

Pomen natančnih meritev prostorskih modalnih frekvenc

Franc Policardi-Antoncich¹

¹ LUCAMI, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

franc.policardi@fe.uni-lj.si

About the importance of exact room modal frequencies measurements

Sound propagation is theoretically a simple matter but room acoustics deals with reality complexity, multiple phenomena interconnection and mutual influence. Room acoustics is even today problematic because of theory and practice difficult matching, in most of the cases caused by difficulties in exact room modeling.

A good sound impression for listeners should take into account an occupied hall sound behaviour and in this paper we will focus on room standing modal frequencies a) from a theoretical point of view, b) measure real empty room behaviour c) measure real room with listeners and d) compare results, demonstrating the extreme importance of room exact modal frequency analysis before acoustic treatment.

1 Uvod

Propagacija zvoka je teoretično enostavna, se vendar prostorska akustika sooča s kompleksno realnostjo, s povezavo več fenomenov in z medsebojnimi vplivi. Prispevek predpostavi osnove prostorske akustike in se osredotoča na specifične negativne akustične pojave imenovane *resonance*. Prispevek obravnava le jakost posameznih frekvenc, ne pa tudi sprememb jakosti v daljšem časovnem obdobju.

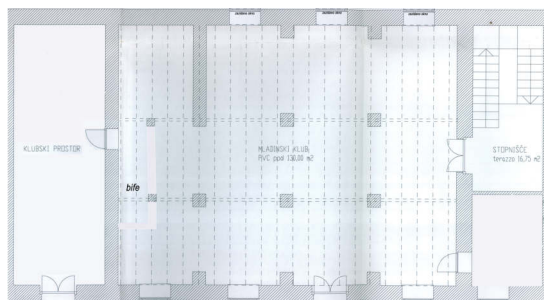
Za doseganje dobrega zvočnega vtisa na poslušalce moramo upoštevati obnašanje zvoka v polni dvorani in v prispevku se bomo osredotočili na arhitektonsko analizo stavbe in dvorane, na prostorske stoječe modalne frekvence a) s teoretičnega vidika, b) izmerili bomo obnašanje prazne dvorane, c) ponovno bomo izmerili obnašanje dvorane s poslušalci in d) primerjali rezultate. Dokazali bomo pomen točnosti analize modalnih frekvenc obstoječega prostora pred akustično obdelavo.

V tem kontekstu smo uporabili dve orodji za akustične meritve in izračune, AcousticCalculator in RoomEQ Wizard. Meritve frekvenčnega odziva smo opravili v glasbenem klubu Ilirske Bistrice in natančno analizirali rezultate za nadaljnje sanacijsko delo.

2 Arhitektonsko stanje

Velikost stavbe znaša 20m x 12m x 11m; temelji, klet ter prvo nadstropje so sezidani iz kamna in vsi nosilni zidovi so debeli 80cm; stavba ima poleg zunanjih zidov tudi dodatne kamnite podporne stebre ter stene debele 60cm [1]. Med vsakim nadstropjem je strop, narejen iz lesenih

gredi ter desk; poleg notranjih zidov dvorano v prvem nadstropju nosijo štiri po širini postavljene glavne gredi, ki so vzdane v podporne stebre v kleti. Na glavnih gredeh slonijo manjše gredi, postavljene po dolžini stavbe. Mladinski klub Nade Žagar [1] že več desetletij redno organizira glasbene dogodke in glede na današnja pričakovanja poslušalcev je izboljšava akustičnega obnašanja notranjega prostora nujna. MKNŽ je le rahlo preuredil notranjost kleti, kjer so danes koncertna dvorana za do 150 obiskovalcev, bife in klubski prostor.



Slika 1: Tloris kleti po zadnjih spremembah leta 1980

Stene kluba so do višine 1,5m oblečene v lesene deske in preostanek vidnih zidov je prepleskan. Les pripomore k boljši akustiki zaradi delne absorpcije in posledično zmanjšuje količino odbite energije, tako da energija odbojev hitreje pade pod mejo slišnosti in po naši meritvi v praznem prostoru RT_{60} znaša približno 1.5s. V polni dvorani se RT_{60} zmanjša na 0,8s, kar pripomore k dobri razumljivosti (STI).

