

Osnovne karakteristike petarde kao izvora zvučnog impulsa

Draško B. Mašović

Sadržaj — Petarde se često koriste kao izvori impulsne pobude pri merenju impulsnog odziva prostorije. Zato je neophodno znati osnovne osobine zvučne pobude koju proizvode. Neke od važnijih osobina su ponovljivost ostvarenog impulsa i oblik njegovog spektra i oni su predmet proučavanja ovog rada. Kao tipičan predstavnik cele klase ispitivan je jedan model standardnih petardi manje veličine. Pokazano je da je, izuzev manjeg procenta petardi lošije tehnološke izrade, ponovljivost na visokom nivou. Spektar je relativno ravan u celom frekventijskom opsegu od interesa, sa padom ka nižim frekvencijama.

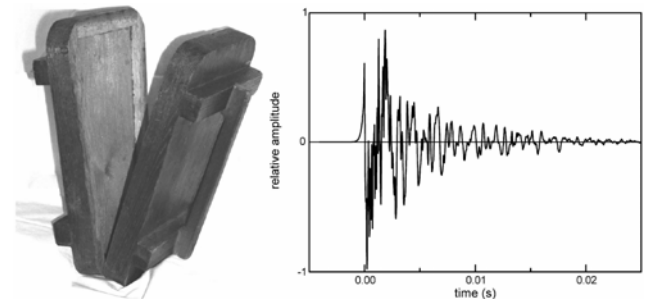
Ključne reči — akustička merenja, impulsni izvor zvuka, petarda

I. UVOD

IMPULSNI odziv prostorije se u praksi može meriti na dva načina [1]. Prvi je korišćenjem različitih izvora impulsne pobude, karakteristika sličnih idealnom Dirakovom impulsu, uz dovoljan nivo i što ravniji spektar u relevantnom frekventijskom opsegu. Drugi, sofisticiraniji je pomoću zvučne pobude posebnog oblika (*sweep*, MLS sekvenca i sl.), pri čemu se sam impulsni odziv izdvaja naknadnom obradom signala (najčešće korelacijom). Ovaj postupak iako je precizniji i u potpunosti zadovoljava zahteve standarda ISO 3382 ima svoje praktične nedostatke [2]. Naime, radi postizanja standardom zahtevane neusmerenosti izvora ovakvih signala moraju se pri merenju koristiti zvučničke kutije u obliku sfere ili dodekaedra. Ovakvi zvučnički sistemi sa pratećom opremom mogu težiti i preko 20 kg, i u nekim realnim okolnostima praktično je nemoguće njihovo korišćenje. Napajanje iz električne mreže, koje predstavlja preduslov za njihovu upotrebu, takođe nije moguće obezbediti uvek i na svakom mestu, naročito na lokacijama udaljenim od naselja, kada je vrlo često ograničena i količina merne opreme koja se može transportovati.

U takvim okolnostima za pobudu prostorije koriste se različiti alternativni izvori impulsa. Njihov najvažniji zadatak je da proizvedu zvučnu pobudu oblika sličnog

idealnom Dirakovom impulsu, uz što manju usmerenost i dovoljno veliki intenzitet u odnosu na okolnu ambijentalnu buku. Danas je poznato nekoliko tipova izvora impulsa koji ispunjavaju ovaj zadatak. Najjednostavniji su oni kod kojih se pobuda ostvaruje mehaničkim putem. Tipičan primer je klapna kod koje se impuls proizvodi udarom dve njene površine, a najčešće je prilagođena ručnoj upotrebi (ručna klapna). Jedna vrsta ručne klapne i izgled njenog impulsa prikazani su na slici 1 [2].



Slika 1. Primer ručne klapne i njenog impulsa

Jednostavnost ovakvih naprava uzrok je i određenih nedostataka proizvedene impulsne pobude. Kao što se sa slike može videti, u pitanju su reverberantni procesi u konstrukciji klapne koji uzrokuju da impuls traje relativno dugo (više od 10 ms), što je posebno izraženo na rezonantnim frekvencijama udarnih površina. Samim tim, spektar ovih impulsa nije linearan, a energija na nižim frekvencijama može biti nedovoljna da se u svim okolnostima ostvari potreban odnos signal-šum. U slučaju ručne klapne sa slike 1 ponovljivost pobude je izrazito zavisna od obučenosti i uvežbanosti osobe koja njom rukuje. Na kraju, po pravilu je prisutna i nezanemarljiva usmerenost i to na nižim frekvencijama.

