

# Poređenje uticaja tranzijentne buke kod MLS i Sine Sweep tehnike

Miloš Marković, Dejan Ćirić i Branko Stojić

**Sadržaj** — U radu je prikazana paralelna analiza uticaja tranzijentne buke na merenje impulsnog odziva prostorije primenom MLS i Sine Sweep tehnika. Uticaj promene parametara tranzijentne buke na ove dve tehnike se ispituje simulacijama, ali i merenjima. Pod parametrima se podrazumeva trajanje, nivo, vrsta signala buke i mesto pojavljivanja u pobudnom signalu. Impulsni odzivi dobijeni u prisustvu ove buke se upoređuju međusobno, ali i sa odzivima kada nema buke. Rezultati pokazuju da je MLS tehnika neosetljiva na tranzijentnu buku dok je kod Sine Sweep tehnike potrebno ispuniti određene zahteve kako signal greške koji se javlja u impulsnom odzivu ne bi uticao na impulsno opadanje. U oba slučaja dolazi do smanjenja odnosa signal/šum što je direktna posledica prisustva tranzijentne buke.

**Ključne reči** — impulsni odziv, MLS tehnika, Sine Sweep tehnika, tranzijentna buka.

## I. UVOD

JEDAN od najznačajnijih zadataka u svim oblastima akustike je merenje prenosne funkcije sistema i njegov ekvivalenta - impulsnog odziva. U akustici prostorija, impulsni odziv predstavlja centralnu veličinu. Za potrebe njegovog merenja, razvijen je veliki broj mernih tehnika i metoda. Zajedničko za sve merne tehnike je upotreba pobudnog signala koji sadrži sve frekvencije od interesa. Takođe, zbog prisustva šuma koji smanjuje preciznost merenja, poželjno je da pobudni signal ima dovoljno veliku energiju kako bi se dobio dovoljan odnos signal/šum (SNR) u frekvencijskom opsegu od interesa [1].

Najčešće korišćeni pobudni signali su sekvenca maksimalne dužine (MLS) kao predstavnik pseudoslučajnog belog šuma, i Sine Sweep („sweep-ovana” sinusoida), koji predstavlja signal čija se frekvencija menja u vremenu.

MLS tehnika se već dugi niz godina primenjuje za akustička merenja, a posebne prednosti ima pri merenjima koja se izvode u prostorijama sa publikom ili prostorima u kojima postoje različite vrste šumova i buke [2]. Glavni nedostatak ove tehnike je osetljivost na izobličenja

i vremensku promenljivost što se ogleda u prisustvu produkata izobličenja u impulsnom odzivu [3].

Sine Sweep tehnika se tek od nedavno koristi za merenje impulsnog odziva prostorije [4],[5]. Primenjuje se za merenje impulsnog odziva čak i kada nisu ispunjeni uslovi linearnosti i vremenske nepromenljivosti sistema. Tada je najbolje koristiti samo jedno merenje (bez usrednjavanja rezultata) sa veoma dugim pobudnim signalom [4]. Prednost ove tehnike je i to da nije neophodna precizna sinhronizacija između takta uzorkovanja signal generatora i dela mernog sistema za snimanje odziva. Sine Sweep tehnika predstavlja najbolji izbor za merenje impulsnog odziva praznih prostorija sa niskim nivoom buke [2].

MLS i Sine Sweep tehnika su upoređivane sa različitim aspektima primene [2],[5]. U ovom radu je izvršeno njihovo poređenje po pitanju osetljivosti na uticaj tranzijentne buke. Ispitivanje je izvršeno sa teorijskog aspekta, ali i sa praktičnog, primenom simulacija i merenja.

## II. IZDVAJANJE IMPULSNOG ODZIVA U MLS I SINE SWEEP TEHNICI

### A. Kros-korelacija kod MLS tehnike

Odziv prostorije na pobudni signal je rezultat konvolucije ovog pobudnog signala i impulsnog odziva prostorije. U slučaju MLS tehnike, impulsni odziv prostorije se izdvaja iz pomenutog odziva na MLS signal ( $y(n)$ ) kros-korelacijom ovog odziva sa pobudom:

$$\Psi_{xy}(n) = x_{MLS}(n) \Phi y(n) = \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L-1} x_{MLS}(k) y(n+k) \quad (1)$$

gde  $\Phi$  predstavlja kružnu kros-korelaciju koja se normalizuje sa  $L+1$ , pri čemu je  $L$  dužina MLS signala.

