

Delno uspešne meritve odmevnega časa v dvorani

Franc Policardi^{1,2}, Nejc Staniša²

¹ Università degli Studi dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale, dell'Informazione e dell'Economia - Italy

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Elektrotehniko, Tržaška cesta 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
franc.policardi@fe.uni-lj.si, nejc.stanisa@gmail.com

Ključne besede: akustika prostora, reverberacijski čas, resonanca materialov, meritve, kalibriranje

ABSTRACT

Architectural acoustics in performance halls is very problematic, so started a research program about accurate measurements in a specific Novo mesto Horse riding hall. Reverberation Time (RT_{60}) is main acoustic parameter from which all other main acoustic qualities derive so we started with empty and subsequently in partially full hall. Measurement procedure started with external and internal noise characterization without and with HVAC, possible resonant frequencies and RT_{60} followed. First results show dramatic resonant behaviour from different building materials, specifically plexiglass windows and some surfaces on the ceiling up to 30 dB over exciting frequencies. RT_{60} results are at present only partially successful because of a bug in the measurement procedure. The chosen software is now updated and at the time of ERK 2014 new measurements will be already concluded.

1 Uvod

Gledališča, kinodvorane in večnamenske dvorane so prostori, v katerih morajo biti svetlobne, akustične in klimatizacijske zahteve ustrezne za dobro počutje občinstva in kakovostno spremljanje prireditev. Če v prostoru iznenada izključimo hrupni vir, akustični valovi še naprej potujejo po prostoru, vendar se njihova energija postopoma zmanjšuje pri vsakem odboju. Kot merilo za to upadanje se uporablja odmevni čas RT_{60} .

V Novemu mestu se nahaja šolska športna dvorana, ki je bila včasih odprta jahalnica. Med prenovo leta 2007 se je akustika kar zanemarila in je sedanja situacija tako slaba, da je športni pouk moten ter letne prireditve skoraj neposlušne, ker sta RT_{60} (odmevni čas) in notranje resonance predolgi in preveliki. Motnje prihajajo iz znanih fenomenov imenovana *maskiranje* in *inteligibilnost* oz. izguba ločljivosti med zlogi, katere lahko spravi poslušalce v nervozno in utesnjeno počutje. Tudi v tem primeru je bila ustrezna akustika zanemarjeni del v projektantskem procesu, čeprav je bistvenega pomena za kakovostno spremljanje dogajanj.

2 Odmevni čas in njegov vpliv na hrup

Najpomembnejši parameter akustike prostora je odmevni čas do -60 dB (RT_{60}), oz. čas v katerem se nivo hrupa po ugasnitvi vira hrupa zmanjša za 60 dB [1].

Priporočeni odmevni časi niso enaki za vse vrste izvajanj, saj naj bi bili v primeru glasbenih izvajanj daljši odmevni časi boljši, kar pa ni ustrezno v primeru govornih prireditev, kadar se s povečanjem odmevnega časa zmanjšuje inteligibilnost.

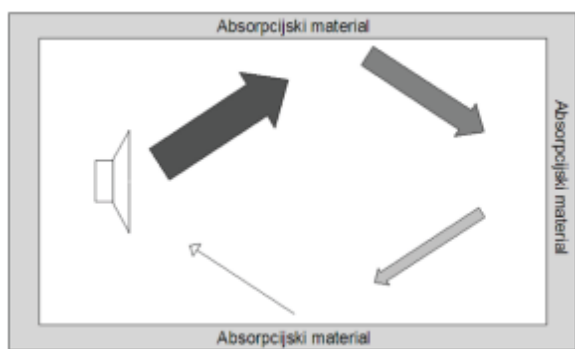
Na akustiko najbolj vpliva oblika prostora in v pretežni meri akustične lastnosti materialov nameščeni na stenske in stropno/talne konstrukcije oz. t.i. generični absorpcijski koeficient α . Idealni odmevni čas v praksi ni mogoče zagotoviti le z enim tipom materiala, tako da se ti kombinirajo po površini in po akustičnih lastnostih, α za različne frekvence. Prazni prostori brez občinstva so bolj odmevni kot prostori polni ljudi, ker ljudje zmanjšajo volumen sobe in s svojimi oblačili absorbirajo zvok.

