

# Nekonvencionalen poskus reševanja slabih akustičnih lastnosti v prazni dvorani

Franc Policardi-Antoncich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LUCAMI, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija  
franc.policardi@fe.uni-lj.si

## Unconventional experiment to solve poor acoustics in a small empty hall

*Acoustics in empty halls and rooms is usually very poor. An unusual trial with very low cost materials has been developed as an idea first (2), through specific room analysis (3), search and correct materials choice (4) and then realized in the Goriška region close to Vipava as a proof of concept (5, 6, 7). Results (8, 9) show good accordance with the initial idea and the ability to a) eliminate flutter echo, b) low high frequency peaks, c) smoothen low frequency peaks, c) smooth resonant frequencies and d) smooth overall acoustic response i.e.  $RT_{60}$  (5).*

*This small text demonstrates the feasibility and the applicability of the low budget room acoustic correction concept.*

## 1 Uvod

Akustično obnašanje dvoran je še dandanes pod močno lupo. Običajen način razumevanja akustičnega obnašanja dvoran predpostavlja uporabo nekaterih normiranih meritvenih procedur po ISO Standardu 3302 [1], ISO Standardu 140-4 [2], ISO Standardu 354 [3] ter ISO Standardu 3742-1 [4], katere temeljijo na teoretičnem konceptu difuznega zvočnega polja. Na začetku procesa lahko teoretično izračunamo nekaj pomembnih parametrov le s pomočjo dimenzij in obliki dvoran ter specifičnih karakteristik površinskih in gradbenih materialov. V resnici nam samo realne meritve lahko podajo dovolj koristnih informacij, preko katerih lahko vsaj teoretično točno ocenjujemo in eventualno projektiramo možne spremembe in izboljšave v dvorani.

Žal vse meritve opravimo v prazni dvorani [1] zato, ker publika ne bi vzdržala toliko časa v popolni tišini in pod neprijetnimi merilnimi signali. Tako ali tako bi bila in je tudi v realnosti prisotnost publike zelo pomembna, ker vsak človek predstavlja akustično absorpcijo preko svojega telesa in oblek, akustično difuzijo in difrakcijo zvoka preko svoje nesimetrične oblike, zaseda prostor in posledično zmanjšuje volumen dvorane, kjer se akustično valovanje ne more več pojaviti, je vir toplote in vlage itd., tako da vsi ti in še dodatni dejavniki močno vplivajo na akustične lastnosti pri različnih frekvencah.

Spremembe akustičnega obnašanja dvorane normalno opravimo preko: a) spremembe oblike dvoran, b) spremembe površinskih materialov, c) postavitve

določenih absorpcijskih in difuzijskih rešitev. Ta pristop je ponavadi precej zapleten in drag, zato so tudi enostavne, poceni in kakovostne rešitve preko nekonvencionalnih materialov zelo dobrodošle.

Potrebno je spomniti, da razporeditev materiala močno vpliva na akustične lastnosti dvorane, tako da npr. difuzna razporeditev omogoča bolj enakomeren nadzor osnovnega odmevnega časa (Reverberation Time -  $RT_{60}$ ), medtem ko bolj koncentrirana razporeditev materiala povzroča, da sta akustična mikroklima  $RT_{60}$  različna npr. za glasbenike in za poslušalce.

## 2 Prvi koncept

Akustična sanacija dvorane v prostorih krajevne skupnosti v Ložah pri Vipavi je bila opravljena v prostoru, ki je namenjen za manjše koncerte, otroške predstave in sestankom krajevne skupnosti.

Prišli smo do ideje, da bi razvili sistem za izboljšanje akustike dvorane preko uporabe le enega poceni in nenavadnega materiala za celotno dvorano. Želeli smo si tudi, da bi z uporabo istega materiala in njegove razporeditve istočasno zagotovili nekaj absorpcijskih in nekaj difuzijskih lastnosti ter pri tem zagotovili skladnost z zahtevami ZVKD.

