

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Draško B. Mašović

**UNAPREĐENJE METODA ZA
PRORAČUN ZVUČNE IZOLACIJE U
ZGRADAMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Draško B. Mašović

**IMPROVEMENT OF METHODS FOR
CALCULATION OF SOUND INSULATION
IN BUILDINGS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE:

Mentor:

dr Dragana Šumarac Pavlović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu –
Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr Miomir Mijić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet
dr Ana Radivojević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Arhitektonski fakultet
dr Jelena Čertić, docent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

datum odbrane: _____

Zahvalnica

Hvala prof. Dragani Šumarac Pavlović i prof. Miomiru Mijiću na velikodušno omogućenoj prilici da se bavim istraživačkim radom u oblasti akustike. Bez njih ova teza ne bi bila ni završena ni započeta.

Hvala prof. Husniji Kurtoviću na čestim dragocnim savetima i diskusijama, kao i brojnim kolegama sa doktorskih i master studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, koji su značajno doprineli prikazanim analizama i rezultatima.

Posebno hvala porodici i prijateljima na svojoj podršci proteklih godina.

Naslov: Unapređenje metoda za proračun zvučne izolacije u zgradama

Rezime

Predmet istraživanja u ovom radu su metode proračuna zvučne izolacije prema klasičnom modelu prenosa zvuka u zgradama i izražavanje izolacije jednobrojnomo vrednošću. Cilj rada je ispitivanje mogućnosti unapređenja standardnih metoda kvantifikovanja i proračuna zvučne izolacije, radi postizanja veće tačnosti dobijenih brojnih vrednosti i njihove korelacije sa subjektivnim osećajem akustičkog komfora u zgradama. Postupci proračuna zvučne izolacije i njenog predstavljanja jednobrojnomo vrednostima koji se koriste u inženjerskoj praksi opisani su međunarodnim standardima i normama iz serija EN 12354, ISO 717, kao i predlogom novog standarda ISO 16717. Norma EN 12354 je prvi i jedini važeći međunarodni standard koji propisuje metode za proračun izolacije u zgradama, od vazdušnog i udarnog zvuka unutar zgrada i vazdušnog zvuka iz spoljašnje sredine. Metode su zasnovane na klasičnom teorijskom modelu prenosa zvuka u zgradama i u opštem slučaju daju vrednosti frekvencijski zavisnih deskriptora zvučne izolacije. Izražavanje izolacije jednobrojnomo vrednošću uvodi se radi pojednostavljenja ocene izolacionih svojstava pregrada i efikasnije standardizacije kriterijuma zvučne izolacije u zgradama. Procedure za izračunavanje jednobrojnih vrednosti definisane su u aktuelnom standardu ISO 717 i novom predlogu istog standarda ISO 16717 i zasnovane na primeni referentnih krivih izolacionih moći i spektara buke. Tako dobijena jednobrojna vrednost zvučne izolacije dodatno treba da bude korelisana sa subjektivnim doživljajem akustičkog komfora, a objektivni deskriptori zvučne izolacije što približniji njenoj subjektivnoj oceni.

U radu su najpre detaljno opisani relevantni algoritmi proračuna frekvencijski zavisnih, a zatim i širokopoljasnih, jednobrojnih vrednosti zvučne izolacije. Zbog brojnosti i složenosti modelovanih akustičkih fenomena vezanih za prostiranje zvuka u zgradama, postupak proračuna zvučne izolacije iziskuje kompleksne matematičke procedure i povezan je sa mnogim teškoćama, uključujući i ograničenu tačnost (do nekoliko decibela) u poređenju sa realnim, izmerenim vrednostima. Dominantni uzrok

smanjenja tačnosti je u ograničenoj dostupnosti tačnih vrednosti ulaznih parametara neophodnih za proračun. Stoga je u ovom radu analizirano nekoliko aspekata metodologije proračuna izolacije i mogućnosti za uvođenje izvesnih poboljšanja kojim bi se popravila objektivna tačnost, subjektivna relevantnost, kao i razumno pojednostavnjenje matematičkih procedura. Poseban akcent je na izolaciji od vazdušnog zvuka između susednih prostorija i homogenim i masivnim pregradama, koje su većinski zastupljene u zgradama u Republici Srbiji.