Postoje i daleko složeniji izvori impulsnog zvuka poput generatora električne varnice. Upravo ta složenost, potreba za električnim napajanjem, kao i neophodnost da se radi sa vrlo visokim naponima, razlog su njegove veoma ograničene praktične upotrebe (izuzimajući laboratorijska merenja na fizičkim modelima). Najzad, zvučni impuls može se proizvesti i eksplozijom baruta (startni pištolj, petarda) ili naglom ekspanzijom komprimovanog vazduha (pucanje naduvanog balona ili primena posebnih komora). U literaturi [3] postoji interesantan primer korišćenja komore za generisanje zvučnog impulsa, čak uz mogućnost podešavanja njegove amplitude i spektra. Najveći nedostatak balona s komprimovanim vazduhom je što se pri pucanju cepaju na slučajan način. To uzrokuje

Istraživanja na osnovu kojih je napisan ovaj rad sprovedena su u okviru aktivnosti na projektu 23046 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

D. B. Mašović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (telefon: 381-64-4604564; e-mail: drasko.masovic@gmail.com).

Mentor: prof. dr Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: emijic@etf.bg.ac.yu).

nejednaku ugaonu raspodelu energije (odnosno usmerenost zračenja) i otežava ponovljivost. Loša ponovljivost je generalno problem i kod korišćenja eksplozivnih naprava za postizanje zvučnog impulsa i tada je posledica varijacija u količini baruta. Ipak, ovakve izvore najčešće odlikuje veća neusmerenost uz veoma kratak emitovani impuls (kraći od 1 ms) velike energije, što omogućava dobar odnos signal-šum. Nedostatak je u tome što je njihova energija neuniformno raspoređena po frekvencijama, pa se problem u dinamici može pojaviti na nižim frekvencijama, naročito kod impulsa kraćeg trajanja. Problem usmerenosti nešto je izraženiji kod pištolja nego u slučaju petardi [4]. Objašnjenje za to je što gasovi po izlasku iz cevi pištolja najvećim delom nastavljaju da se kreću u istom smeru, što znači da će energija na nižim frekvencijama biti nejednako ugaono raspodeljena oko otvora cevi.

U ovom radu prikazane su neke osnovne karakteristike petarde kao izvora impulsne zvučne pobude. Analizirani su ponovljivost i spektr proizvedenog impulsa. To može imati i praktični značaj zbog činjenice da se upravo petarde često koriste za merenje impulsnog odziva u velikim salama. Merenja čiji su rezultati ovde dati sprovedena su u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.

II. PETARDA KAO IZVOR IMPULSA

U postojećoj literaturi može se naći podela svih impulsnih zvukova na sledeća 4 tipa [5]:

- tip 1: dugi reverberantni impulsi
- tip 2: kratki reverberantni impulsi
- tip 3: dugi Fridlenderovi (*Friedlander*) impulsi
- tip 4: kratki Fridlenderovi impulsi,

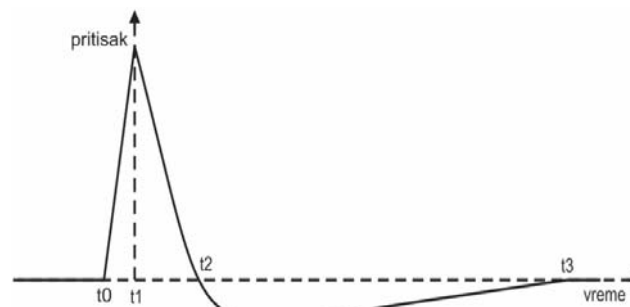
Prva dva tipa karakteristična su za industrijsku buku, a preostala dva za buku u vojnom okruženju. To je sasvim opravdano budući da impulsni zvukovi u industriji najčešće nastaju mehaničkim udarima u mašinama poput presa i sličnih, a takvi impulsi imaju reverberantan oblik (kao na slici 1). S druge strane, izvori takozvane „vojne buke“ su vatrena oružja malog i velikog kalibra (od pištolja do topova), kao i eksplozivne naprave svih vrsta. Impulsi koje oni generišu imaju Fridlenderov oblik. Petarde, kao manje eksplozivne naprave, pripadaju izvorima impulsa četvrtog tipa. Po literaturi [5] maksimalni nivo zvuka koga stvaraju impulsi četvrtog tipa doseže između 150 i 172 dB, mada i rastojanje na kome se meri nivo varira od delova metra do nekoliko metara.

