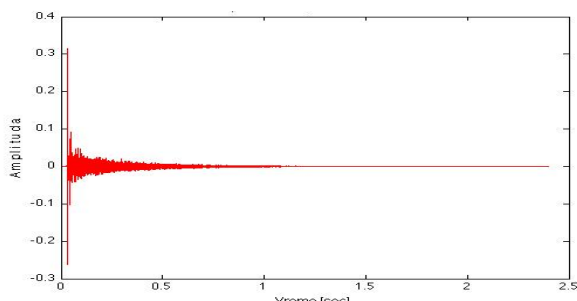
- neusmerenog mernog mikrofona sa fantomskim napajanjem,
- zvučne karte M-audio ProFire 610,
- pojačavača snage,
- zvučnika, i
- laptop računara.

Na Slici 7. je prikazana prostorija u kojoj je vršeno merenje kao i položaj merne opreme. Na svakom mernom mestu su vršena po tri merenja, jedno za drugim (za pobudni signal Swept-Sine). Za svaki merni položaj mikrofona generisan je linearni Swept-Sine signal dužine 5, 10 i 20 sekundi i frekvencijskog opsega 20Hz - 20kHz.



Slika 7. Požaj merne opreme u predajnoj i prijemnoj prostoriji

Na osnovu generisanih i snimljenih signala računat je impulsni odziv u vremenskom domenu korišćenjem spektralnog deljenja snimljenog i generisanog signala. Iz impulsnih odziva su kasnije dobijene vrednosti energija na čitavom frekvencijskom opsegu (*Wide Band*) i energija po tercnim oktavama. Na Sl. 8. je prikazan jedan tako dobijeni impulsni odziv.



Slika 8. Impulsni odziv dobijen namenski realizovanim softverom

U Tabeli I su prikazani rezultati merenja izolovanosti prostorija za pobudni signal Swept-sine različitih dužina. Za svaki položaj mernog mikrofona snimano je četiri impulsnih odziva za jednu dužinu pobudnog signala. To znači da je za svaku od šest pozicija čuvano po dvanaest impulsnih odziva. U Tabeli I su prikazane vrednosti izlovanosti prostorija (ukupne i po tercnim oktavama) na osnovu tri usrednjavanja dobijenih impulsnih odziva (1x, 2x i 4x). Najveća vrednost izolovanosti prostorija, za slučaj bez usrednjavanja, iznosi 35.1 dB za dužinu pobudnog signala 5 sekundi, dok najmanja vrednost iznosi 32.8 dB za dužinu pobudnog signala 20 sekundi. U slučaju sa dva usrednjavanja, najveća vrednost iznosi 32.7 dB za dužinu pobudnog signala 5 sekundi, dok najmanja iznosi 32.5 dB za dužinu pobudnog signala 20 sekundi. Za poslednji slučaj četiri usrednjavanja, najveća vrednost izolovanosti prostorija iznosi 32.8 dB za dužinu pobudnog signala 5 sekundi, dok je najmanja vrednost dobijena za dužinu pobudnog signala 20 sekundi i iznosi 32.6 dB.

TABELA I. REZULTATI MERENJA

	62.5 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	D [dB]
Usrednjavanje 1x									
Swept sine (5s)	24.9	276	26.77	31.4	36.3	33.2	336	37.2	35.1
Swept sine (10s)	23.3	26.1	24.6	28.8	34.7	30.8	31.2	34.9	32.9
Swept sine (20s)	23.4	26.0	24.4	28.7	34.6	30.8	31.0	34.7	32.8
Usrednjavanje 2x									
Swept sine (5s)	23.4	26.0	24.5	28.7	34.2	30.8	31.1	34.7	32.7
Swept sine (10s)	23.1	26.6	25.0	29.4	35.1	31.6	31.9	35.7	33.6
Swept sine (20s)	23.1	26.1	24.3	28.4	34.5	30.3	30.8	34.4	32.5
Usrednjavanje 4x									
Swept sine (5s)	23.3	25.9	24.6	28.7	34.3	30.9	31.1	34.7	32.8
Swept sine (10s)	23.4	26.1	24.5	28.4	34.7	31.0	31.0	34.7	32.7
Swept sine (20s)	23.1	26.1	24.3	28.4	34.4	30.3	30.8	34.6	32.6

VI. ZAKLUČAK

Prikazani računarski softver, kao sastavni deo istraživačkog alata specijalizovanog za merenje i analizu zvučne izolacije, zadovoljava zahteve novog standarda pri merenju izolovanosti između prostorija. Kao što je u ovom radu i prikazano, realizovani softver daje očekivane rezultate izolovanosti prostorija. Pored toga, korisnik ima potpunu slobodu da unese najvažnije parametre merenja impulsnog odziva, kao što su frekvencija odabiranja, tip pobudnog signala i njegovo trajanje, čime je povećana njegova fleksibilnost u naučnim istraživanjima. Program je realizovan sa namerom da se primeni u budućim analizama zvučne izolacije, što znači da će i u budućnosti verovatno trpeti izmene u skladu sa novonastalim potrebama istraživanja. To čini i najveću prednost ovakvog alata u odnosu na standardne uređaje - mogućnost jednostavne izmene i unapređivanja u skladu sa razvojem potreba korisnika.

ZAHVALNICA

Želeli bismo da se zahvalimo laboratoriji za akustiku na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, koja nam je omogućila korišćenje neophodne opreme za merenje. Takođe želimo da zahvalimo našim mentorima prof. dr Mimiru Mijiću i doc. dr Dejanu Čiriću za pruženu pomoć.

LITERATURA

- [1] ISO DIS 18233: Acoustics - Application of New Measurement Methods in Building Acoustics, International Organization for Standardization, 2006.
- [2] ISO 140: Acoustics - Measurement of Sound Insulation in Buildings and Building Elements, International Organization for Standardization, 1995.
- [3] C. Hopkins, *Sound Insulation*, USA, Elsevier, 2007.
- [4] MATLAB r2012, MathWorks Natick, Massachusetts, U.S.A. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [5] DIRAC, Brüel & Kjør Sound & Vibration Measurement A/S, Skodsborgvej 307, DK-2850, Nærum, Denmark. <http://www.bksv.com/servicecalibration/support/downloads/dirac.aspx>
- [6] Sony Sound Forge Pro 10.0, Sony Creative Software, <http://www.sonycreativesoftware.com/soundforge>
- [7] MÜLLER, S., and MASSARANI, P., Transfer-Function Measurement with Sweeps. *J. Audio Eng. Soc.*, 49 (2001), pp. 443-471
- [8] FARINA, A., *Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique*. AES 108 th Convention, Paris, 2000 February 19-22, Preprint 5093

ABSTRACT

Research in the area of building acoustics, like that needed for measurement of sound insulation, sometimes requires analysis which cannot be performed by use of commercial software. This problem can be solved by use of embedded software for sound insulation. In this article, one of these softwares is presented along with the results of its practical application.

FUNCTIONALITY OF SOUND INSULATION MEASUREMENT AND ANALYSING SOFTWARE

Stefan Dimitrijević, Draško Mašović, Đorđe Grozdić