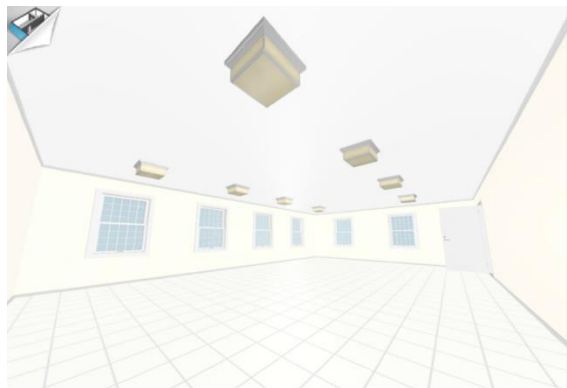
Zaželeno akustične korekture slabega akustičnega obnašanja dvorane bi tako pridobili preko ugodne izbire materiala ter preko vnaprej določene razporeditve in količine materiala.

## 3 Dvorana

Izbrali smo prazno pravokotno "shoe-box" dvorano v Ložah pri Vipavi, ker bi imeli možnost neomejenih poskusov in ker je lokacija posebno mirna ter brez velikih izvorov hrupa v okolici. Stavba v kateri se nahaja dvorana ima letnico izgradnje 1945, zidovi so zelo debeli in podi so še delno leseni.

Dvorana ima pravokotno obliko, stene so zidane s polnimi zidaki ter prekrte z ometom. Tla so položena s 4mm tankimi linolejskimi ploščicami na betonski podlagi. Strop je ravno tako betonski, pri čemer je strop spušččen v izvedbi viseče aluminijaste konstrukcije z mavčnimi polnili (armstrong 58 x 58cm) ter lučmi. Ventilacija ter električna napeljava se nahajata nad visečim stropom. Dvorana je dnevno zelo razsvetljena, saj ima kar 6 aluminijastih oken velikosti 2,1m x 1m. Štiri okna se nahajajo na južni steni, na zahodni steni dve ter ena vrata na severni steni.

Osnovne mere dvorane: dolžina 9,10m, širina 5,89m, osnovni strop - tla 3,28m in viseči strop - tla: 3m kot je prikazano na sliki 1.



Slika 1. Računalniški 3D prikaz dvorane v Ložah pri Vipavi

Prvi akustični vtisi so nakazovali, da zunanjega motečega hrupa praktično ni in da je razsvetljava dovolj tiha, vendar so prisotni zelo moteč "flutter echo" oz. trepetajoči odmev, močan odmev ene nizke frekvence in predolg odmev visokih frekvenc.

#### 4 Akustični absorpcijsko-difuzijski material

Predpostavimo, da meritve akustične impedance materialov niso del tega prispevka, v katerem se bomo osredotočili na rešitev realne akustične problematike.

Za širokopasovno absorpcijo zvoka poznamo različne pene, za specifične frekvence lahko uporabimo Helmholtzerjeve resonatorje in za določene pasovne širine resonančne plošče. Difuzijo zvočnega valovanja lahko zagotovimo preko Schroederjevih difuzorjev, preko trdih ukrivljenih materialov in preko togih 3D materialov.

Želeli smo si, da bi določen material istočasno imel nekaj absorpcijskih in nekaj difuzijskih lastnosti in to lahko pridobimo preko: a) oblike materiala, b) njegovih fizikalnih lastnosti, c) 3D površine, d) oblike razporeda in e) količine materiala. Omenjene lastnosti so odvisne od smeri prihajanja zvočnega vala kar je tako kritično, da se za specifične valovne dolžine nekateri materiali v prvi situaciji obnašajo kot absorberji in v drugi kot reflektorji.

Naš material bi moral največ absorbirati in odbiti po različnih kotih visoke frekvence in po raznih poskusov smo se odločili za absorpcijo preko poroznega tankega materiala, difuzijo preko 3D oblike istega materiala ter obe karakteristiki preko posebno postavitve v dvorani.