Koncertna dvorana je pravokotne oblike mer 8 x 10m z višino 2.6m. Tla so betonska s 5mm debelo talno oblogo iz linoleja in strop je v celoti iz masivnega lesa: gredi velikosti približno 25cm x 25cm so postavljene po celotni dolžini hiše. Na gredeh je postavljen lesen pod, ki služi kot tla v zgornjem nadstropju. Tla so ravna in vzporedna s stropom, vendar zaradi oblike stropa ne pride do negativnih akustičnih pojavov. Akustično obnašanje lesenega stropa spominja na zelo velik difuzor, ki zvok razpršuje v različne smeri in hkrati preprečuje negativne akustične pojave med vzporednimi površinami.

Več kot 1.000 izvedenih koncertov in posebno arhitektonsko stanje dvorane sta avtorja spodbudila za natančno analizo modalnih resonančnih frekvenc (MRF), kajti meritve RT_{60} ter S/N se nista pokazali kot problematični.

3 Prostorske modalne frekvence

Znano je, da negativni akustični pojavi slabo vplivajo na razumljivost in natančnost prenašanja informaciji preko zvočnega signala. T.i. pojav *modal ringing* oz. modalno zvonjenje nastopi, ko se v prostoru pojavijo stoječi valovi modalnih resonančnih frekvenc (MRF) pri frekvencah nekaj pod 200Hz [2]. Glede na valovno dolžino in na določen prostor so ti ponekod močnejši in ponekod tišji, ker se med seboj algebraično seštevajo. Modalno zvonjenje se navadno pojavi v prostorih, kjer so glavne površine vzporedne in sicer pri frekvencah, pri katerih je celotna valovna dolžina, polovica, četrtina itn. enaka razmerju stranic prostora.

Izračun modalnih resonančnih frekvenc (MRF)

Za izračun MRF moramo izmeriti širino, dolžino in višino prostora, ker jih vedno računamo med dvema vzporednima površinama s pomočjo Rayleighove enačbe

$$f = \frac{c}{2L}, \quad (1)$$

pri čemer je f frekvenca, c hitrost zvoka in L dolžina stranice. MRF v glavnem delimo na aksialne, tangencialne in poševne [3]. Poleg osnovnih MRF izračunamo še višje harmonske frekvence, za katere smo uporabljali program AcousticCalculator [4].

V tabeli 1 so rezultati izračuna MRF do 200Hz pri aksialnih MRF po širini, dolžini in višini prostora označene z različnimi barvami z namenom prepoznavanja osnovne frekvence ter večkratnikov osnovne frekvence in frekvenc, ki se ponavljajo ter so zaradi tega bolj moteče. Označene frekvence imajo zelo velik vpliv na akustiko prostora in smo jih primerjali s frekvencami rezultat akustičnih meritev.

Tabela 1. Izračunane aksialne modalne frekvence do 200Hz

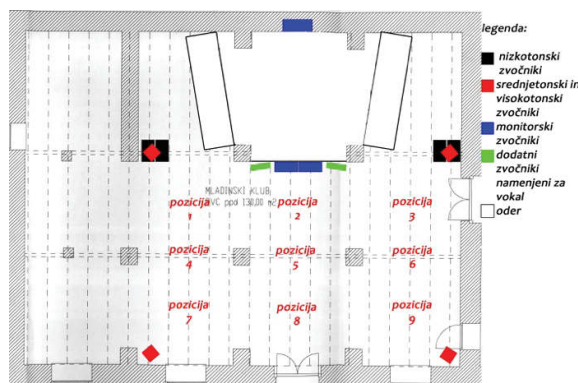
Aksialne			Tangencialne			Poševne
Po dolžini	Po širini	Po višini	Dolžina - širina	Dolžina - višina	Širina - višina	
17.02	21.27	6.54	27.24	18.23	22.25	28.01
34.03	42.54	13.09	45.81	18.23	24.97	30.22
51.05	63.81	19.63	66.04	21.47	28.94	46.28
68.06	85.08	26.18	86.76	25.98	33.73	40.66
85.08	106.34	32.72	40.13	31.22	43.04	54.87
102.09	127.62	39.27	54.47	34.65	44.51	42.21
119.11	148.88	45.81	72.31	36.46	46.85	47.65
136.12	170.15	52.35	91.63	39.29	49.95	56.02
153.14	191.43	58.9	55.3	42.93	64.14	
			66.45	51.46	65.13	
			81.71	53.69	66.76	
			99.21	57.37	68.97	
			71.31	68.37	85.33	
			80.26	69.31	86.08	

