

# Akustička merenja softverom EASERA

Vladimir Cerić / Mirko Milošević / Ognjen Tomić

SP Audio i video tehnologije

Visoka škola elektrotehnike i računarstva

Beograd, Srbija

[ceric@viser.edu.rs](mailto:ceric@viser.edu.rs) / [mirko.milosevic@viser.edu.rs](mailto:mirko.milosevic@viser.edu.rs) / [gtomicognjen@gmail.com](mailto:gtomicognjen@gmail.com)

**Sadržaj**—U radu je objašnjen proces akustičkih merenja upotrebom softverskog paketa EASERA na primeru studije slučaja - multifunkcijske sale: konferencijskog i bibliotečkog prostora. Koristeći softver EASERA moguće je doći do rezultata akustičkih merenja koji se tiču vremena reverberacije, topline, brilijantnosti, jasnoće, razumljivosti govora i intimnosti datog prostora. Ovi rezultati omogućavaju uvid u zvučnu funkcionalnost prostora, kao i osnovni pokazatelj za njegovu dodatnu akustičku obradu s ciljem stvaranja optimalne zvučne slike, u skladu sa standardima koji su propisani njegovom višenamenskom funkcionalnošću.

**Ključne reči**—Softver EASERA; akustička merenja; razumljivost govora.

## I. UVOD

U poslednjih nekoliko decenija karakterizacija akustičkih svojstava i subjektivnog doživljaja odziva prostorija je bazirana pre svega na analizi rezultata merenja njihovog impulsnog odziva. Uopšteno gledano, impulсни odziv bilo kog linearnog sistema je talasni oblik fizičke veličine od interesa za pojavu koja se analizira. Analiza se vrši na izlazu sistema, kada se na njegov ulaz dovede idealan impuls, tzv. Dirakova delta funkcija. Impulсни odziv prostorije (akustički impulсни odziv), je definisan kao promena pritiska u vremenu na mestu prijemnika u prostoriji, koja nastaje pri impulсноj pobudi prostorije. Ukoliko se prostorija tretira kao linearan i vremenski nepromenljiv akustički sistem, ovakav odziv teoretski u potpunosti opisuje njeno ponašanje i osobine u akustičkom smislu. Pri tome treba imati u vidu da karakteristike dobijene na taj način zavise od pozicije izvora impulsa i prijemnika u prostoriji.

Analiza impulsnog odziva prostorije počinje od trenutka u kojem je izvršena pobuda Dirakovim impulsom. Taj trenutak se usvaja za početni ( $t=0$  na vremenskoj osi). Sa aspekta značaja za subjektivni doživljaj zvučnog polja, odziv prostorije se može podeliti na tri segmenta: direktan zvuk (koji do prijemnika stiže nakon vremena  $t_d$ ); rane refleksije i reverberaciju (gustina impulsnog odziva postaje znatno veća i nije moguće razdvajanje refleksija kao posebnih događaja). Pri merenjima, sistemi se u praksi najčešće pobuđuju sledećim tipovima pobudnih signala: impulsom; nizom prostih sinusnih tonova (engl. *sweep*) koji kontinualno u vremenu prebrisavaju ceo opseg učestanosti od interesa; širokopojasnim šumom.

Odziv sistema na neimpulсни tip se beleži i na neki način poredi sa originalnim pobudnim signalom, na osnovu čega se, uz primenu odgovarajućih dekonvolucionih algoritama, izračunava impulсни odziv. Naravno da se i pri ovakvoj vrsti

analize uvek podrazumeva postojanje određenog nivoa šuma koji utiče na preciznost merenja. Treba imati u vidu i činjenicu da u praksi prilikom merenja uvek treba računati na postojanje određene doze nelinearnosti i vremenske promenljivosti merenog sistema, što takođe utiče na krajnji ishod merenja. Tipičan merni sistem baziran na računaru podrazumeva postojanje generatora takta koji ima za cilj da obezbedi potpunu sinhronizaciju između emitovanog signala pobude i snimanog signala odziva. Dve metode, koje se danas koriste u većini slučajeva kada je potrebno odrediti akustički impulсни odziv, su MLS [1] i SineSwept [2] tehnika.