S povečanjem koeficienta absorpcije se ustrezno zmanjša odmevni čas in kot posledica tudi splošna raven hrupa. Znižanje ravni hrupa ΔL je odvisno od spremembe odmevnega časa [2] in se določi z enačbo:

$$\Delta L = 10 \log \frac{T_1}{T_2} \quad 1)$$

pri čemer T_1 pomeni prvotni odmevni čas in T_2 odmevni čas po dodani absorpciji. Iz enačbe je razvidno, da splošno raven hrupa znižamo za 3dB, če odmevni čas razpolovimo, pri štirikratnem znižanju bi se tudi hrupna energija štirikrat zmanjšala in bi raven hrupa padla za 6 dB. V praksi 10 dB predstavlja zgornjo mejo, ki jo s takšnimi ukrepi lahko dosežemo. Pri tem so pomembne dimenzije prostora, ker kadar sta dolžina in širina prostora nekajkrat večji od višine, se ta v akustičnem smislu velikokrat obnaša kot dvodimenzionalen in je v takšnih prostorih smiselno poudariti čim večjo absorpcijo stropa in tal. S takšnim znižanjem dolžine RT_{60} dosežemo sprejemljive ravni hrupa in se tudi inteligibilnost občutno poveča.

Uspešnost znižanja ravni hrupa z zvočno absorpcijskimi materiali je odvisna od akustičnih lastnosti materiala α , količine le tega, oddaljenosti od hrupnega vira, obstoječe absorpcije ter velikosti in oblike prostora. Zvok v takšnem prostoru je sestavljen iz neposrednega (direktni zvok) in posrednega (zvok, ki se odbija od notranjih ločilnih površin prostora) [3]. V bližini hrupnega vira prevladuje neposredna komponenta, zato njegova raven hitreje upada z oddaljenostjo. Na večjih oddaljenostih se hrup zmanjšuje predvsem zaradi vpliva absorpcije, kakor prikazuje slika 1.



Slika 1: absorpcijski materiali znižajo prispevek odbite zvočne energije in s tem celotno raven hrupa v prostoru

Za oceno uspešnosti znižanja hrupa z montažo zvočno absorpcijskih materialov najprej določimo oddaljenosti, na katerih začne prevladovati odmevna komponenta hrupa. Zvočna moč L_w posameznih hrupnih virov je stalna, z oddaljenostjo pa se spreminja imisijska raven njihovega zvočnega tlaka L_p . Zvezo med njima v danem prostoru s povprečno konstanto prostora R na oddaljenosti r približno opisuje naslednja enačba

$$L_p = L_w - 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad 2)$$

pri čemer je Q faktor usmerjenosti. Največkrat ga približno ocenimo z vrednostjo 2, ker so hrupni viri večinoma nameščeni na tleh, to je nad ravno, odbojno površino in večinoma dovolj oddaljen od sten. Prvi člen v oklepaju na desni strani enačbe predstavlja prispevek neposrednega zvočnega polja od vira, drugi člen vpliv odmevnosti. Absorpcija prične postajati učinkovita, ko postane drugi člen večji od prvega, torej

$$\frac{4}{R} > \frac{Q}{4\pi r^2} \quad 3)$$

ali

$$R > \frac{QR}{16\pi} \quad 4)$$

Konstanta prostora je povezana z absorpcijo, kar izraža enačba

$$R = \frac{S\alpha}{1-\alpha} = \frac{A}{1-\alpha} \quad 5)$$

pri čemer je A ekvivalentna absorpcijska površina in α povprečni koeficient absorpcije zvoka notranjih mejnih površin prostora. Povečanje absorpcije zato nima učinka na lokacije v bližini hrupnih virov, uspešno pa je na večjih oddaljenostih. Na splošno je pri sanaciji z zvočno absorpcijskimi materiali treba zagotoviti neko minimalno vrednost nove konstante prostora R_{2min} skladno z enačbo