4 Meritev MRF v prazni dvorani

Meritve frekvenčnega odziva prostora smo opravili preko prenosnega računalnika, zvočne kartice Focusrite Scarlett 2i2, kondenzatorskega vsesmernega merilnega mikrofona DBX M2 RTA [5] in z računalniško programsko opremo Room EQ Wizard V5.1 [6], katera omogoča meritve RT do 10s in grafično prikazuje močnostno ter časovno obnašanje zvoka.

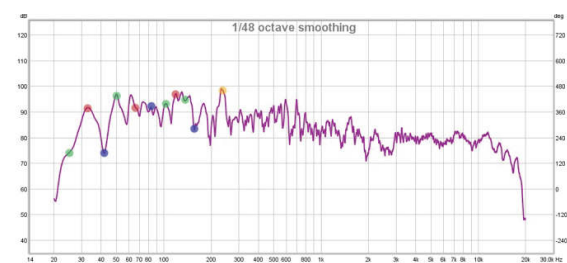
Zvočno kartico in merilni mikrofonsko smo natančno kalibrirali, saj REW V5.1 omogoča vključitev kalibracijske datoteke merilnih mikrofonskih. Tloris koncertne dvorane smo razdelili na 9 pravokotnikov in

opravili meritev z merilnim mikrofonom v 9 točkah, označenih na sliki 2.



Slika 2: Tloris koncertne dvorane z označenimi pozicijami meritev

Mikrofon je zajemal zvok na višini 1.6m, kar je povprečna višina človeškega ušesa. Opravili smo meritve celotnega človeškega slišnega frekvenčnega spektra s sinusnim preletom [7] med 20Hz in 20kHz pri jakosti 12dB FS dolžine 23.8s, 2-krat ponovljano. Graf na sliki 3 prikazuje primer "distorzije" v prostoru in omogoča točno določanje glasnosti posameznih frekvenc.



Slika 3: Primer: graf jakost vs. frekvenca

Pri izvajanju meritev smo ugotovili, da frekvenc nižjih od 30Hz naša elektroakustična oprema ne proizvede dovolj glasno; glasnost frekvenc nad 30Hz rahlo narašča in ko odziv nizkih frekvenc primerjamo z izračunanimi MRF ugotovimo, kakšen vpliv imajo resne MRF med koncerti. Največje razlike v glasnosti glede na merilne pozicije se nahajajo točno v območju izračunanih MRF. Odboji teh frekvenc se v nekaterih delih prostora seštevajo, v drugih odštejejo in fenomen se na grafu prikaže v obliki vrhov in dolin. Iz grafov je za vsako pozicijo razvidno, da največ problemov povzročajo nizke frekvence do 200Hz z ogromno razliko tudi do 35dB. Med 200Hz in 1kHz so razlike velike do 15dB; nad 1kHz človeški slušni sistem MRF težko razloči. Pri nizkih frekvencah in ne glede na pozicijo v prostoru opazimo dominantne MRF pri 51Hz, 63Hz, 70Hz, 85Hz, 100Hz, 136Hz, 150Hz, 170Hz, 190Hz in še okoli 245Hz. Glede na izračunane in izmerjene MRF je razvidna razlika med teorijo akustike [2] in prakso [3]: prisotna je zelo močna MRF okoli 245Hz.

S tako ugotovitvijo smo še enkrat izračunali MRF do 300Hz in pridobili še 2 dominantni vrednosti pri aksialnih MRF, po širini na 245,24Hz in dolžini na 238,22Hz. S tem smo ugotovili, da MRF pri 119,11Hz,

katera ni izgledala pomembna, postane zelo izrazita pri svoji 1. harmonski frekvenci.

Tabela 2: Izračunane modalne frekvence do 300Hz.