Odločili smo se, da bomo absorpcijske lastnosti preverjali na dejanskih vzorcih preko različnih poskusov in to navpično in difuzno. Zbiranje materialov je trajalo nekaj časa, dokler nismo naleteli na primerren polporozni celulozni vzorec.

3 mm debele lepenkaste polporozne plošče imajo gostoto le 250g/m<sup>2</sup> lahke in so izkazovale svoje absorpcijske lastnosti pri visokih frekvencah;

polsferična oblika istega materiala nam je izkazovala dobro lokalno difuzijsko lastnost, tako da smo se odločili za poskus.

Zbrali smo različne vrste sadjarske embalaže in jih naprej vzorčno testirali. Najboljše zaželene karakteristike sta izkazovali oblika s 6 polsferičnimi difuzorji in oblika z 10 polsferičnimi difuzorji, obe prikazani na sliki 2.



Slika 2. 6x polsferični in 10x polsferični akustični material

Končna odločitev je padla na 10 polsferično obliko, ker je ta vzorec bolj tog in ima 8 x 4 mm velikih okroglih odprtin. Te luknjice postanejo pomembne za izražanje difuznosti pri visokih frekvencah.

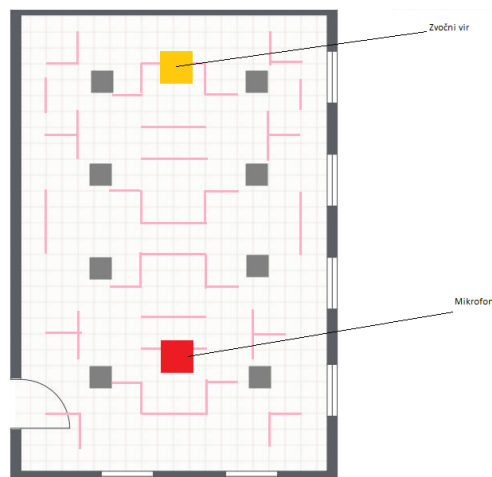
Izbrani material smo dvodimenzionalno oblikovali tako, da bi ga bilo mogoče brez težav montirati na stene in na strop. Izbrali smo posamezne plošče dimenzij 50 x 80 cm.

#### 5 Materiali in metode

V prazni pravokotni 54m<sup>2</sup> in 160 m<sup>3</sup> veliki dvorani na Vipavskem smo opravili več poskusov.

Poskus s ploščami na stenah ni bil uspešen, zato smo se odločili za obešanje plošč na strop. Meritve smo opravili v soboto, ko zunanjega hrupa sploh ni bilo; notranji hrup smo lepo nadzorovali, saj smo bili na lokaciji sami.

Najprej smo dvorano popolnoma izpraznili in se odločili za postavitve aparatov na lokaciji kjer sta običajno oder in publika. Merilne aparature smo postavili na 2 stola. Prvi stol smo uporabili za 2 zvočnika Genelec 8020C [5] z usmeritvijo 60° (preko te postavitve smo kompenzirali neizogibno direktivnost visokih frekvenc zvočnikov), na drugi stol zvočna kartica in računalnik. Postavitve je prikazana na sliki 3.