Za razliku od reverberantnih impulsa, Fridlenderov tip koji se još naziva i A-talas ima samo jedan izražen maksimum i oblika je prikazanog na slici 2 [3]. U idealnom slučaju maksimum zvučnog pritiska se dostiže trenutno ($t_1 - t_0$ teži nuli), dok je kod realnih Fridlenderovih impulsa taj vremenski interval konačan. Spektar realnog impulsa prikazan je na slici 3 (frekvencijska osa predstavljena je u logaritamskoj razmeri) [3]. Data kriva spektra analitički se može izraziti jednačinom:

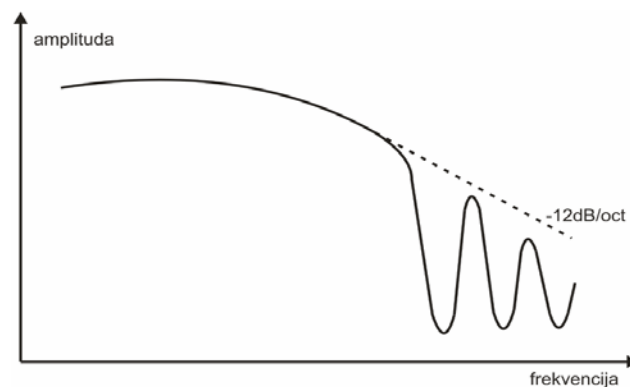
$$|P(w)| = \left(\sqrt{2} / w^2 (t_1 - t_0) \right) [1 - \cos(w(t_1 - t_0))]^{1/2}, \quad (1)$$

gde je $w = 2\pi f$ kružna frekvencija. Na višim frekvencijama kriva ovog spektra ima pad 12 dB po oktavi, a maksimalnu

vrednost dostiže u tački $w = 1/(t_2 - t_1)$.



Slika 2. Talasni oblik Fridlenderovog impulsa

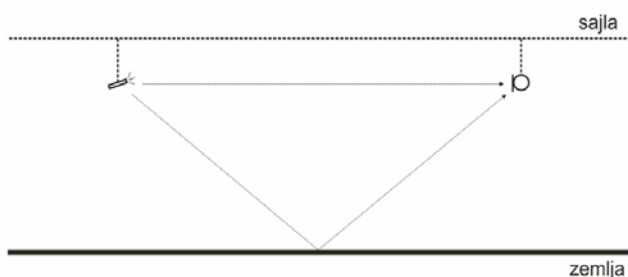


Slika 3. Spektar Fridlenderovog impulsa

Vremenski interval potreban da se zvučni pritisak vrati u nulu (na slici 2 $t_2 - t_0$) naziva se A-interval. Nakon njega, u procesu ponovnog uspostavljanja početnog stanja, pritisku je potrebno još oko 5 puta duže vreme da se ponovo vrati u nulu, ili u praksi na 1 % maksimalno dosegnute vrednosti (trenutak t_3). Impulsi tipa 4 imaju vrlo kratak A-interval, između 0.2 i 2 ms. To dalje znači, na osnovu izraza (1), da je i energija većinski raspodeljena na višim frekvencijama (nekoliko kiloherca). U slučaju petardi sve navedene veličine, uključujući i maksimalni dosegnuti nivo zvučnog pritiska, zavise od količine baruta u punjenju i eventualnih primesa. Jedan od zadataka ovog rada je i da eksperimentalno proveriti ispravnost navedenih teorijskih zaključaka.

III. POSTUPAK MERENJA

Za ovo istraživanje upotrebljeno je 10 standardnih petardi, male veličine (valjkastog oblika, visine 38 mm i prečnika 5 mm) proizvođača Mirmovec Pirotehnika. Kako bi se obezbedili uslovi anehoičnosti, odnosno kako bi bilo moguće izdvajanje direktnog zvuka, petarda i mikroskop su smešteni na visinu od 4 m. Šematski prikaz njihovog položaja dat je na slici 4. Rastojanje između petarde i mikrofona pri merenjima bilo je 3 m. Kašnjenje zvuka reflektovanog o zemlju u odnosu na direktan talas je u tom slučaju oko 16 ms, što omogućava da se posebno izdvoji direktan zvuk, čije ukupno trajanje iznosi oko 1 ms. Refleksije o ostale površine prostora u kom je vršeno merenje stizale su do mikrofona sa kašnjenjem većim od 16 ms u odnosu na direktan talas, pa nemaju uticaj na izdvojen direktan zvuk.



