Određivanje optimalnih parametara vremena reverberacije u oktagonskoj prostoriji pomoću statističke analize

**mr Violeta Stojanović1; dr Zoran Milivojević2; dr Zoran Veličković3**

1 Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš, SRBIJA, violeta.stojanovic@vtsnis.edu.rs

2 Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš, SRBIJA, zoran.milivojevic@vtsnis.edu.rs

3 Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš, SRBIJA, zoran.velickovic@vtsnis.edu.rs

***Apstrakt:*** *U prvom delu rada definisani su akustički parametri prostorije: vreme reverberacije RT10, RT20, RT30, i rano vreme reverberacije EDT. U drugom delu rada na osnovu snimljenih impulsnih odziva u „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“, na Univerzitetu u Londonu, i pomoću softverskih paketa EASERA i Matlab izvršena je statistička analiza dobijenih vrednosti ovih parametara. Komparacijom rezultata statističke analize zaključuje se koji akustički parametri su reprezenti stanja reverberacije u analiziranoj oktagonskoj prostoriji.*

***Ključne reči:*** *Impulsni odziv prostorije, vreme reverberacije, statistička analiza.*

**1. UVOD**

Akustika prostorija je naučna disciplina koja se zasniva na fizičkoj teoriji i akustičkim merenjima čijom kombinacijom se formira baza za proučavanje, modelovanje i projektovanje akustičkih prostora za različite potrebe [1]. Impulsni odziv prostorije *RIR* (***engl.*** *Room Impulse Response*), predstavlja osnovni izvor informacija o akustičkim osobinama prostorije. On se dobija kao odziv prostorije na zvučnu pobudu i u potpunosti karakteriše ponašanje i osobine prostorije kao linearnog i vremenski invarijantnog akustičkog sistema. Ako se analizira subjektivni stav slušaoca, kao merilo akustičkog kvaliteta, vremenska struktura impulsnog odziva se može razložiti na: direktan zvuk, rane refleksije i reverberaciju.

Deo odziva, reverberacija se opisuje objektivnim parametrom koji se zove vreme reverberacije *RT*, (***engl.*** *Reverberation Time*). Od vremena reverberacije zavisi razumljivost i kvalitet zvuka (govora ili muzike) u prostoriji. Ako je poznato vreme reverberacije neke prostorije onda je moguće proceniti i druge objektivne akustičke parametre prostorije: indeks razumljivosti govora, *STI* (***engl.*** *Speech Transmission Index*), indeks jasnoće muzike, *C* (***engl.*** *Clarity*), definisanost, *D* ( ***engl.*** *Definition)*, briljantnost, *TR* (***engl.*** *Brilliance*). Što je veće vreme reverberacije lošija je razumljivost govora u prostoriji ali je bolji subjektivni doživljaj muzike. Optimalno vreme reverberacije zavisi od namene prostorije i od njene zapremine [2]. Vreme reverberacije je parametar na kome se bazira karakterizacija akustike prostorije zbog toga što se ovaj parametar relativno lako može meriti i predvideti sa prihvatljivom preciznošću.

Sabine (1900.) je izvršio prva merenja vremena reverberacije [3]. On je 1922. dao empirijsku jednačinu za procenu parametra *RT* koja je bila bazirana na analizi zapremine, dimenzija i koeficijenata apsorpcije zidova prostorije. Nakon toga teorijom reverberacije bavili su se Franklin (1903), Jaeger (1911), Fokker (1924), Buckingham (1925), Schuster i Vaetzmann (1929) [4]. Norris i Eyring (1930.) su objavili empirijsku jednačinu kod koje je procenjeno i izmenjeno *RT* imalo bolje podudaranje kod manjih reverberacionih prostorija u odnosu na predikciju Sabinovim obrascem. Milingtone i Sette (1933.) u svojoj jednačini uzimaju u obzir različite apsorpcione koeficijenti zidova prostorije. Posle 25 god. ovim problemom bavio se i Ficroj (1959). Šreder je 1965. god. predložio algoritam procene parametra *RT* koji se izračunava analizom akustičkog impulsnog odziva prostorije [5]. Rano vreme reverberacije *EDT* (***engl.*** *Early Decay Time*) , definisano je od strane Jordan-a 1970. [6]. Ovom problematikom su se bavili i Kuttruff (1975), Cremer i Muller (1978), Arau 1988, Nilsson (1992) i Tohiama (1995) [4].