Aksialne			Tangencialne			Poševne
Po dolžini	Po širini	Po višini	Dolžina - širina	Dolžina - višina	Širina - višina	
17.02	21.27	6.54	27.24	18.23	22.25	28.01
34.03	42.54	13.09	45.81	18.23	24.97	30.22
51.05	63.81	19.63	66.04	21.47	28.94	46.28
68.06	85.08	26.18	86.76	25.98	33.73	40.66
85.08	106.34	32.72	40.13	31.22	43.04	54.87
102.09	127.62	39.27	54.47	34.65	44.51	42.21
119.11	148.88	45.81	72.31	36.46	46.85	47.65
136.12	170.15	52.35	91.63	39.29	49.95	56.02
153.14	191.43	58.9	55.3	42.93	64.14	
238.22	245.24		66.45	51.46	65.13	
			81.71	53.69	66.76	
			99.21	57.37	68.97	
			71.31	68.37	85.33	
			80.26	69.31	86.08	

Sklep meritev v prazni dvorani:

- 1) različne pozicije v realnem prostoru prikazujejo različne rezultate glede jakosti in vedno potrdijo MRF;
- 2) po pregledovanju realnih grafov smo ugotovili, da se teorija [2] in praksa [3] v naši dvorani ne ujemata popolnoma. Še enkrat smo izračunali MRF in ugotovili, da je v našem primeru potrebno povečati Schröderjevo frekvenco vsaj do 300Hz;
- 4) na splošno je pri vseh meritvah jakost MRF v prazni dvorani velika, kar je bilo tudi pričakovano zaradi popolnoma vzporednih površin, vendar se poleg označenih frekvenc pojavijo tudi nekatere druge MRF pri 40Hz, 48Hz, 55Hz itd. do 250Hz;
- 5) velik problem v prazni dvorani predstavlja frekvenčni spekter med 60Hz in 200Hz, kjer je akustična energija prevelika za približno 5 do 10dB;
- 6) frekvenčni odziv pri vseh meritvah je dovolj linearen;
- 7) skoraj vse meritve potrdijo luknjo pri frekvenci 2kHz do 15dB;
- 8) visoke frekvence nad 800Hz bi lahko linearizirali preko izenačevalnika za dodatnih 8dB.

5 Meritev MRF v polni dvorani

Enake meritve smo opravili na 9 pozicijah tudi v polni dvorani, ker se glasbene oz. zvočne aktivnosti dogajajo v realni situaciji. Upoštevati moramo tudi, da se bodo glasbene vaje izvajale v prazni dvorani in zato je tako pomembno primerjati akustično obnašanje dvorane v prazni in v polni zasedenosti. Glede na veliko število grafov in podatkov bomo prikazali le sklep vseh meritev v polni dvorani:

- 1) jakost celotnega spektra je od prazne dvorane manjša za približno 10dB; na splošno je pri vseh meritvah jakost MRF v polni dvorani manjša, kar je bilo tudi pričakovano, vendar se poleg označenih MRF pojavijo tudi nekatere druge MRF pri 40Hz, 48Hz, 55Hz itd. do 250Hz;
- 2) velik problem v polni dvorani predstavlja frekvenčni spekter med 240Hz in 250Hz, kar se ujema z razširjenim teoretičnim izračunom MRF;
- 3) frekvenčni odziv je pri vseh meritvah v polni dvorani nekoliko bolj linearen;

- 4) različne pozicije v realnem prostoru prikazujejo različne rezultate glede jakosti in vedno potrdijo MRF;
- 5) po analizi realnih odzivov smo ugotovili, da se teorija [2] in praksa [3] tudi v polni dvorani ne ujemata popolnoma in tudi v tej situaciji smo preverili frekvence do 300Hz oz. nad teoretično Schröderjevo frekvenco do 200Hz preko (2)

$$2000 \times \sqrt{\frac{RT60}{V}} \quad (2)$$

- 6) problem v polni dvorani predstavlja frekvenčni spekter od 60 Hz do 90Hz, kjer je akustična energija višja za približno 5dB;
- 7) frekvenčni odziv je v polni dvorani pri skoraj vseh meritvah dovolj linearen, ker je akustični odziv absorpcije s strani publike jasno viden in globalno gledano je energija pod 200Hz skoraj naravno poravnana;
- 8) v polni dvorani se pri okoli 700 do 900Hz velikokrat pojavi vrh ali luknja za 6dB;
- 9) v polni dvorani skoraj vse meritve potrdijo luknjo na 2kHz tudi do -15dB;
- 10) v polni dvorani bi verjetno visoke frekvence nad 800Hz lahko linearizirali preko izenačevalnika za dodatnih 8dB.