Vremenom je definisan veći broj parametara koji služe za potpuniju procenu njihovog akustičkog kvaliteta, ali još uvek nije uspostavljena nedvosmislena veza između subjektivnih i objektivnih parametara prostorija. Neki od osnovnih subjektivnih, odnosno objektivnih parametara koji akustički opisuju prostor i koji se mogu izvesti iz impulsnog odziva, a koji će biti predmet razmatranja i merenja ovog rada su prikazani u Tabeli I [3]:

TABELA I. AKUSTIČKI PARAMETRI

Naziv parametra	Jedinica parametra
Reverberantnost	EDT, T10, T20, T30
Boja	T(f)
Toplina	BR (Bass ratio)
Brilijantnost	TR (Treble ratio)
Jasnoća	C <sub>50</sub> , C <sub>80</sub>
Razumljivost govora	AL <sub>cons</sub> , STI, RaSTI
Intimnost	IDTG

## II. STUDIJA SLUČAJA

Za potrebe merenja odabrana je multifunkcijska sala, simetričnog oblika površine 113,1 m<sup>2</sup>, odnosno zapremine 339,3 m<sup>3</sup> čija je namena da bude svečana sala i biblioteka. U tom smislu se i sama sala koristi u više svrha, kao učionica, čitaonica i, kada potrebe nalažu to, kao sala za predstave i manje koncerte. U prednjem delu sale se nalazi bina površine 26 m<sup>2</sup>, koja na podu ima parket, na zidu sa desne strane prozor prekriven zavesom, sa leve strane pokretan zid od drveta, tzv. harmonika. Duž cele leve strane zida se nalaze police od punog drveta, pune knjiga, koje svakako utiču na apsorpciju akustičke energije najnižeg frekvencijskog opsega, a preko puta na desnom zidu su prozori ukupne površine 32 m<sup>2</sup>, koji su prekriveni teškim zavesama, koja utiče na apsorpciju akustičke energije višeg frekvencijskog opsega. Na podu prostorije se nalazi parket površine 87,1 m<sup>2</sup> koji je jako reflektujući u akustičkom smislu. Na zadnjem zidu se takođe nalaze police sa

knjigama koje su prekrivene istim teškim zavesama koje se nalaze na prozorima. Prvi utisak koji ova sala ostavlja jeste da je jako prigušena u akustičkom smislu.

### III. MERENJA POMOĆU SOFTVERA EASERA

Kao što je u uvodu navedeno, pri merenju impulsnog odziva akustičkih sistema, prostorija, treba imati u vidu da dobijeni rezultati zavise od karakteristike prostorije i konkretne pozicije predajnika u okviru prostorije.

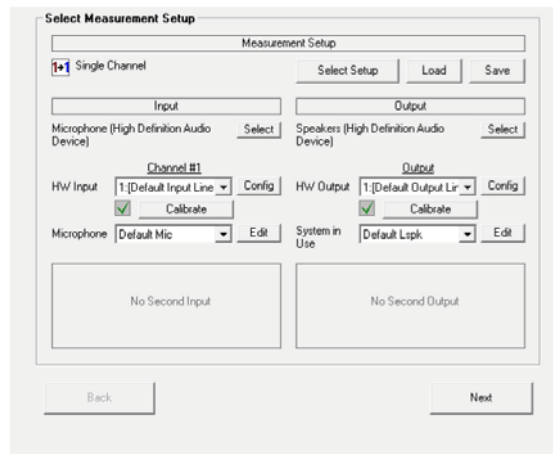
EASERA [4] je softver nemačke kompanije SDA (Software Design Ahnert GmbH) [5] namenjen merenju, računanju i analiziranju. Osnova ideja bila je koncipirana upravo na činjenici da se iz impulsnog odziva prostorije mogu izračunati ostali bitni akustički parametri koji opisuju prostor u akustičkom smislu. Tako EASERA meri impulsni odziv prostorije nakon čega program sam, pomoću svojih algoritama, izračunava ostale akustičke parametre kao što su: reverberantnost, boja, toplina, itd. Program EASER-a se sastoji iz četiri modula:

- Mernog modula (*Measurement module*)
- Generators signala (*Signal generator*)
- Analizatora u realnom vremenu (*Real time analyzer*)
- Modula za obradu rezultata (*Post processing module*)