U ovom radu je na osnovu snimljenih akustičkih impulsnih odziva u oktagonskoj sali, snimljenih u projektu „Centre for Digital Music“ Univerziteta „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“ u Londonu [7], i korišćenjem programskih paketa EASERA i Matlab, izvršena statistička analiza akustičkih parametara: ranog vremena reverberacije *EDT* i vremena reverberacije *RT10*, *RT20*, *RT30* na centralnim frekvencijama *fc* {125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000} Hz. Izračunate su srednje vrednosti, varijanse, standardne devijacije i prikazani su grafici raspodele verovatnoće rezultata merenja ovih akustičkih parametara. Rezultati su prikazani tabelarno i grafički. Komparacijom dobijenih rezultata zaključuje se koji su akustički parametri optimalni, odnosno, koji je od akustičkih parametara relevantan za procenu drugih akustičkih parametara i dalju akustičku analizu prostorije.

Organizacija rada je sledeća: u sekciji 2 definisani su analizirani akustički parametri, u sekciji 3 objašnjen je eksperiment, prikazani su rezultati i izvršena je analiza rezultata i sekcija 4 je zaključak.

**2. VREME REVERBERACIJE**

Osnovni objektivni parametar u akustici prostora je vreme reverberacije. Reverberacija prostorije se opisuje sa sledeća dva parametra: vreme reverberacije *RT60* i rano vreme reverberacije *EDT*.

*RT60* je vreme potrebno da zvučna energija u prostoriji opadne nakon isključenja izvora, na milioniti deo vrednosti u odnosu na stacionarno stanje [1]. Odnosno, to je vreme potrebno da nivo zvuka, nakon isključenja izvora zvuka, opadne u prostoriji za 60 dB u odnosu na nivo zvuka u stacionarnom stanju. Parametar *RT60* je isti u svim tačkama prostorije i ne zavisi od izvora zvuka u prostoriji i od geometrije prostora ali je frekvencijski zavisna veličina.

Definišu ga Sabin-ova (1885. god.) i Eyring-ova jednačina (1930. godine) [1]:

 **(1)**

, **(2)**

respektivno. U jednačinama je: *V* [m3] - ukupna zapremina prostorije; *A* [m2] - ukupna apsorpcija u prostoriji; *S* [m2] - suma svih površina u prostoriji; - srednji koeficijent apsorpcije. Sabin-ov obrazac je primenljiv za prostorije sa približno difuznim zvučnim poljem gde je *RT* > 0.8s, dok Eyring-ov obrazac daje preciznije rezultate za prostorije sa *RT* < 0.8s.

U proceduri merenja ponekad nije moguće ostvariti dinamiku pada nivoa zvuka u prostoriji od 60dB, pa se vreme reverberacije određuje na osnovu pada nivoa zvuka od 10 dB, (*RT10*), 20 dB, (*RT20*), 30 dB, (*RT30*) i to polazeći od -5 dB u odnosu na maksimalni nivo.

Rano vreme reverberacije *EDT*, je relevantan podatak kada je u pitanju odziv prostorija sa izraženom ulogom ranih refleksija [1]. Parametar *EDT* je definisan kao vreme za koje relativni nivo zvuka opadne za 10 dB i to računajući od -5 dB u odnosu na maksimalni nivo. Zavisi od geometrije prostora. Ukoliko *EDT* značajnije odstupa od vremena reverberacije pokazuje se da je dominantno za subjektivni doživljaj reverberantnosti prostora.

**3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I ANALIZA**

**3.1. Eksperiment**

U ovom radu izvršena je statistička analiza akustičkih parametara: *EDT*, *RT10*, *RT20* i *RT30* na centralnim frekvencijama *fc* {125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000} Hz. u sali „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“, na Univerzitetu u Londonu (Slika. 1) sa ciljem određivanja parametra – reprezenta stanja reverberacije u sali. Pri analizi su korišćeni impulsni odzivi snimljeni 2008. god [7].

****

**Slika 1:** Prikaz „Octagon“ sale.

Na osnovu impulsnih odziva i programskog paketa EASERA određene su vrednosti objektivnih akustičkih parametara koji karakterišu vreme reverberacije u sali. Statističkom analizom, koja je odrađena pomoću programskog paketa Matlab, utvrđeno je koji akustički parametar ima najtačniju vrednost, odnosno koji je akustički parametar reprezent stanja reverberacije u sali.

Za akustičku analizu sale, u ovom radu, uzeto je 25 mernih tačaka ( od 169) čiji su položaji prikazani na slici. 2.



**Slika 2** Prikaz položaja mernih tačaka i zvučnog izvora u sali

za vreme snimanja impulsnih odziva.