6 Primerjava rezultatov v prazni in polni dvorani

Rezultate akustičnih meritev lahko ponazorimo na različne načine in zaradi lažje predstave smo v prejšnjih poglavjih označene problematične MRF ponazorili z različnimi intenzitetami barve: nad 90dB, med 80 in 89dB, med 70 in 79dB, med 60 in 69dB.

Prikazovanje rezultatov smo razdelili na 9 merilnih pozicij; te smo označili z jakostmi posameznih modalnih resonančnih frekvenc (Hz) v dB.

Tabela 3: Primerjava skale jakosti zvoka in barve: jakost modalne frekvence 34 Hz na 9 različnih pozicijah

a) prazna dvorana			b) polna dvorana		
92dB	94dB	90dB	75dB	75dB	78dB
87dB	83dB	84dB	73dB	78dB	72dB
78dB	88dB	78dB	67dB	72dB	61dB

Tabela 3 prikazuje primerjavo med prazno in polno dvorano za 34Hz. Za vse druge glavne MRF smo uporabili isti sistem prikazovanja.

Jakosti MRF se v prazni in polni dvorani pri 34Hz, 68Hz in 136Hz bistveno razlikujejo na vsaki od 9-ih merilnih pozicijah.

Iz grafov in iz zadnje tabele je razvidno, da je višja koncentracija jakosti modalnih frekvenc v sprednjem delu dvorane, da je nižja v srednjem delu in kar zadovoljiva v zadnjem delu, še posebej v polni dvorani.

Primerjava po posameznih pozicijah nam pri frekvenci 34Hz predstavi naslednje razlike: pozicija 1 za -17dB, pozicija 2 za -19dB, pozicija 3 za -12dB, pozicija 4 za -14dB, pozicija 5 za -5dB, pozicija 6 za -12dB, pozicija 7 za -21dB, pozicija 8 za -16dB in na poziciji 9 za -17dB.

Primerjava po posameznih pozicijah nam pri frekvenci 68Hz predstavi naslednje razlike: pozicija 1 za -9dB, pozicija 2 za -8dB, pozicija 3 za -14dB, pozicija 4 za -9dB, pozicija 5 za -18dB, pozicija 6 za -22dB, pozicija 7 za -7dB, pozicija 8 za -15dB in na poziciji 9 za -13dB. Primerjava po posameznih pozicijah nam pri frekvenci 136Hz predstavi naslednje razlike: pozicija 1 za -12dB, pozicija 2 za -21dB, pozicija 3 za -35dB, pozicija 4 za -13dB, pozicija 5 za -20dB, pozicija 6 za -9dB, pozicija 7 za -11dB, pozicija 8 za -18dB in na poziciji 9 za -14dB. Primerjava po posameznih pozicijah nam pri frekvenci 136Hz predstavi naslednje razlike: pozicija 1 za -12dB, pozicija 2 za -21dB, pozicija 3 za -35dB, pozicija 4 za -13dB, pozicija 5 za -20dB, pozicija 6 za -9dB, pozicija 7 za -11dB, pozicija 8 za -18dB in na poziciji 9 za -14dB.

7 Ugotovitve

V prispevku smo teoretično in praktično analizirali MRF določene dvorane namenjene glasbenih dogodkov. Pravokotna oblika male dvorane večkrat povzroča modalne frekvence in negativne akustične pojave, ki jih brez konkretnih akustičnih rešitev težko rešimo.