Slika 4. Položaji petarde i mikrofona pri merenju

Korišćen merni mikrofoni je $\frac{1}{4}$ -inčni, sa gornjom graničnom frekvencijom od 70 kHz i neusmeren. Snimanje je vršeno sa frekvencijom odabiranja od 48 kHz. To predstavlja određeni ograničavajući faktor za preciznost merenja nekih relevantnih vremenskih intervala kod veoma kratkih zvučnih impulsa, kakvi su u slučaju petardi. Ipak rezolucija od 0.021 ms je procenjena kao dovoljna za potrebe ovog istraživanja. Celokupna analiza snimljenih impulsa sprovedena je u softverskim paketima *Matlab* i *Sound Forge*, a statistička obrada u *Microsoft Excel*. Ponovljivost je ispitana merenjem nekoliko vremenskih i nivovskih parametara u *Sound Forge*-u. Za izračunavanje oktavnih spektara korišćen je posebno napravljen *Matlab* program, koji određuje nivo impulsa nakon filtriranja kroz svaki od 7 oktavnih filtara (centralnih frekvencija od 125 do 8000 Hz) po standardu IEC 1260.

U nastavku su dati rezultati sprovedene analize, kako ponovljivosti tako i spektralnih karakteristika zvučnih impulsa petarde.

IV. REZULTATI

A. Ponovljivost

Ponovljivost zvučnih impulsa proizvedenih eksplozijom petarde ovde je ispitana na uzorku od deset petardi. U tabeli 1 dati su neki važniji parametri koji opisuju svih deset snimljenih impulsa. Sa stanovišta jačine zvuka to su maksimalni nivo produkovanih impulsa, RMS vrednosti u A-intervalu i celokupnog impulsa do ponovnog uspostavljanja početnog stanja. Od vremenskih veličina dati su A-interval i trajanje celog impulsa procenjeno iz vremenskog oblika (kada zvučni pritisak u procesu relaksacije padne ispod 1 % vrednosti maksimuma).

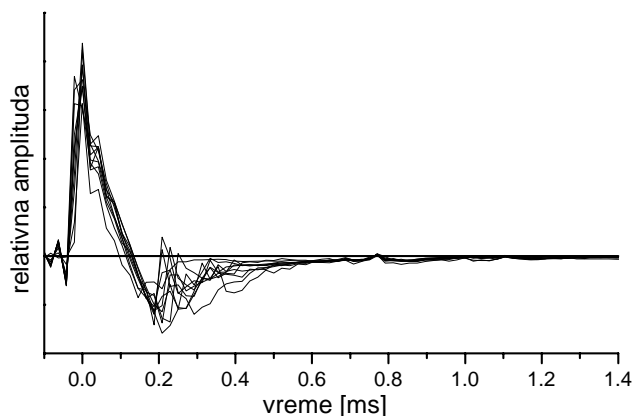
TABELA 1: PONOVLJIVOST

petarda	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
maksimalni nivo [dB]	145	142	143	142	144	144	143	145	144	143
RMS t2-t0 [dB]	139	135	137	138	138	139	139	138	138	138
RMS t3-t0 [dB]	133	128	131	131	132	132	133	132	132	131
t2-t0 [ms]	0.17	0.14	0.17	0.15	0.17	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17
t3-t0 [ms]	0.98	1	1.02	1.04	1	0.98	1.04	1.04	0.98	1.04

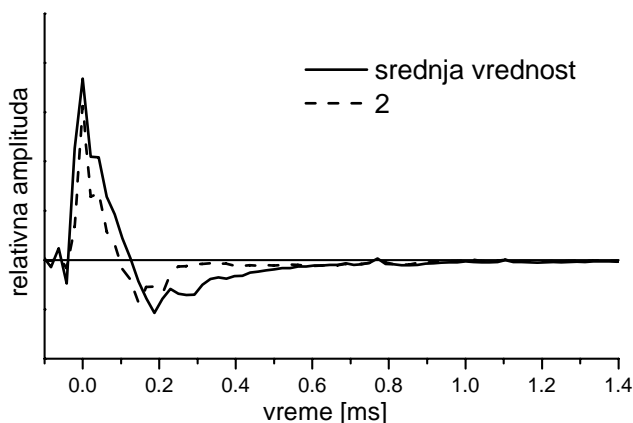
Kao što se iz datih brojnih vrednosti može uočiti, izmereni maksimalni nivo zvuka na 3 m je oko 143 dB, što je prema ranije navedenim vrednostima iz literature karakteristika slabijih impulsa četvrtog tipa. Razlog za to je što su korišćene petarde male veličine, sa manjom količinom baruta. U praksi se mogu naći petarde znatno