**3.2. Baza akustičkog impulsnog odziva**

Baza akustičkih impulsnih odziva je objavljena u [7]. Bazu podataka čine wav fajlovi koji su dobijeni merenjem impulsnih odziva u 169 mernih tačaka prostorije „Octagon“, snimljenih od strane „Centre for Digital Music“ sa „Queen Mary“ Univerziteta u Londonu. „Octagon“ je građevina sagrađena u viktorijanskom stilu, 1888. god. u istočnom Londonu čija je osnovna namena bila glavna biblioteka „Queen Mary's College“. Danas ona predstavlja objekat koji se koristi za održavanje konferencija, raznih svečanosti, izložbi i td. „Octagon“ ima 8 zidova visine 7.5 m koji su prekriveni knjigama, drveni pod i plafon obložen gipsom. Kupola plafona je visine 21 m. Zapremina je 9500 m3.

Merenja impulsnih odziva vršena su pomoću pobudnog log -sweep signala u trajanju od 2 s sa *fS* = 96 kHz sa 3 BpS.Pri ovom eksperimentu korišćen je zvučnik „Genelec“ 8250A i omnidirekcioni mikrofon DPA 4006.

**3.3. Rezultati eksperimenta**

U tabeli 1 prikazane su srednje vrednosti, varijanse i standardne devijacije akustičkih parametara *EDT* i *RT10*, a u tabeli 2 su prikazane srednje vrednosti, varijanse i standardne devijacije akustičkih parametara *RT20* i *RT30*. Na slikama (3 – 6) prikazane su funkcije raspodele verovatnoće rezultata merenja akustičkih parametara *EDT*, *RT10*, *RT20* i *RT30* na centralnim frekvencijama.

**Tabela 1:** Srednje vrednosti, varijanse i standardne devijacije *EDT* i *RT10*.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f* (Hz) |  (s) | (s2) | (s2) |  (s) | (s2) | (s2) |
| 125 | 4.3460 | 9.4729 | 3.078 | 4.6160 | 8.4335 | 2.904 |
| 250 | 2.3196 | 0.0937 | 0.306 | 2.3364 | 0.0682 | 0.261 |
| 500 | 2.8712 | 0.0429 | 0.207 | 3 | 0.0298 | 0.173 |
| 1000 | 3.1504 | 0.4907 | 0.7 | 3.3704 | 0.0199 | 0.141 |
| 2000 | 2.4732 | 0.3049 | 0.552 | 2.8804 | 0.0183 | 0.135 |
| 4000 | 1.9920 | 0.2088 | 0.457 | 2.2584 | 0.1449 | 0.381 |
| 8000 | 1.6088 | 0.5051 | 0.711 | 1.4732 | 0.1342 | 0.366 |

**Tabela 2:** Srednje vrednosti, varijanse i standardne devijacije *RT20* i *RT30*.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f* (Hz) |  (s) | (s2) | (s2) |  (s) | (s2) | (s2) |
| 125 | 3.5220 | 4.3567 | 2.087 | 3.1828 | 3.7241 | 1.93 |
| 250 | 2.3580 | 0.0784 | 0.28 | 2.4824 | 0.3204 | 0.566 |
| 500 | 3.0172 | 0.0154 | 0.124 | 2.9920 | 0.0181 | 0.135 |
| 1000 | 3.3408 | 0.0058 | 0.076 | 3.2288 | 0.0032 | 0.057 |
| 2000 | 2.9332 | 0.0067 | 0.082 | 2.9252 | 0.0039 | 0.062 |
| 4000 | 2.3236 | 0.0059 | 0.077 | 2.4068 | 0.0028 | 0.053 |
| 8000 | 1.5460 | 0.0050 | 0.071 | 1.6028 | 0.0031 | 0.056 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| a) | b) | c) |
|  |  |  |
| d) | e) | f) |



g)

**Slika 3** Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra *EDT* za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz,

d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| a) | b) | c) |
|  |  |  |
| d) | e) | f) |



g)

**Slika 4:** Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra *RT10* za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz,

d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| a) | b) | c) |
|  |  |  |
| d) | e) | f) |



g)

**Slika 5:** Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra *RT20* za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz,

d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| a) | b) | c) |
|  |  |  |
| d) | e) | f) |



g)

**Slika 6:** Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra *RT30* za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz,

d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.