Pojava tranzijentne buke kod MLS tehnike značajno menja odziv na MLS signal. Međutim, nakon izdvajanja impulsnog odziva, prisustvo tranzijentne buke nije uočljivo. Ona postaje uniformno raspodeljena duž impulsnog odziva. Ovo je posledica svojstva MLS tehnike da fazu odziva koje komponente izlaznog signala koja nije korelisana sa pobudnim MLS signalom učini slučajnom. Na ovaj način, energija tranzijentne buke se dodaje energiji pozadinskog šuma smanjujući odnos signal/šum.

Ako je tranzijentna buka prisutna u toku merenja MLS tehnikom, odziv na pobudni MLS signal će biti proširen dodatnim članom ove buke  $n_i(n)$ , pa rezultat kros-korelacije postaje:

$$\Psi'_{xy}(n) = x_{MLS}(n) \Phi (y(n) + n_i(n)) = x_{MLS}(n) \Phi y(n) + x_{MLS}(n) \Phi n_i(n) = \Psi_{xy}(n) + a_m(n) \quad (2)$$

Rezultati prezentovani u radu su dobijeni istraživanjem realizovanim u okviru projekta „Analiza uticaja parametara građevinske konstrukcije za potrebe zaštite životne sredine i praktično rešenje lakog zida“, broj 21013, finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Miloš Marković, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-63-523 999; e-mail: milos.markovic@elfak.rs).

Dejan Ćirić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529 301; e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs)

Branko Stojić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-63-248 601; e-mail: branko.stojic@elfak.rs).

Kako je kros-korelacija ekvivalentna filtriranju prilagođenim filtrom, dodatni član se može odrediti kao odziv prilagođenog filtra na signal tranzijentne buke:

$$a_m(n) = x_{MLS}(n) \Phi_{n_t}(n) = \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L-1} x_{MLS}(k) n_t(n+k) = \frac{1}{L+1} [x_{MLS}(-n) * n_t(n)] \quad (3)$$

### B. Linearna dekonvolucija kod Sine Sweep tehnike

Cilj primene Sine Sweep tehnike je potiskivanje neželjenih produkata izobličenja iz rezultata dekonvolucije kojom se izdvaja impulsni odziv merenog sistema. Ovo se postiže zamenom kružne dekonvolucije (korišćene kod metoda koji se baziraju na primeni periodičnih pobudnih signala) linearnom dekonvolucijom direktno primenjenom u vremenskom domenu [5]. Za primenu linearne dekonvolucije u vremenskom domenu, potrebno je generisati inverzni filter  $f_{ss}(t)$  koji može konvertovati ulazni signal  $x(t)$  u zakašnjenu Dirakovu delta funkciju  $\delta(t-t_d)$ . Dekonvolucija impulsnog odziva sistema se onda izvršava preko konvolucije izmerenog odziva na pobudni signal  $y(t)$  sa inverznim filtrom  $f_{ss}(t)$ .

Ukoliko je prisutna tranzijentna buka u procesu merenja Sine Sweep tehnikom, odziv sistema na sweep signal u prisustvu tranzijentne buke,  $y_m(t)$  predstavlja konvoluciju zbira pobudnog signala i signala tranzijentne buke i impulsnog odziva prostorije:

$$(x(t) + n(n)) * h(t) = y_m(t) \quad (4)$$

Dekonvolucijom ovog signala uz pomoć inverznog filtra dobija se impulsni odziv prostorije u prisustvu tranzijentne buke  $h_m(t)$ :

$$y_m(t) * f_{ss}(t) = h_m(t) \quad (5)$$

Uticaj tranzijentne buke na merenje impulsnog odziva Sine Sweep tehnikom se ogleda kroz prisustvo neželjenog signala u impulsnom odzivu. Ovaj signal se javlja u istom trenutku u kom se javlja tranzijentna buka u pobudnom signalu. Trajanje signala greške je znatno duže od trajanja signala buke, pa tako može da dovede do potpuno beskorisnog impulsnog odziva prostorije. Takođe, signal greške doprinosi smanjenju odnosa signal/šum impulsnog odziva prostorije.

### III. METOD ISPITIVANJA

Uticaj tranzijentne buke na merenja impulsnog odziva prostorije MLS i Sine Sweep tehnikama se analizira kroz simulacije, a rezultati se dodatno potvrđuju merenjima u prostoriji.