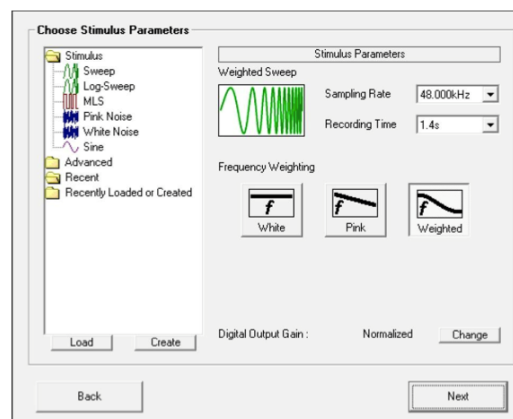
Softver EASERA nudi brojne mogućnosti, a grafički interfejs je pregledan i funkcionalan. Kao što je prikazano na Sl. 1, moguće je odabrati postojeći audio fajl nekog od ranijih merenja. Potom opciju *Measurement* za pokretanje novih merenja, opciju *Load Measurement Setup* za učitavanje već postojećih podešavanja za merenja. Opciju *Real Time Analysis* koja podrazumeva analizu zvuka i merenja u realnom vremenu i opciju *Open File for Waterfall* za kreiranje tzv. *Waterfall* dijagrama iz već postojećih audio fajlova.



Slika 1. Izgled grafičkog interfejsa programa



Slika 2. Izgled prozora *Measurement*



Slika 3. Prozor za odabir vrste signala

Odabirom opcije *Measurement* otvara se novi ekran za podešavanje narednog merenja, jer od adekvatnog i tačnog podešavanja zavise rezultati merenja.

Ovde se vrše ulazno-izlazna podešavanja samog programa. Dat je izbor zvučne karte (u ovom slučaju je korišćena *Digigram VX pocket V2*) kroz koju se obavlja AD/DA konverzija, tj. emitovanje pobudnih signala *Output*, i snimanje impulsnog odziva *Input*. U ovom prozoru za podešavanja vrši se još izbor tipa mernog mikrofona i pobuđivača tj. zvučnika koji će emitovati taj pobudni signal. Pod opcijama *Config* vrši se kalibracija kako mernog mikrofona, tako i pobudnog zvučnika. Kalibracija je veoma važna, jer od nje najviše zavisi tačnost merenja. Ova podešavanja mogu i da se sačuvaju pod pretpostavkom da će se ista koristiti i za buduća merenja.

Sledeći prozor, prikazan na Sl. 3, daje mogućnost odabira *MLS* ili *Pink Noise* signala. Ovde, pored odabira pobudnih signala, imamo i podešavanja za učestanost odabiranja kao i dužinu trajanja sekvence pobudnog signala. Po standardu programa, pri izboru pobudnog signala *MLS* podrazumeva se *White Frequency Weighting*, odnosno za *Pink Noise* - *Pink Frequency Weighting*. Razlog zašto su birana dva različita tipa pobudnog signala je da bi se dobila što veća tačnost samih rezultata merenja. Nakon toga vrši se izbor ulazno-izlaznih nivoa *Adjust Levels*, nakon čega je moguće otpočeti merenje.

Pod opcijom *Measurement* program pita gde će se merenja skladištiti uz određivanje broja ponavljanja, kako bi program mogao da izvede srednju rezultujuću vrednost. Za potrebe ovog merenja izvršeno je tri ponavljanja.

#### A. Opis mernog sistema

Merni mikروفon koji je upotrebljen za merenja je omnidirekcionni *Neutrik MiniSPL*. Za reprodukovanje pobudnih signala korišćen je samo jedan dvosistemski zvučnik *dB Tehnology Opera Live 405*. Za AD/DA konverziju je korišćena *Digigram VX pocket V2* zvučna karta.

Merenje je na više mernih pozicija i korišćeno je više vrsta pobudnih signala. Mikروفon je izmeštán iz tačke u tačku u datoj prostoriji, da bi se dobila homogenost u merenju. Pri završetku merenja rezultati su sačuvani na računar, a potom su iščitavani.