Prvi analizirani aspekt je izražavanje izolacije od vazdušnog zvuka jednobrojnim vrednostima korišćenjem referentnih spektara buke. Monitoringom buke generisane u zgradama i spoljašnje, saobraćajne buke i njihovom statističkom analizom utvrđena je veza između pojedinih vremenskih (impulsivnost) i spektralnih karakteristika buke i jednobrojnih vrednosti izolacije. Sa stanovišta spektra posebno je analiziran uticaj buke na niskim frekvencijama u sveukupnoj oceni izolacije, dat je osvrt na upotrebu referentnih spektara buke, a u slučaju unutrašnje buke u zgradama i njihovu korekciju u skladu sa najčešćim izvorima buke u domaćinstvima. Dodatno, izražavanje impulsivnosti buke u zgradama primenom standardnih i nestandardnih (*emergence*) deskriptora predloženo je radi potpunije karakterizacije ovog tipa buke. Kao rezultat toga, očekuje se poboljšana ocena izolacije jednobrojnim vrednostima, u smislu njihovog približavanja subjektivnom doživljaju akustičkog komfora uz uključivanje relevantnih vremenskih i spektralnih karakteristika najčešćih izvora buke.

Drugi analizirani aspekt je unapređenje metoda za proračun frekvencijski zavisnih deskriptora zvučne izolacije u zgradama. Najpre je dat osvrt na tehničke teškoće u sprovođenju standardnih procedura proračuna, moguće dileme pri njihovoj primeni u realnim okolnostima i usklađivanju sa nacionalnom regulativom u oblasti. To je demonstrirano kroz izradu softverske implementacije matematičkih algoritama. Zatim je brojnim numeričkim analizama različitih scenarija zvučne izolacije kvantifikovan uticaj pojedinih ulaznih parametara (osnovnih fizičkih parametara pregrada i njihovih izolacionih svojstava, kao i deskriptora spojeva među njima) na tačnost rezultata proračuna. To omogućava pažljiviji pristup izradi proračuna uz povećanu kontrolu i pouzdanost rezultata, ali i otvara mogućnosti za dalja pojednostavnjenja proračuna, usmeravanjem samo na najuticajnije parametre, uz očuvanje približno identičnih rezultata proračuna. Ovo je posebno važno imajući u vidu da i pored složenosti

algoritama za proračun, njihova tačnost u praksi je ograničena, sa procenjenom standardnom devijacijom odstupanja od stvarnih vrednosti oko 2 dB. Analizom rezultata proračuna za tipične scenarije zvučne izolacije u zgradama ustanovljeno je da nekoliko parametara, poput izolacionih moći pregrada i indeksa prenosa vibracija spojeva ima najznačajniji uticaj na proračunate vrednosti, dok je doprinos ostalih ulaznih parametara daleko manji.

Na kraju, izvršeno je i poređenje rezultata detaljnog proračuna frekvencijski zavisnih parametara zvučne izolacije i takođe standardizovanog pojednostavljenog modela, zasnovanog na jednobrojnim parametrima i svedenijim matematičkim algoritmima, na velikom uzorku realnih građevinskih konstrukcija. Utvrđeno je da u mnogim realnim postavkama proračuna mogu postojati značajna odstupanja između rezultata dva tipa proračuna i do nekoliko decibela. Stoga se predlaže dodatna korekcija rezultata pojednostavljenog proračuna, kako bi se rezultati približili rezultatima sveobuhvatnijeg i preciznijeg detaljnog modela. U skladu sa tim nalazima, razmotrena je i mogućnost daljeg pojednostavljenja proračuna izolacije u najčešćim, tipičnim postavkama, uz prihvatljivo smanjenje tačnosti u odnosu na kompletan detaljni model.