$$R_{2min} > R_1 10^{0,1\Delta L} \quad 6)$$

pri čemer je ΔL zahtevano znižanje ravni hrupa zaradi povečanja sobne konstante iz prvotne vrednosti R_1 .

Sledeče je opisano v slovenskem pravilniku [4], kjer ni zahtevano kako zagotavljati primerne akustične razmere v prostorih s pomembno dobro razumljivostjo govora in multimedijskih vsebin v predavalnicah, telovadnicah, šolskih večnamenskih prostorih in avlah,

sejnih sobah, sodnih dvoranh, ipd. Smernica [4] ne obravnava prostorov s posebnimi akustičnimi zahtevami, kakor npr. koncertne, operne in gledališke dvorane, kinodvorane, radijski in tv studii ter prostori v glasbenih šolah in akademijah, kakor tudi ne prostorov s prostornino večjo od 8.500m^3 . Za stavbe s takimi prostori je treba izdelati projektno nalogo za prostorsko akustiko z določenimi zahtevami in parametri za ustrezne akustične rezultate.

2.1 Telovadnice, športne dvorane in dvoranska kopališča

Smernica [4] deli te prostore glede na način njihove uporabe. V prvi skupini so prostori, ki so namenjeni posamični uporabi (pouk samo enega razreda, ena športna skupina) v drugi skupini so prostori, v katerih hkrati poteka pouk več razredov ali je več športnih skupin. Optimalne vrednosti odmevnega časa T_{opt} v prostorih skupine 1 in 2 (praznih, brez publike) v odvisnosti od prostornine V so določene z naslenjima enačbama in v na diagramu 1:

- prostori skupine 1 (prostor 1) $T_{opt.}=1,27 \log V - 2,49 \quad 7)$
- prostori skupine 2 (prostor 2) $T_{opt.}=0,95 \log V - 1,74 \quad 8)$

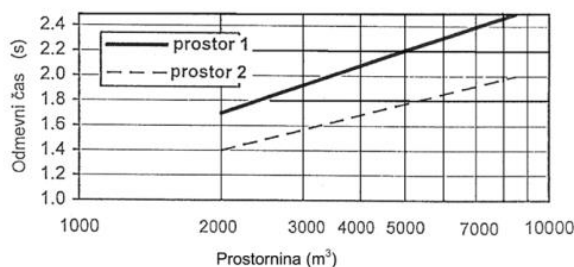


Diagram 1: Optimalne vrednosti RT_{60} za telovadnice, športne dvorane in dvoranska kopališča

Optimalne vrednosti odmevnega časa in tolerančno območje RT_{60} za posamezne vrste prostorov so povzeti po standardih DIN 18041 ter Önorm B 8115-3.

3 Cilj meritev

Cilj meritev je pridobitev podatkov za zunanji in notranji hrup ter obnašanje različnih frekvenc med 20 Hz in 20 kHz odvisno od absorpcije na površinah in resonance z računalniškim programom Room EQ Wizard (REW) [5]. Preko teh lahko pravilno ocenjujemo sedanjo stanje in projektiramo ustrezne izboljšave in uporabo določenih materialov.

Izbrana dvorana se nahaja pri kmetijski šoli Grm in Biotehniški gimnaziji v Novem mestu ob vznožju vinskih goric imenovanih Trška gora, lepo umaknjena iz samega mesta. Včasih, ko je imela šola še jahalni tečaj, se je dvorana uporabljala za jahanje. Zunanost dvorane je iz ene strani obdana z parkirišči, od koder vsakič ko se pripelje avto prihaja velik hrup. Iz druge strani pa travnato površino, kjer je hrupa manj.