S pomočjo računalniških orodij in realnih meritev smo v konkretnem prostoru spoznali naslednje ugotovitve:

- 1) jakost MRF je v polni dvorani bistveno manjša kot v prazni dvorani;
- 2) izračunane modalne frekvence smo potrdili preko dovolj natančnih meritev v različnih predoločenih pozicijah, najprej v prazni dvorani in po tem v polni;
- 3) na splošno je skoraj pri vseh meritvah jakost modalnih frekvenc v prazni in polni dvorani velika, kar je bilo tudi pričakovano, zaradi popolnoma vzporednih vseh 6-ih površin;
- 4) različne pozicije v realnem prostoru prikazujejo različne rezultate glede na jakosti posameznih frekvenc in da vedno potrdijo izračunane resonančne frekvence;
- 5) jakost celotnega slišnega spektra je v polni dvorani manjša za približno 10dB in frekvenčni odzivi so v polni dvorani bolj linearni, kar je posledica absorpcije akustične energije s strani publike;
- 6) pri skoraj vseh grafih je prisotna resonančna frekvenca okoli 240-250Hz, tako da smo še enkrat izračunali modalne frekvence in s tem ugotovili, da sta prisotni dve 1. harmonski komponenti osnovnih modalnih frekvenc 119,22Hz in 122,62Hz, kateri močno vplivata na nelinearnost frekvenčnega odziva;
- 7) ker sta 1. harmonski komponenti zgornjih modalnih frekvenc dovolj blizu smo ugotovili, da se v grafu pojavita kot vrh z "odprtim faktorjem Q";
- 8) skoraj pri vseh meritvah v prazni in polni dvorani opazimo manjši vrh ali luknjo v frekvenčnem spektru od 700 do 900Hz;
- 9) skoraj pri vseh meritvah v prazni in polni dvorani opazimo luknjo pri frekvenci okoli 2kHz tudi do -15dB;
- 10) glede na rezultate akustičnih meritev bi verjetno visoke frekvence nad 800Hz lahko linearizirali s pomočjo izenačevalnika za dodatnih 8dB.

Na podlagi predstavljenih akustičnih osnov in dovolj natančnih akustičnih meritev smo ugotovili, da je

akovost akustike koncertnega prostora MKNŽ dovolj slaba in da je realizacija podanih rešitev nujno potrebna, a hkrati lahko trdimo, da je glede na veliko število koncertov v živo, ki smo jih obiskali v drugih prostorih, naša koncertna dvorana akustično in elektroakustično bolj primerna od nekaterih drugih slovenskih koncertnih prostorov.

S strani komentarjev med tonskimi tehniki, ki so v klubu delali, je prostor akustično stabilen in "nima prevelikih problemov", kar potrjuje, da se tonski tehniki ne zavedajo vseh možnosti izboljšanja akustičnega stanja koncertnih dvoran. Nastopajoči so nad zvokom glede na druge, podobne prostore navdušeni. Tudi tukaj z veliko verjetnostjo sklepamo, da glasbeniki niso preveč pozorni na to, kar predstavljajo poslušalcem.

Kot nadaljnje delo bomo projektirali izboljšave v MKNŽ.

Zahvala

Autor se zahvaljuje svojemu bivšemu študentu in danes dipl. ing. Multimedijskih Komunikacijah VSS g. Martinu Stadlerju za delo pri opravljanju meritev in elaboracija podatkov.

Literatura

- [1] A. Brancelj, M. Filak, Ž. Gorišek, *Sokolski dom v Ilirski Bistrici - Konservatorski načrt* <http://www.sneznik.net/wp-content/uploads/2012/06/SEMINARSKA-sokolski-dom-kon%C4%8Dna-verzija.pdf> 11. 9. 2014
- [2] M. R. Schröder, *New method of measuring Reverberation Time*, JASA, 37, pp 409-412, 1965
- [3] A. Žnidarčič, F. Policardi, *Eksperimentalno preverjanje akustike bivalnega prostora ERK 2013*
- [4] AcousticCalculator <http://www.mh-audio.nl/user/acoustic%20calculator.asp>
- [5] Merilni mikrofoni DBX model M2 RTA <http://www.diyaudio.com/forums/equipment-tools/257292-dbx-rta-m2-condenser-mic.html>, 15. 1. 2015
- [6] Room EQ Wizard V5.1 <http://www.roomeqwizard.com>, 10. 1. 2015
- [7] F. Policardi, MLS and "Sine-Sweep technique comparison in room-acoustic measurement", *Elektrotehniški Vestnik* vol. n.78, n.3, pp 91-95, Ljubljana, 2011 ISSN 2232-3228