Za potrebe analize, generisano je više različitih signala tranzijentne buke. Ovi signali su različitog tipa, dužine trajanja i nivoa. Kako bi se što bolje ispitaio uticaj ovakvih signala na rezultat merenja, u različitim simulacijama je vršena promena samo jedne karakteristike signala tranzijentne buke, dok su ostale bile konstantne. Parametri koji su analizirani su mesto pojavljivanja tranzijentne buke u pobudnom signalu, dužina, nivo i tip signala buke.

Simulacije su podeljene u tri grupe. U prvoj grupi, označenoj kao Simulacije I, impulsni odziv merenog sistema (prostorije) je predstavljen Dirakovim impulsom. Isti

signal tranzijentne buke se dodaje pobudnom MLS i sweep signalu i nakon konvolucije sa impulsnim odzivom (Dirakov impuls) dobija se odziv prostorije na pobudni MLS odnosno sweep signal u prisustvu tranzijentne buke. Ovako dobijeni signal se, kod MLS tehnike, procesom kros-korelacije sa pobudnim MLS signalom transformiše u impulsni odziv prostorije sa tranzijentnom bukom. U slučaju Sine Sweep tehnike, impulsni odziv prostorije sa tranzijentnom bukom se dobija nakon procesa dekonvolucije uz pomoć odgovarajućeg, unapred generisanog, inverznog filtra. Dobijeni signali se porede međusobno i sa impulsnim odzivom prostorije bez tranzijentne buke (Dirakov impuls) i donose zaključci o uticaju tranzijentne buke.

U drugoj grupi, Simulacije II, ponovljen je postupak iz Simulacija I, s tom razlikom što je umesto Dirakovog impulsa, za impulsni odziv prostorije uzet simulirani odziv prostorije dobijen simulacionim algoritmom [7].

Treća grupa simulacija, Simulacije III, uvodi problem nelinearnosti mernog sistema. Pobudni signal (MLS tj. sweep) se propušta kroz blok nelinearnosti koji je modeliran polinomom koji predstavlja izobličenja. Nakon izlaska iz ovog bloka, signal prolazi kroz napred opisan postupak za dobijanje impulsnog odziva sa tranzijentnom bukom.

Uticaj tranzijentne buke je ispitivan i u realnim uslovima, odnosno u merenjima. Merenja su izvršena u Laboratoriji za Elektroakustiku Elektronskog fakulteta u Nišu. Postupak je podeljen u dva dela. U prvom delu, pobudni (MLS ili sweep) signal i signal tranzijentne buke su emitovani sa istog mesta (konvoluiraju se sa istim impulsnim odzivom prostorije). Ovo je redak slučaj u praksi, pa zbog toga drugi deo merenja koristi tranzijentnu buku nastalu na prirodan način na različitim mestima u prostoriji. (kašalj, lupanje vratima, udarac kutije o sto, itd.).