većih dimenzija koje mogu proizvesti i veće maksimalne nivoe zvuka. Iz istog razloga su A-interval i trajanje čitavog impulsa, kao i energija zvuka u ovim intervalima nešto nižih vrednosti od navedenih, uobičajenih za Fridlenderove impulse. A-interval je svega oko 0.17 ms, dok čitav impuls traje oko 1.01 ms (šest puta duže). Interesantno je da se na oko 0.81 ms od početka svih snimljenih impulsa javlja drugi maksimum, mnogo manji od prvog (za oko 40 dB). Pretpostavlja se da je on posledica refleksije o sajlu za koju su pri merenjima zakačeni petarda i mikrofoni. To je i jedina refleksija koja se javlja sa kašnjenjem manjim od trajanja samog impulsa, ali s obzirom na njen mali intenzitet ne utiče bitno na dobijene rezultate.

Izgled snimljenih impulsa u vremenskom domenu dat je na slikama 5 i 6 i na njima se prepoznaje karakterističan oblik Fridlenderovih impulsa. Nakon naglog početnog povećanja energije i brzog dostizanja maksimuma zvučnog pritiska sledi znatno duži period relaksacije. Time je još jednom potvrđen u teoriji ustanovljen oblik impulsa ovog tipa prikazan na slici 2.



Slika 5. Talasni oblici impulsa deset testiranih petardi



Slika 6. Usrednjeni zvučni impuls devet petardi i zvučni impuls petarde sa defektom

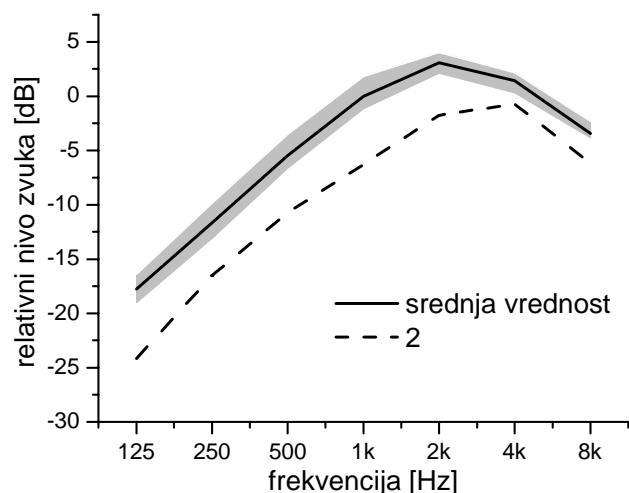
Na slikama 5 i 6, kao i donekle u tabeli 1 može se uočiti da se impuls jedne petarde po karakteristikama jasno izdvoji od ostalih. U pitanju je druga testirana petarda, pa je taj impuls na graficima označen brojem 2. Na slici 5 data je relativna amplituda u funkciji vremena svih 10 snimljenih impulsa. Ista veličina usrednjena za devet

impulsa predstavljena je na slici 6 punom linijom, dok je isprekidanom posebno izdvojena relativna amplituda impulsa druge petarde, koja je zbog pomenutih specifičnosti izostavljena pri računanju srednje vrednosti. Razloge za specifičnosti druge petarde u odnosu na sve ostale testirane treba tražiti u nesavršenosti mašinskog procesa proizvodnje petardi. Fabrička proizvodnja ne samo da ne garantuje potpuno jednake količine eksploziva u svim petardama, nego i dopušta da određeni, manji procenat proizvedenih petardi po svojim karakteristikama i znatnije odstupi od velike većine. Možemo reći da u ovom istraživanju taj procenat iznosi oko 10 %. Za precizna merenja ovakve, defektne petarde bi bilo poželjno uočiti na vreme i odvojiti od ostalih. U slučaju velikih odstupanja, kakva su ovde registrovana kod druge petarde, ona se mogu percepirati i pažljivijim slušanjem pucnja. Ipak ne može se sa sigurnošću tvrditi da je ovakav način raspoznavanja uvek i dovoljan.