Dvorana ima talno površino 985m² in je pravokotne oblike. Streha je narejena iz dveh poševnih krakov in ima na sredini na najvišji točki svetlobni trak iz litega akrilnega stekla. V notranjosti je velika toplotna in prezračevalna naprava (TPN) s prezračevalnimi cevmi speljani v dva kraka ob vrhu kupole stropa. Navpične stene so sestavljene iz betonskih stebrov ter vmesno zapolnjene z tankim polikarbonatnimi ploščami. Kvadratura polikarbonatnih plošč ob straneh dvorane je 718 m². Zaradi polikarbonatnih plošč je dvorana pred zunanjim hrupom zelo slabo izolirana.

Dvorana ima ob strani tudi *tunel*, kateri je ob večjih prireditvah namenjen gostinskemu delu. Dvorano in tunnel ločuje iz lesa narejen pult. Struktura tal dvorane je talna plošča, hidroizolacija, cementni estrih in epoksi premaz.

4 Nastavitev in kalibriranje programa REW 5.0

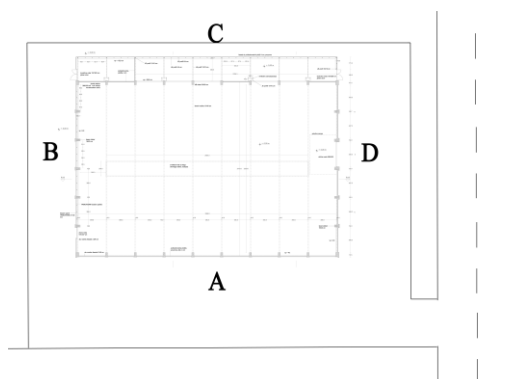
Prosto dostopen program na spletu REW [5] je programska oprema starejše izvedbe za akustično merjenje in analiziranje prostorov in zvočniških odzivov s primernimi sposobnostmi pri merjenju odmevnega časa s prikazovanjem časovno funkcijo in *waterfall* impulznega odziva, zakasnitve in spektralni vpad, spektrogrami in krivulje energije v času, izračun odmevnega časa ter izračun Thiele-Small parametrov. med 20 Hz in 20 kHz.

V programu REW nastavimo vhodno in izhodno napravo, v našem primeru Fonometer Rion NL-18 in zvočna kartica z izhodom povezanim na zvočnike.

S kalibriranjem zvočne kartice dosežemo zaželeno natančnost tako, da povežemo izhod ter vhod kartice in dobimo t.i. *loop*. Vključimo funkcijo kalibriranja in izravnamo nivoje signala. REW omogoča shraniti kalibracijo za naslednje meritve z istimi aparaturami [6].

5 Zunanji in notranji hrup

Težave zunanjega hrupa povzročata promet in okoliška kmetijska dejavnost. Skozi dan hrup prihaja iz obdelovalnih površin ter kmetijskih strojev, ki po 19.00 uri pojenja. S fonometrom smo natančno izmerili hrup izven dvorane in v njej v dBA, dBC in dBflat ob 14.00 uri na običajen delovni dan na vseh štirih straneh dvorane. Rezultati so prikazani na sliki 2 in v tabeli 1v:



Slika 2: Prikaz 4 točk meritev zunanjega hrupa

	A	B	C	D
dBA	40	40	49	54
dBC	62	54	65	72
dB flat	67	60	70	74

Tabela 1: Prikaz rezultatov meritev zunanjega hrupa

Notranji hrup smo ocenjevali z izklopljeno in tudi z vklopljeno veliko TPN. Rezultati izklopljene (spodnje črte) ter vklopljene (zgornje črte) TPN prikazujejo diagrami 3, 4 in 5:

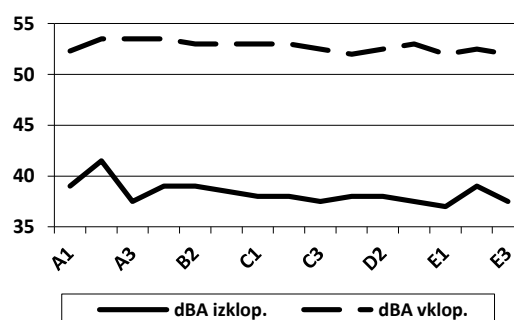


Diagram 3: Meritev notranjega hrupa izklopljene (spodaj) in vklopljene (zgoraj) TPN z nastavitvijo dBA

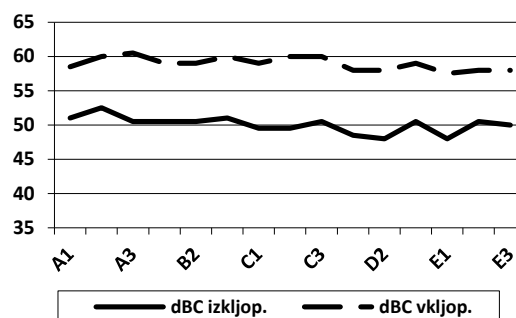


Diagram 4: Meritev notranjega hrupa izklopljene (spodaj) in vklopljene (zgoraj) TPN z nastavitvijo dBC

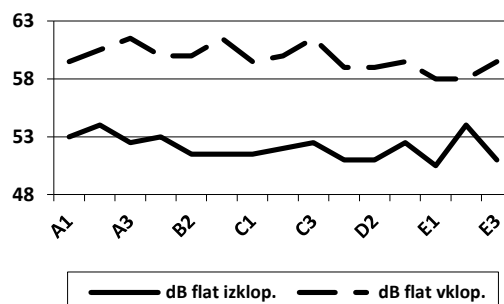


Diagram 5: Meritev notranjega hrupa izklopljene (spodaj) in vklopljene (zgoraj) TPN z nastavitvijo dBflat

6 RT₆₀

Zunanji in notranji hrup nista odvisna od predvajanih signalov, kateri so popolnoma odvisni od RT₆₀, tako da notranje meritve zelo dolgega RT₆₀ smo izvedli na 15 točkah (s tem kar prekoračili zahteve po ISO 3382 [7]), med katerimi smo se premikali z aparaturami. Meritve smo izpeljali najprej v prazni dvorani ter kasneje v polni

dvorani z približno 200 razvrščenimi ljudmi. Preko zvočnika smo spustili sinusni prelet med 20 Hz in 16.000 Hz in z REW primerjali dobljeni signal z referenčnim in s tem dobili vse potrebne podatke.

Po analizi meritev, smo ugotovili, da smo pri dolgih in natančnih pripravah spregledali le pomemben podatek o programu, kateri lahko procesira odmevni čas do največ 2". RT₆₀ Novomeške dvorane je dolg vsaj 7 sekund in so posledično bile frekvenčne meritve napačno opravljene in s tem nismo pridobili ustreznih rezultatov.



Slika 3: Prikaz 15 točk meritev v dvorani

7 Resonance

Resonančne frekvence so lahko posledica samih dimenzij dvorane in zaradi resonanc posebnih materialov ali površin. Preverjali smo jih preko zvočnika s signalom med 20 Hz in 10 kHz z jakostjo med 80 in 90 dBA/1m. Prve močne resonančne frekvence so pozvročili stenski polikarbonatni paneli med 22 Hz vse do 58 Hz, kjer se je pojavila resonanca TPN. Veliko resonanc so se izmenjevale vse do 255 Hz; nad to frekvenco so bile resonance materialov zelo šibke in zanemarljive. Izstopajo le 70 Hz, 92 Hz, 117 Hz, pri katerih resonira material na stropu. Vse resonančne frekvence so predstavljene v diagramu 6:

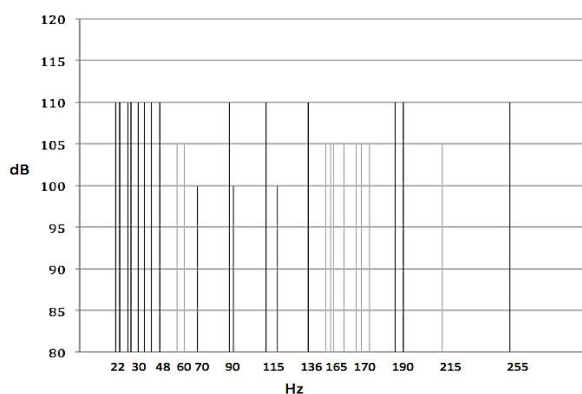


Diagram 6: Resonančne frekvenc materialov v dvorani polikarbonatne plošče (110 dB), TPN (105 dB) in material na stropu (100 dB)

8 Zaključek

Akustično teoretično znanje smo uporabili za razširjene meritve v prenovljeni zelo kritični dvorani Novomeške biotehniške šole. Meritve so bile uspešne za zunanji in notranji hrup na običajen delovni dan, za katerega smo ugotovili premočnega zunanjega hrupa prometa do 54 dBA, 72dBC in 74 dBflat in notranjega hrupa izklopljene TPN do 42 dBA, 53dBC in 54 dBflat ter priključene TPN do 53 dBA, 61dBC in 62 dBflat.

Natančno smo ugotovili resonančne frekvence dvorane, TPN ter materialov med 20 Hz in 300 Hz z postopnim zviševanjem frekvence za 1 Hz do 30 dB. Ugotovili smo, da bi resoniranje plošč lahko ublažili z dodano gumijasto snovjo med spoj polikarbonatne plošče ter nosilci.

Za meritve RT₆₀ smo uporabili računalniški program REW, za katerega smo že na začetku spregledali podatek o procesiranju količine signala le do 2". S tem so pridobljeni podatki lahko uporabni le za izračunavanje Early Decay Time (EDT). Ugotovili smo tudi, da če bi signal najprej snemali in le kasneje procesirali, bi tudi z napačnim programom lahko ukrepali, ker bi imeli na razpolago originalne sinusne prelete za sedajšnje le za nas posodobljeno verzijo REW programa in bomo zato meritve še enkrat izvedli na začetku septembra 2014.

Literatura

- [1] F. Policardi-Antoncich, *S/N and IACC requirements in electroacoustical sound space re-creation: Garda 2010 case study*, Elektrotehniški Vestnik vol. n.79, n.4, pp.157-160, Ljubljana - Slovenija, 2012 ISSN 2232-3228
- [2] L. L. Beranek, *Concert halls and opera houses*, Springer, New York 2004
- [3] Barron M., *Architectural acoustics and architectural design*, Taylor&Francis, London 2009
- [4] http://www.mzip.gov.si/fileadmin/mzip.gov.si/pageuploads/zakonodaja/graditev/tsg_005_zascita_pred_hrupom.pdf, 10. 4. 2014
- [5] REW <http://www.roomeqwizard.com/>, 13. 5. 2014
- [6] Andraž Žnidarčič, *Analiza akustičnih lastnosti bivalnega prostora z različnimi metodami ter eksperimentalna izboljšava sweet spot-a*, dplomska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2013
- [7] F. Policardi, *Performance hall stereophonic reverberation time accurate measurement and new graphic implementation*, 36. Deutsche Jahrestagung für Akustik Deutsche Gesellschaft für Akustik, Berlin 2010, pp. 941-944, ISBN 987-3-9808659-8-2
- [8] W. Ahnert, W. Schmidt, *Fundamentals to perform acoustical measurements*, <http://www.renkusheinz.com/easera/easeraappendixspv.pdf>, 20. 7. 2014