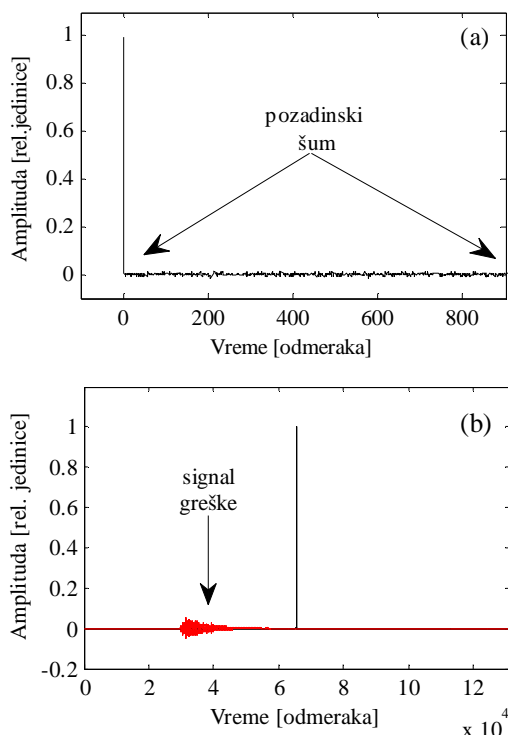
## IV. REZULTATI SIMULACIJA I MERENJA

### A. Simulacije I

U prvom delu simulacija se koristi Dirakov impuls kao impulsni odziv prostorije. Ovaj impuls nije u pravom smislu impulsni odziv, ali se može iskoristiti za ispitivanja zbog pogodnosti njegovog oblika za analize. Kao signal tranzijentne buke se koristi generisani signal sa Gausovom funkcijom gustine verovatnoće. Pobudni signal kod MLS tehnike je reda 16 (65536 odmeraka). Zbog lakšeg poređenja rezultata, pobudni signal kod Sine Sweep tehnike je sweep-ovana sinusoida iste dužine. Rezultati dobijeni simulacijama potvrđuju teorijsku analizu. Kod MLS tehnike, tranzijentna buka koja se javlja u procesu merenja, u impulsnom odzivu se transformiše u pozadinski šum Sl.1.(a). Kod Sine Sweep tehnike, ova buka izaziva pojavu signala greške u impulsnom odzivu Sl.1.(b). Trajanje ovog signala greške je znatno duže od trajanja tranzijentne buke. U oba slučaja, tranzijentna buka doprinosi smanjenju odnosa signal/šum.

Analizirana je promena parametara tranzijentne buke. Pri promeni dužine signala buke, obe tehnike daju slične rezultate, pri čemu je zavisnost oblika signala greške i njegov uticaj na odnos signal/šum od dužine buke

složenija kod Sine Sweep tehnike. Generalno se može reći da se pri svakom udvostručavanju dužine tranzijentne buke, odnos signal/šum smanji za oko 3 dB. U slučaju Sine Sweep tehnike povećava se dužina signala greške i to u delu gde signal greške takođe ima Gausovu funkciju gustine verovatnoće, nakon čega sledi eksponencijalno opadanje (impulsni karakter), Sl.2. Takođe, povećanje nivoa tranzijentne buke za 6 dB vodi smanjenju odnosa signal/šum impulsnog odziva za približno istu vrednost u decibelima. Kod Sine Sweep tehnike, povećanje nivoa tranzijentne buke izaziva povećanje nivoa signala greške.



Sl. 1. Impulsni odziv prostorije kada je prisutna tranzijentna buka kod tehnika: MLS (a), i Sine Sweep (b).

Pojava tranzijentne buke u različitim trenucima trajanja pobudnog signala kod ove dve tehnike merenja, vodi ka sličnim rezultatima, ali posledice ovoga mogu biti različite. U slučaju MLS tehnike, promena položaja dodatog signala buke za određeni broj odmeraka vodi samo do kružnog pomeranja pozadinskog šuma u impulsnom odzivu za isti broj odmeraka. Odnos signal/šum impulsnog odziva se smanjuje za istu vrednost bez obzira na to u kom trenutku se tranzijentna buka javlja.

Kod Sine Sweep tehnike, promena položaja dodatog signala buke ne utiče bitno na impulsni odziv sve dok signal greške počinje i završava se ispred samog impulsnog odziva. Problem nastaje kada je trajanje signala greške takvo da se on završava nakon početka linearnog odziva. Na taj način, ovaj neželjeni signal utiče na reverberaciono opadanje impulsnog odziva i može ga učiniti totalno nekorisnim za dalju obradu.

### B. Simulacije II

Umesto Dirakovog impulsa, u ovom delu simulacija, koristi se impulsni odziv prostorije dobijen simulacionim

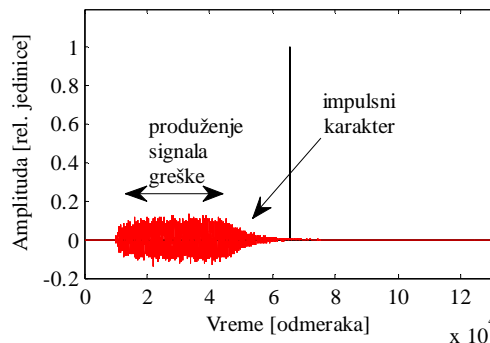
algoritmom. U proces analize je uključena i tranzijentna buka impulsnog tipa.

Promena oblika impulsnog odziva prostorije ne utiče na zaključke dobijene u Simulacijama I koji važe i ovde. Osnovna razlika je da energija impulsnog odziva sada postoji u opsegu mnogo širem od jednog odmerka. Kod MLS tehnike, tranzijentna buka i ovde uzrokuje samo promenu pozadinskog šuma (njegovo povećanje) i smanjuje odnos signal/šum, dok se kod Sine Sweep tehnike javlja signal greške koji se ponaša u skladu sa ranije opisanim pravilima.