Slika 3. Razporeditev zvočnika in merilni mikrofona

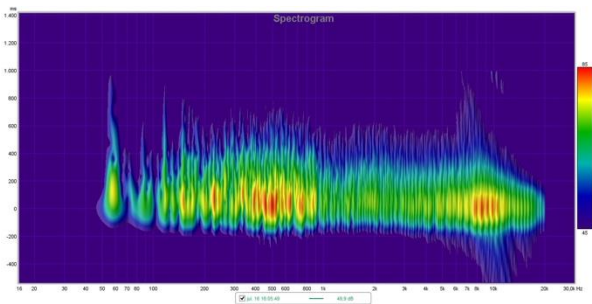
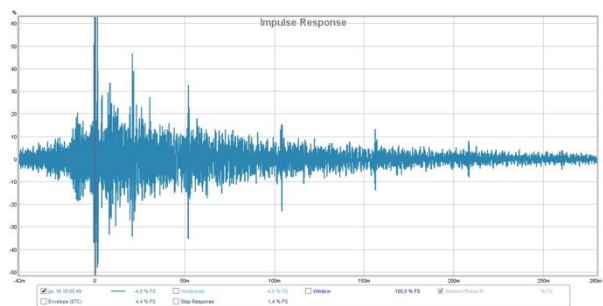
Merilni mikrofoni Peavey PVR-1 s frekvenčnim razponom 40Hz - 20kHz je imel svoje stojalo postavljeno na višino 1,20 m, kar predvidevajo že omenjeni ISO standardi; mikrofoni smo priključili preko XLR-XLR Klotz kabla na mešalno mizo Behringer XENYX 1202FX; merilne signale smo sproščali preko 2 zvočnikov Genelec 8020C.

Računalniški program REW v 5.1 - Room EQ Wizard Room Acoustics Software je obenem generiral sinusni prelet med 40Hz in 20kHz, ga snemal preko merilnega mikrofona in opravil vse kalkulacije na računalniku Asus. Program omogoča digitalno lineariziranje vsakega mikrofona [6], tako da smo, glede na daljšo obdobje meritvenih procesov in zaželeno linearnost, elektroakustično karakteristiko digitalno linearizirali pred vsako meritvijo.

Predojačevanje in A/D konverzija sta bila opravljena preko zvočne kartice računalnika Asus.

Vsako meritev smo opravili 3 krat in rezultate povprečili, vendar so bile razlike res minimalne (+/- 1dB).

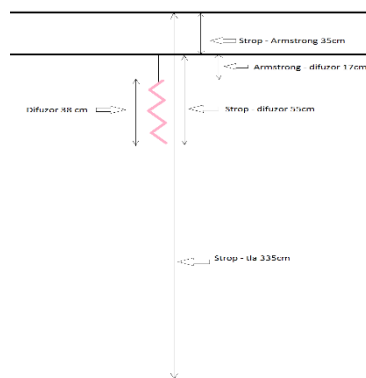
Na sliki 4 prikazujemo pridobljene rezultate impulznega odziva (zgoraj) in spektrograma (spodaj) z vnaprej določeno postavitvijo.



Slika 4. Akustično obnašanje prazne dvorane - impulzni odziv (zgoraj) in spektrogram (spodaj)

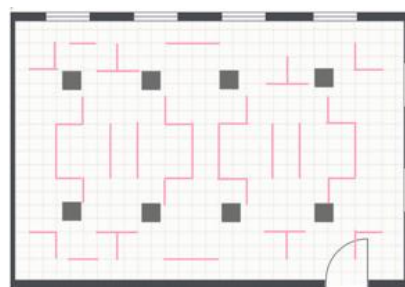
## 6 Postavitev akustično absorpcijsko-difuzijskih plošč

Po prvem neuspešnem poskusom na stenah smo se odločili, da absorpcijsko-difuzijske plošče obesimo navpično. Nekaj let nazaj je bil v dvorani postavljen viseči strop iz armstrong plošč, katerega ni bilo mogoče odstraniti. To slabost smo takoj spremenili v prednost in se odločili za obešanje plošč na aluminijski okvir stropa armstrong, kakor prikazuje slika 5.