**3.4. Analiza rezultata**

Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 1. i 2. i na slikama (3. – 6.) zaključuje se da je statistička analiza standardnih devijacija analiziranih akustičkih parametara u frekvencijskom oktavnom opsegu pokazala da:

1) najmanje standardne devijacije, a samim tim i najveću tačnost, imaju vrednosti: a) *EDT* na *fc* = 500 Hz (= 2.87 s i = 0.207 s), b) *RT10* na *fc*= 2 kHz (= 2.88 s i = 0.135 s), c) *RT20* na *fc* = 8 kHz (= 1.546 s i = 0.071 s) i d) *RT30* na *fc* = 4 kHz (= 2.4068 s i= 0.053 s);

2) najvećevrednosti standardnih devijacija, odnosno, najmanju tačnost svi analizirani akustički parametri imaju na *fc* = 125 Hz: = 4.346 s sa = 3.078 s, = 4.616 s sa = 2.904 s, = 3.522 s sa = 2.087 s i = 3.18 s sa= 1.93 s.

Globalni pokazatelj stanja reverberacije u odzivu prostorija je vrednost vremena reverberacije na *fc* = 500 Hz [1]. To je srednja frekvencija opsega u kome je ponašanje prostorije najmanje zavisno od disipacije u vazduhu i ekstremnih pojava na najnižim frekvencijama. Analizirane srednje vrednosti vremena reverberacije oktagonske prostorije su na ovoj frekvenciji približne i iznose oko 3s:= 2.87 s (=0.043s), = 3 s (= 0.173 s), = 3.017 s, (= 0.124 s) i = 2.99 s (= 0.135 s). Primećuje se da srednja vrednost = 3.017 s ima najveću tačnost (Slika 5 c)).

Najveći doprinos indeksu razumljivosti govora (preko 30%) ima oktavni pojas sa *fc* = 2 kHz. Srednje vrednosti vremena reverberacije su na ovoj frekvenciji, takođe, približne i iznose oko 3s:= 2.88 s (= 0.135 s), = 2.93 s (= 0.082 s) i= 2.92 s (= 0.062 s). Uočava se da srednja vrednost = 2.92 s ima najveću tačnost (Slika 6 e)). Srednja vrednost = 2.47 s je najmanja od vrednosti analiziranih akustičkih parametara, ali ona ima i najmanju tačnost jer joj je srednja devijacija najveća, = 0.55 s.

**4. ZAKLJUČAK**

U ovom radu je izvršena statistička analiza akustičkih parametara vremena reverberacije: *EDT*, *RT10*, *RT20* i *RT30* na centralnim frekvencijama *fc* {125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000} na osnovu snimljenih akustičkih impulsnih odziva u sali „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“, na Univerzitetu u Londonu. Izračunate su srednje vrednosti, varijanse, standardne devijacije i prikazane su funkcije raspodele verovatnoće rezultata merenja akustičkih parametara. Komparacijom dobijenih rezultata zaključuje se da je vreme reverberacije sa najmanjom tačnošću određeno samo na *fc* = 125 Hz. Globalni pokazatelj stanja reverberacije u odzivu prostorija je optimalna vrednost vremena reverberacije *RT20* na *fc* = 500 Hz: = 3.017 s, (= 0.124 s). Na frekvencijama *fc*{500, 1000, 2000} Hz, koje su bitne za razumljivost govora, svi analizirani parametri imaju približnu srednju vrednost, oko 3 s. Najveći doprinos indeksu razumljivosti govora u oktavnom pojasu sa *fc* = 2 kHz ima optimalna vrednost vremena reverberacije *RT30*: = 2.92 s (= 0.062 s).

Razumljivost govora u oktagonskoj prostoriji je tema koja će se obrađivati u daljim istraživanjima.

**LITERATURA**

1. H. KUTTRUFF: *Room Acoustics*, E&FN Spon, London, 2000.
2. ISO 12001:1998: *Acoustics Noise emitted by machinery and equipment*, Rules for the drafting and presentation of a noise test code, 1998.
3. SABINE, W.: *Collected Papers on Acoustics* (1922), Harvard University Press.Reimpresión Dover, 1964.
4. R. NEUBAUER, B. KOSTEK: *Prediction of the reverberation time in rectangular rooms with non – uniformly distributed sound absorption*, Arhives of Acoustics, 26, 3, 183 – 201, 2001.
5. SCHROEDER, M. R.: *New method of measuring reverberation time* JASA 38 (1965), S. 329 and 40, S. 549.
6. JORDAN, V. L.: *Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques*, JASA, Vol. 47, No. 2 (Part 1), pp. 408-412, 1970.
7. R. STEWART, M. SANDLER: *Database of omnidirectional and B – format room impulse responses*, ICASSP – 8, pp. 165 -168, 2010.