Prisustvo signala tranzijentne buke impulsnog tipa daje iste rezultate kao prisustvo signala sa Gausovom funkcijom gustine verovatnoće. Jedina razlika je u tome da se, zbog manje energije koju ovakav signal nosi, u manjoj meri smanjuje odnos signal/šum impulsnog odziva prostorije.

### C. Simulacije III

U trećem delu simulacija, pored prisustva tranzijentne buke, uvode se i efekti izobličenja na način kako je to prezentovano u [6]. Rezultati ovih simulacija su veoma slični rezultatima iz Simulacija II. Uvođenje izobličenja u prisustvu tranzijentne buke ne sprečava izdavanje impulsnog odziva ni kod jedne ni kod druge tehnike. U slučaju MLS tehnike, posledica izobličenja je dodavanje dodatne energije „smetnje“ energiji pozadinskog šuma koja dodatno smanjuje odnos signal/šum. Kod Sine Sweep tehnike, produkti nelinearnosti u impulsnom odzivu se nalaze ispred linearnog odziva, u delu koji nije od značaja i nikako ne utiču na pojavu signala greške koji je posledica tranzijentne buke. Kao i u prethodnom, i u ovom delu rezultati promena parametara tranzijentne buke prate isti trend opisan u Simulacijama I.



Sl. 2. Impulsni odziv sa signalom greške kod Sine Sweep tehnike kada je prisutna tranzijentna buka sa Gausovom funkcijom gustine verovatnoće dužine 35000 odmeraka.

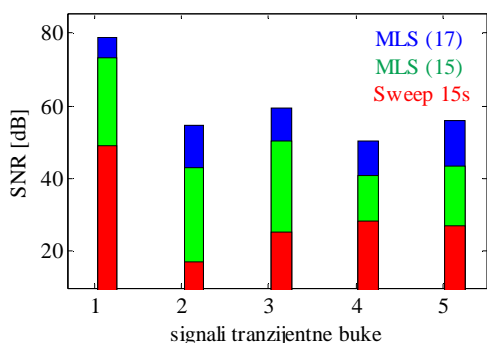
### D. Rezultati merenja

Za potrebe merenja je generisan signal kašlja dužine 8300 odmeraka (0,38 s, pri frekvenciji odmeravanja od 22,05 kHz). Ovaj signal je emitovan sa istog mesta sa kog se emituje pobudni signal koristeći isti sistem za reprodukciju. Pobudni signali su dužine MLS reda 16 zbog komparativne analize sa rezultatima simulacija. Merenja daju slične rezultate kao simulacije. Kod MLS tehnike, pojava tranzijentne buke dovodi samo do smanjenja

odnosa signal/šum. Razlike u rezultatima uglavnom potiču od činjenice da izmereni impulсни odziv, za razliku od simuliranog, već sadrži pozadinski šum. Tako, odnosi signal/šum impulsnih odziva dobijenih merenjima su manji od onih dobijenih simulacijama nezavisno od tranzijentne buke [6]. Ovo poslednje važi i za Sine Sweep tehniku. Pored toga, kod ove tehnike se, kao i do sada, javlja signal greške koji se ponaša identično kao u simulacijama.

Pored tranzijentne buke reprodukovane preko zvučnika, uticaj ove buke se ispituje u merenjima koristeći i buku nastalu na prirodan način. Potvrđuje se da tranzijentna buka kod MLS tehnike nema nikakvog uticaja na opadanje impulsnog odziva već samo na odnos signal/šum, Sl.3.

Takođe, kod Sine Sweep tehnike se javlja signal greške koji može da naruši reverberaciono opadanje impulsnog odziva ukoliko mu se kraj nalazi nakon početka lineanog odziva. Kao pobudni signali kod MLS tehnike su korišćeni MLS signali reda 17 i 15, a kod Sine Sweep tehnike sweep-ovana sinusoida dužine 15 s. Odnosi signal/šum impulsnih odziva dobijenih korišćenjem ovih signala bez prisustva tranzijentne buke su 78,8 dB, 72,9 dB, i 49,8 dB, respektivno (1). Pri tome, pomenuti odnosi za dve tehnike su određeni na različite načine (kod MLS tehnike kao odnos odziva signala na pobudni MLS i šuma iz impulsnog odziva [6], a kod Sine Sweep tehnike direktno iz impulsnog odziva [7]), tako da oni ne mogu međusobno da se porede. Međutim, može se porediti smanjenje odnosa signal/šum koje se dobija usled tranzijentne buke. Ona je generisana na prirodan način i to: lupanjem vrata od ormara (2), pljesak dlanovima (3), udarac drvene kutije o sto (4) i kašalj (5). Pojava tranzijentne buke tokom merenja vodi do smanjenja odnosa signal/šum za približno 19 dB do 28 dB za MLS signal reda 17 (plava boja na Sl.3), odnosno 23 dB do 32 dB za MLS signal reda 15 (zeleno boja na Sl.3). Kod sweep-a dužine 15 s ovo smanjenje iznosi 20 do 33 dB (crvena boja na Sl.3).