Slika 5. Shematični prikaz obešanje plošč s stropa

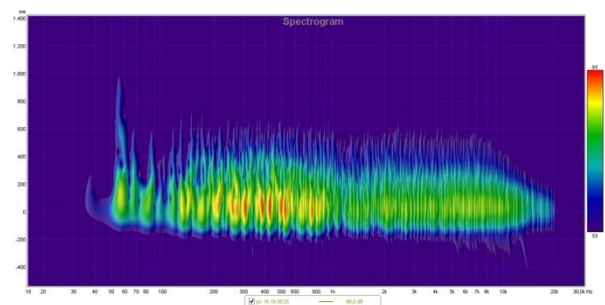
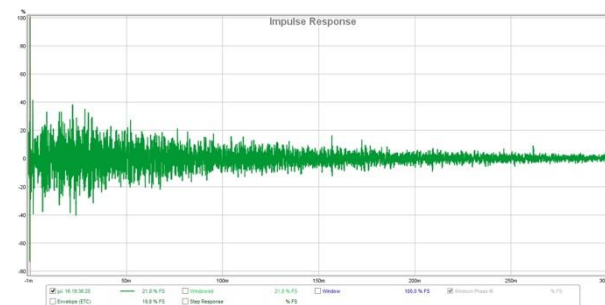
Ozračunali smo najboljšo postavitev in se odločili za pokrivanje največ direktnih zvočnih valov brez oviranja razsvetljave, kakor prikazuje slika 6.



Slika 6. Izbrana postavitev visečih plošč

## 7 Meritve v polni dvorani

Isti dan smo tudi opravili kompletne meritve s postavljenimi visečimi ploščami. Obešanje plošč je bilo dovolj enostavno in je trajalo le 3 ure.

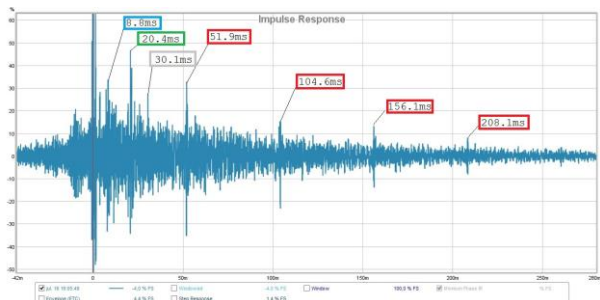


Slika 7. Akustično obnašanje preurejene dvorane- impulzni odziv (zgoraj) in spektrogram (spodaj)

Pri spektrih signala po sanaciji vidimo, da ima signal manj »izbruhoval«, kot jih ima signal pred sanacijo. Očitna sprememba je med 60Hz in 10kHz

## 8 Meritve in komentar

Vsako meritev smo opravili 3 krat v prazni in 3 krat v akustično tretirani dvorani ter rezultate povprečili, vendar so bile razlike res minimalne, v razredih +/- 1dB. Na sliki 8 natančno časovno analiziramo odmevni odziv v prazni dvorani.



Slika 8. Časovna analiza odmevnega odziva v prazni dvorani

### Prazna dvorana

Prvi slišni problem, trepetajoči odmev, se je jasno pokazal tudi v impulznem odzivu. Odločili smo se natančno analizirati vrhove in jih povezati s fizikalnimi dimenzijami dvorane. Pokazal se je problem med dvema krajšima vzporednima stenama in ne med daljšima z 52ms, 104ms, 156ms in 208ms zakasnitvijo odboja. Začetni vrhovi 9ms, 20ms in 30ms se v roku EDT (Early decay time) umirijo, ne predstavljajo daljšega problema in so pozitivni, ker dovolijo poslušalcu, da si slišno v možganih predstavlja obliko in dimenzije te specifične dvorane.

Iz analize spektrograma jasno razumemo, kako se dvorana obnaša časovno, frekvenčno in energetske v slišnem spektru. Slika 8 prikazuje frekvenčni problem nepopravljene dvorane pri nizkih frekvencah okoli 55Hz, padec med 60Hz in 100Hz ter močne energetske vrhove med 150Hz in 900Hz in med 7,5kHz in 12kHz. Istočasno prikazuje časovni problem s predolгим odmevom okoli 55Hz do 1s, okoli 110Hz - 150Hz do 800ms in s predolгим odmevom med 6kHz in 16kHz do 1,2s; posebej potrdimo trepetajoči odmev med 9,5kHz in 11kHz. Frekvenčno se dvorana izkazuje kot dovolj enakomerna, razen pri padcu med 60Hz in 100Hz.