#### B. Vreme reverberacije

Program automatski računa vreme reverberacije iz impulsnog odaziva prostorije, što je dato na Sl. 4. U Tabelema II i III prikazani su rezultati vremena reverberacije po oktavama. Uzimajući u obzir srednju rezultujuću vrednost vremena reverberacije T30 (0,65 s) kao najpribližniju vrednost vremenu T60, kao i zapreminu sale od 339,3 m<sup>3</sup> iz tabela može se zaključiti da je izmereno vreme reverberacije pod postojećim okolnostima manje od preporučenog vremena reverberacije za sale takvih namena, a koje iznosi 0,7 - 0,9 s [6] tj. manje je za 0,05 s.

TABELA II. VREME REVERBERACIJE PO OKTAVAMA (1. DEO)

f,T	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
EDT	0,95	0,68	0,53	0,45	0,56
T10	1,02	0,51	0,48	0,47	0,67
T20	0,99	0,71	0,56	0,51	0,61
T30	0,93	0,71	0,58	0,56	0,65

TABELA III. VREME REVERBERACIJE PO OKTAVAMA (2. DEO)

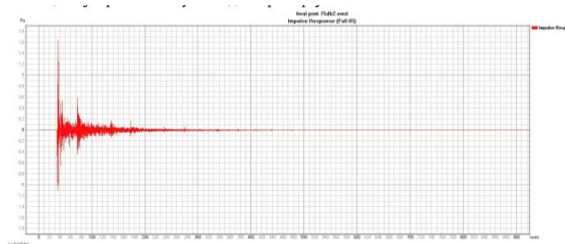
f,T	4 kHz	8 kHz	0,25 – 2 kHz	0,5 – 4 kHz
EDT	0,46	0,52	0,56	0,50
T10	0,60	0,52	0,53	0,55
T20	0,60	0,47	0,60	0,57
T30	0,65	0,50	0,62	0,61

#### C. Toplina – Bass Ratio (BR)

Toplina se definiše odnosom vremena reverberacije na niskim prema vremenu reverberacije na srednjim frekvencijama. Mera topline BR je data relacijom:

$$BR = [T20(125) + T20(250)] / [T20(500) + T20(1k)]$$

Subjektivni doživljaj topline zvuka prostorije postiže se povećanjem vremena reverberacije na niskim frekvencijama u odnosu na srednje frekvencije. Da bismo izračunali BR, potrebne su nam vrednosti za T20 na sledećim frekvencijama: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz i 1000 Hz.



Slika 4. Impulzni odziv multifunkcijske sale

Nakon što smo označene vrednosti uvrstili u izraz dobili smo sledeći rezultat: BR = 1,58.

Uzimajući u obzir dobijeni rezultat, i poredeći ga sa preporučenim rezultatima koji za govor iznose BR<sub>opt</sub> ≈ 1,0 do 1,3, dok je za muziku BR<sub>opt</sub> ≈ 0,9 do 1,0. Ovaj prostor možemo uvrstiti u akustički “toplije” prostorije.

#### D. Brillijantnost – Treble Ratio (TR)

Subjektivni doživljaj brilijantnosti prostorije se postiže kontrolisanim padom početnog vremena reverberacije T10 na visokim frekvencijama. Mera brilijantnosti data je relacijom:

$$TR = [T10(2k) + T10(4k)] / [T10(0.5k) + T10(1k)]$$

Da bismo izračunali TR, potrebne su nam vrednosti za T10 na sledećim frekvencijama: 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz i 4 kHz.

Nakon što smo označene vrednosti uvrstili u izraz, dobili smo sledeći rezultat: TR = 1,33. Iz ovog rezultata možemo da zaključimo da je brilijantnost povišena u odnosu na preporučene vrednosti TR<sub>opt</sub> ≈ 0,8 do 0,9.

#### E. Intimnost

Intimnost predstavlja subjektivni osećaj veličine prostorije. Mera ovog osećaja je kašnjenje prve refleksije ITDG ili ITD (*initial time delay gap, initial time delay*). Njegova optimalna vrednost bi trebalo da bude manja od 20 ms.

Razlika između prvog impulsa i prvih ranih refleksija iznosi 6,6 ms. Poredeći ovaj rezultat sa optimalnim vremenom kašnjenja prve refleksije koje iznosi 20 ms [7] možemo da kažemo da je ova sala akustički intimna.