Sl. 3. Odnos signal/šum impulsnih odziva dobijenih merenjima tokom kojih se javlja tranzijentna buka nastala na prirodan način

## V. ZAKLJUČAK

Prisustvo tranzijentne buke pri merenju impulsnog odziva prostorije MLS tehnikom nema nikakvog uticaja na njegovo opadanje. Takva buka se postupkom kroskorelacije transformiše u stacionarni pozadinski šum. Smanjenje odnosa signal/šum impulsnog odziva je

direktno vezano za energiju tranzijentne buke, što je pokazano kroz promenu nekoliko parametara buke (dužina, nivo i vrsta). Ipak, i pored smanjenja odnosa signal/šum, neosetljivost na tranzijentnu buku predstavlja značajnu prednost MLS tehnike u odnosu na druge tehnike [1].

Prisustvo tranzijentne buke pri merenju impulsnog odziva prostorije Sine Sweep tehnikom uzrokuje pojavu signala greške u impulsnom odzivu. Signal greške se javlja u istom trenutku u kom se javlja tranzijentna buka u pobudnom sweep signalu. U zavisnosti od karakteristika signala tranzijentne buke (talasni oblik), mogu se kontrolisati parametri signala greške. Povećanje dužine trajanja i nivoa tranzijentne buke, vodi povećanju dužine i nivoa signala greške. Signal greške se može javiti pre impulsnog odziva prostorije, ali i u delu opadanja impulsnog odziva, čime se značajno utiče na rezultate merenja. Sine Sweep tehnika nije imuna na tranzijentnu buku u onoj meri u kojoj je to MLS tehnika. Međutim, ako su ispunjeni određeni uslovi u vezi sa pojavom tranzijentne buke, mogu se dobiti impulсни odzivi zadovoljavajućeg kvaliteta [7].

## LITERATURA

- [1] D. Ćirić, *Doprinos razvoju postupka merenja i obrade impulsnog odziva prostorije pri određivanju akustičkih karakteristika*, doktorska disertacija, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, 2006.
- [2] G.-B. Stan, J.-J. Embrechts, and D. Archambeau, "Comparison of different impulse response measurement techniques," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, no. 4, pp. 249-262, 2002.
- [3] D.D. Rife and J. Vanderkooy, "Transfer-function measurement with maximum-length sequences", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 37, no. 6, pp. 419-444, 1989
- [4] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," in *Proc. 108th Convention Audio Eng. Soc.*, abstract in *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 48, no. 4, p. 350, 2000, preprint 5093.
- [5] S. Müller and P. Massarani, "Transfer-function measurement with sweeps," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, no. 6, pp. 443-471, 2001.
- [6] D. Ćirić and M. Milošević, "Transient noise influence in MLS measurements of room impulse response," *Acta Acustica un. with Acustica*, vol. 91, no. 1, pp. 110-120, 2005.
- [7] M. Marković, D. Ćirić, D. Stevanović, "Uticaj tranzijentne buke na merenje impulsnog odziva prostorije primenom Sine Sweep tehnike", u *Zborniku radova 53.konferencije za ETRAN*, Vrnjačka Banja, Srbija, jun 2009.

## ABSTRACT

Transient noise influence in impulse response measurements using MLS and Sine Sweep techniques is analyzed here. The influence of change of transient noise parameters (duration, level, type and different position in the excitation signal) is investigated here using computer simulations and measurements. The impulse responses obtained with and without transient noise are mutually compared. The results point out that MLS technique is immune to this kind of noise. On the other hand, in Sine Sweep technique, certain requirements have to be fulfilled in order to prevent that the unwanted signal appearing in impulse response affects the impulse decay. In both techniques, presence of transient noise leads to decreasing of signal-to-noise ratio of the impulse response.

## COMPARISON OF TRANSIENT NOISE INFLUENCE IN MLS AND SINE SWEEP TECHNIQUE

Miloš Marković, Dejan Ćirić, Branko Stojić