### Popravljen dvorana

Iz impulznega odziva slike 7 vidimo, da se je prvi slišni problem, trepetajoči odmev, popolnoma umiril. Analiza prikazuje, da se niso pojavili drugi nezaželeni akustični fenomeni, niti v sklopu drugih dveh daljših vzporednih sten.

Začetni vrhovi 9ms, 20ms in 30ms so se precej zmanjšali in to pomeni, da si poslušalec v začetnem času upadanja zvočnega signala EDT ne more več slišno predstavljati oblike in dimenzij te specifične dvorane, in čeprav tega dejstva ne ocenjujemo pozitivno, ta faktor ni tu posebej pomemben.

Spektrogram na sliki 7 poleg tega prikazuje frekvenčni problem pri nizkih frekvencah okoli 55Hz, padec med 60Hz in 100Hz se je zmanjšal, močni energetske vrhovi

med 150Hz in 900Hz so se zmanjšali ter se med 7,5kHz in 12kHz precej poravnali. Časovni problem s predolгим odmevom okoli 55Hz je še prisoten, vendar iz specifične oblike razumemo, da je zelo verjetno problem v merilni verigi in ne v dvorani. Okoli 110Hz - 150Hz se je odziv poravnal in predolgi odmev med 6kHz in 16kHz ter o trepetajočem odmevu med 9,5kHz in 11kHz ni več sledu.

Sedaj se dvorana frekvenčno izkazuje kot lepo enakomerna, posebej nad 900Hz, kar zelo verjetno omogoča dobro razumevanje glasbe in tudi hitrega govora.

## 9 Zaključek

Akustične meritve v prazni dvorani so torej normalne [1], vendar izkazujejo precej netočnih podatkov, saj bo med normalno uporabo dvorane publika vedno prisotna. 3D oblike materiala vpliva na obeh zaželeni karakteristiki, tako da smo se odločili preizkusiti ravne oblike, kockaste oblike in sferične oblike. Najboljši kompromis smo pridobili pri pravokotnih 2D dimenzijah s 10x 3D ploskasti oblikami. Tak kompromis zagotavlja istočasno absorpcijo na navpičen in difuzijski način ter difuzijo za največ frekvenčnih pasov.

Konceptualni preizkus spremembe akustičnih lastnosti dvorane brez investicije v materialih se je izkazal za uspešnega. Eksperimentalni rezultati jasno prikazujejo uničenje »flutter echo«, uravnoteženje srednjih in visokih frekvenc ter zmanjšanje nezaželenih energetskih vrhov. Tudi nekatere nizke frekvence so se za nekaj dB umirile in skupno frekvenčno in energetske obnašanje se je zgladilo.

Cenovni razred uporabljenega materiala je zelo nizek, zato bo s tem mogoče še veliko eksperimentirati brez denarnih težav.

## 10 Nadaljnje delo

Nadaljnje delo predvideva: poskus druge 2D oblike postavitev, poskus druge oblike 3D postavitev, poskus drugačne 3D oblike kosov/sectorjev/plošč in (zelo pomembno) pridobitev negorljivih materialov (ZVKD). Da bi pripomogli k še boljši postavitvi (absorpcija-difuzija), bomo opravili prostorsko 3D horizontalno in večslojno horizontalno postavitev plošč za pokrivanje direktnih zvočnih valov v celoti.

## 11 Zahvala

Avtor se zahvaljuje svojemu študentu Eriku Ježu iz VŠŠ MMK v Vrtojbi za praktično sodelovanje pri projektu ter za pripravo slik in grafov.

## Literatura

- [1] ISO Standard 3302
- [2] ISO Standard 140-4
- [3] ISO Standard 354
- [4] ISO Standard 3742-1
- [5] <https://www.genelec.com/studio-monitors/8000-series-studio-monitors/8020c-studio-monitor>
- [6] <http://www.roomeqwizard.com/>