Nesavršenost tehnološkog procesa izrade petardi predstavlja i najveću prepreku dobroj ponovljivosti pri korišćenju petarde kao izvora zvučnog impulsa u akustičkim merenjima. Ipak i ta odstupanja nisu prevelika tako da je njihova primena u najvećem broju slučajeva sasvim opravdana.

B. Spektar

Usrednjeni oktavni spektar impulsa testiranih petardi prikazan je na slici 7. Kao u slučaju vremenskog oblika i ovde je srednja vrednost data za devet petardi sličnih karakteristika (puna linija), dok je oktavni spektar druge petarde posebno izdvojen (isprekidana linija). Kako odstupanja od srednjih vrednosti nivoa po oktavama iznose do oko 1.5 dB, na istom grafiku prikazana je oblast ograničena minimalnim i maksimalnim dobijenim vrednostima (osenačena površina). To je ujedno i oblast unutar koje se nalaze spektri impulsa svih petardi izuzev defektne. Znatno veća odstupanja od srednje vrednosti prisutna su samo kod druge petarde i ona u pojedinim oktavama iznose čak do 6.5 dB.



Slika 7. Oktavni spektar zvučnog impulsa petarde

Maksimum spektra impulsa petarde je na frekvencijama

oko 2 kHz, što je posledica njegovog vrlo kratkog trajanja. Na nižim frekvencijama nivo zvuka je do 20 dB manji nego na višim. To može da oteža ostvarivanje potrebnog odnosa signal-šum na tim frekvencijama pri merenju impulsnog odziva prostorije sa većim nivoom ambijentalne buke.

V. ZAKLJUČAK

Petarde se često koriste pri merenju impulsnog odziva prostorija za potrebe akustičkog dizajna. Iz tog razloga važno je poznavanje njihovih osobina kao izvora impulsne zvučne pobude. Rezultati ovog istraživanja potvrdili su da zvučni impulsi koje proizvode petarde pripadaju Fridlenderovom tipu. Nešto su kraćeg trajanja i manje energije u odnosu na većinu ostalih impulsa istog tipa. Zbog kratkog vremenskog trajanja veći deo energije skoncentrisan je na višim frekvencijama, što u nekim situacijama može da uslovi nedovoljan odnos signal-šum na nižim frekvencijama. Pokazano je i da je ponovljivost produkovanih impulsa zadovoljavajuća za većinu praktičnih upotreba, sa malim odstupanjima u vremenskim i spektralnim karakteristikama. Ipak nesavršenost tehnološkog procesa proizvodnje petardi uzrokuje da određeni, manji procenat petardi po osobinama značajnije odstupi od ostalih, što kvari inače solidnu ponovljivost. Još uvek treba iznaći način za pouzdano i efikasno otkrivanje ovakvih defektnih petardi.

LITERATURA

- [1] ISO 3382: *Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters.*
- [2] D. Šumarac-Pavlović, M. Mijić, H. Kurtović, "A Simple Impulse Sound Source for Measurement in Room Acoustics," *Applied Acoustics*, 69, pp. 378–383, 2008.
- [3] R. S. Birch, S. N. Gerges, E. F. Vergara, "Design of a Pulse Generator and Shock Tube for Measuring Hearing Protector Attenuation of High Amplitude Impulsive Noise," *Applied Acoustics*, 64, pp. 269–286, 2003.
- [4] D. Griesinger, "Beyond MLS – Occupied Hall Measurement with FFT Techniques," *101st AES Convention*, Preprint 4403, 1996.
- [5] D. Smeatham, P. D. Wheeler, "On the Performance of Hearing Protectors in Impulsive Noise," *Applied Acoustics*, 54, pp. 165–181, 1998.

ABSTRACT

Firecrackers are often used as sources of impulse sound for measuring the room impulse response. That is why it is necessary to be aware of some basic characteristics of the impulse they produce. This paper deals with two basic characteristics - repeatability of the produced impulse and shape of its spectrum. For this research a small-size firecrackers were used. It is shown that repeatability of impulses is very high. Spectrum is acceptably flat in entire frequency band of interest, with a decrease at lower frequencies.

BASIC CHARACTERISTICS OF FIRECRACKER AS AN IMPULSE SOUND SOURCE

Draško B. Mašović