#### F. Jasnoća

Jasnoća je parametar koji karakteriše vremensko razlikovanje tonova pojedinih instrumenata (ili grupe instrumenata) koji zvuče jednovremeno, bez obzira na prisutnu reverberaciju prostorije. C50 i C80 su parametri koji predstavljaju odnos između akustičke energije koja do prijemnika stiže u početnom delu impulsnog odziva i energije koja stiže posle definisanog vremenskog trenutka. Razlika između ova dva parametra je samo u definisanju vremenske granice koja deli ranu i kasnu refleksiju, koja kod C50 iznosi 50 ms (koristi se za procenu jasnoće govora), a kod C80 iznosi 80 ms (koristi se za muziku). Objektivna mera jasnoće je indeks jasnoće C izražen u dB. Iz rezultata vidimo (C50 = 8 dB i C80 = 11 dB), a poredeći ih sa donjom prihvatljivom granicom C50 ≥ -2 dB, odnosno sa optimalnom vrednošću C80<sub>opt</sub> = 0 ± 1.6dB, donosimo zaključak da je jasnoća za govor odlična, dok je za muziku iznad optimalne.

### G. Razumljivost govora

Za ocenu razumljivosti govora postoji više objektivnih parametara. Predmet ovog rada biće najčešće upotrebljavani objektivni parametri koji karakterišu subjektivni osećaj razumljivosti govora. Objektivni parametri za razumljivost govora su  $AL_{\text{cons}}$ , STI i RASTI [8]. Kao kriterijum razumljivosti govora Peutz je uveo procenat nerazumljivih suglasnika  $AL_{\text{cons}}$  (*Articulation Loss of Consonants*).  $AL_{\text{cons}}$  zavisi od odnosa direktnog i reflektovanog zvuka, vremena reverberacije prostorije i odnosa signal/šum u prostoriji. Isti autor (Peutz) je utvrdio da je razumljivost govora prihvatljiva ako je  $AL_{\text{cons}} \leq 15\%$ . Za razumljivost je merodavan ne apsolutni nivo šuma u prostoriji, već odnos signal/šum ( $S/N$ ). Što je ovaj odnos veći razumljivost je bolja sve do vrednosti odnosa signal/šum od 25 dB. Iznad ovog iznosa razumljivost ne zavisi od odnosa signal/šum. Sa istog dijagrama se vidi da za prostorije kod kojih je  $T \geq 1,6$  s odnos  $S/N$  treba da bude najmanje 25 dB. Međutim, kod prigušenijih prostorija ( $T < 1,6$  s) za dobru razumljivost odnos signal/šum može biti i znatno manji od 25 dB. Tako, u protsoriji čije je vreme reverberacije 1 s, možemo imati  $AL_{\text{cons}} = 15\%$  pri  $S/N = 17$  dB. Gubitak razumljivosti suglasnika  $AL_{\text{cons}}$  je veći što je slušalac udaljeniji od izvora odnosno, što je manji odnos direktnog i reflektovanog zvuka. Ovo pravilo važi do rastojanja  $D_L = 3,16 D_c$ , gde je  $D_c$  kritično rastojanje izvora zvuka. Preko rastojanja  $D_L$  razumljivost je konstantna i ne zavisi od odnosa direktnog i reflektovanog zvuka već samo od vremena reverberacije prostorije  $T$ . Na osnovu prethodnog je jasno da je za prostorije u kojima je odnos signal/šum veći od 25 dB i  $T \leq 1,6$ s razumljivost prihvatljiva na bilo kom rastojanju od izvora. Međutim, ako je  $T > 1,6$  s, razumljivost će biti prihvatljiva samo za rastojanja  $D_x < D_L$ , bez obzira što je odnos  $S/N$  veći od 25 dB.

Procenat nerazumljivih suglasnika u funkciji rastojanja od neusmerenog izvora i vremena reverberacije prostorije, može se aproksimirati sledećim numeričkim izrazima:

$$AL_{\text{cons}} = \frac{200T^2D_x^2}{x} + a[\%], D_x < D_L$$

$$AL_{\text{cons}} = 9T + a[\%], D_x \geq D_L$$

gde je:  $T$  - vreme reverberacije prostorije (s),  $V$  - zapremina prostorije ( $m^3$ ),  $D_x$  - rastojanje od izvora do slušaoca (m),  $a$  - korekciona konstanta koja izražava uticaj subjektivnih osobina govornika i slušaoca. Obično se u praksi uzima da je  $a = 0$  i podrazumeva se da je odnos  $S/N \geq 25$  dB. Usvojena norma vrednosti  $AL_{\text{cons}}$  za dobru tj. lošu razumljivost izgleda ovako:

- $AL_{\text{cons}} \leq 3\%$  idealna razumljivost
- $AL_{\text{cons}} = 3$  to  $7\%$  veoma dobra razumljivost
- $AL_{\text{cons}} = 7$  to  $15\%$  dobra razumljivost
- $AL_{\text{cons}} > 15$  to  $35\%$  loša razumljivost
- $AL_{\text{cons}} > 35\%$  veoma loša (granična vrednost  $15\%$ ).

### IV. ZAKLJUČAK

Zvučno polje u prostoriji je izuzetno kompleksna fizička pojava koju je teško do kraja egzaktno matematički modelovati. Razlog za ovo je postojanje velikog broja nezavisnih parametara koji utiču na njegovo formiranje. Zbog ovakve situacije akustička merenja u prostorijama imaju izuzetan značaj, kako za razumevanje fizičkih pojava, tako i za njihovo dijagnostikovanje i verifikaciju rezultata realizovanih korekcija.

Akustička merenja se mogu klasifikovati u različite kategorije, od kojih svaka ima određeni značaj zavisno od konkretne primene. Ipak, velika upotrebna vrednost i svakodnevna praksa merenja impulsnog odziva postavljaju ovaj tip merenja u prvi plan. Uloga koju ima impulsni odziv prostorije, proističe pre svega iz činjenice da on kompletno karakteriše prostoriju kao linearni prenosni sistem, odnosno prenosni put između predajnika i prijemnika. Zahvaljući tome, najveći broj objektivnih akustičkih parametara koji se koriste za opisivanje karakteristika prostorija i korelaciju sa subjektivnim impresijama određuje se na osnovu impulsnog odziva prostorije.

Istraživanja u akustici malih prostorija u poslednje vreme sve više dobijaju na značaju. Kao rezultat tih istraživanja jasno je ustanovljeno da objektivni akustički parametri izvedeni iz impulsnog odziva, koji se danas koriste, mahom imaju veliku upotrebnu vrednost kada se radi o proceni kvaliteta akustičkih svojstava po gabaritu srednjih prostora. U ove spadaju i višenamenski prostori kakvi se danas najčešće sreću. Takva činjenica nimalo ne čudi, ukoliko se zna da su svi ti parametri istorijski evoluirali iz analiza i merenja rađenih u prostorima znatno većih zapremina, u kojima važe pretpostavke na osnovu kojih se formira zvučno polje i na osnovu kojih se definišu merni postupci i procedure.

### LITERATURA

- [1] BRADLEY, J.S., Optimizing the Decay range in Room Acoustics Measurements using Maximum-Length-Sequence Techniques. *J. Audio Engineering Soc.*, **44** (1996), pp. 266-273
- [2] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73. 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
- [3] Drinčić, D. (2010) Akustički dizajn prostorija i Ozvučavanje – autorizovane skripte, Beograd: VIŠER
- [4] Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis <http://easera.afmg.eu>
- [5] SDA Software Design Ahnert GmbH, Berlin, Germany <http://www.sda-softwaredesign.de>
- [6] Kurtović H. (2002) Akustika za arhitekte. Beograd, Akademska Misao
- [7] Mijić, M. (2007) Akustika. Autorizovana skripta, Beograd, ETF
- [8] Pravica P, Drinčić, D. (2006) Elektroakustika, Beograd, VIŠER

#### ABSTRACT

This paper explains the process of acoustic measurements using the software package EASERA in the example case study - multifunction hall: a conference room and library. Using the software can be easier to get to the results of the acoustic measurements related to the reverberation time, warmth, brilliance, clarity, intelligibility of speech and the intimacy of a given space. These results provide insight into the functionality of the acoustic space, as well as the main

indicator for its additional acoustical treatment in order to create an optimal sound image, in accordance with the standards prescribed by purposeful functionality of this type of halls.

#### **ACOUSTICAL MEASUREMENTS WITH EASERA SOFTWARE**

Vladimir Cerić / Mirko Milošević / Ognjen Tomić