Ključne reči: građevinska akustika, proračun zvučne izolacije, zaštita od buke

Naučna oblast: elektrotehnika

Uža naučna oblast: akustika

UDK broj: 621.3

Title: Improvement of methods for calculation of sound insulation in buildings

Summary

The main object of this work are the methods for calculation of sound insulation based on the classical model of sound propagation in buildings and single-number rating of sound insulation. The aim of the work is inspection of the possibilities for improvement of standard methods for quantification and calculation of sound insulation, in order to achieve higher accuracy of the obtained numerical values and their correlation with subjective impression of the acoustic comfort in buildings. Procedures for calculation of sound insulation and its representation with single-number values, which are used in engineering practice, are described in the international standards and norms EN 12354, ISO 717, as well as the proposed ISO 16717. The norm EN 12354 is the first and the only existing international standard which describes methods for calculation of sound insulation – from airborne and structure born sound inside the buildings as well as airborne outdoor sound. The methods are based on the classical theoretical model of sound propagation in buildings and in general give values of frequency dependent descriptors of sound insulation. Rating sound insulation with single-number values has been introduced to simplify assessment of the insulation of building elements and make more efficient standardization of sound insulation criteria. Procedures for calculation of single-number values are defined in the current standard ISO 717 and the new standard proposal ISO 16717, and are based on the implementation of the reference curves of sound insulation and the reference noise spectra. The obtained single-number values of sound insulation are expected to correlate well with subjective impression of the acoustic comfort, making the objective sound insulation descriptors closer to the subjective criteria.

The first part of the work gives a detailed description of the relevant algorithms for calculation of frequency dependent, as well as wideband single-number values of sound insulation. Due to the large number and complexity of the modelled acoustic phenomena associated with the propagation of sound in buildings, calculation of sound

insulation assumes complex mathematical procedures, still being related to many difficulties, such as the limited accuracy (up to several decibels) compared to the real, measured values. The dominant cause of the lower accuracy is limited availability of accurate values of the input parameters, which are needed for the calculation. Therefore, this work analyses several aspects of the methodology and the possibilities for introducing certain improvements, in order to increase the objective accuracy, improve subjective relevancy, and introduce reasonable simplification of the mathematical procedures. Special emphasis is on insulation of airborne sound between adjacent rooms and homogeneous and heavyweight building elements, being the most frequent in buildings in the Republic of Serbia.

The first analysed aspect is rating airborne sound insulation with single-number values, using the reference noise spectra. By monitoring the noise generated inside buildings and outdoor traffic noise and using statistical analysis, the relation between certain temporal (impulsiveness) and spectral characteristics of noise and single-number values of sound insulation has been determined. Influence of noise at low frequencies in the overall rating of sound insulation is particularly analysed, use of the reference noise spectra is discussed, as well as their correction in the case of indoor noise in buildings and the most frequent sources of noise in dwellings. In addition to this, a quantification of impulsiveness of noise in buildings is suggested, using standard and non-standard (emergence) descriptors, for more comprehensive characterisation of this type of noise. As a result, improved assessment of sound insulation using single-number values is expected, which agrees better with subjective impression of acoustic comfort, due to the inclusion of relevant temporal and spectral characteristics of the typical noise sources.

The second analysed aspect is the improvement of the methods for calculation of frequency dependent descriptors of sound insulation in buildings. Firstly, the overview of the technical difficulties in the implementation of standard calculation procedures is given. The work considers potential uncertainties for the implementation of the procedures in real circumstances and harmonization with the national noise protection regulations. They are demonstrated through the development of software implementation of the mathematical algorithms. Secondly, the influence of certain input parameters (basic physical parameters of the building elements, descriptors of their insulation properties and the junctions between them) on the accuracy of the results is

quantified by extensive numerical analyses of different sound insulation scenarios. This allows more thorough approach to the calculation, with higher control and reliability of the results, but also opens the possibilities for further simplification of the algorithms, while keeping the satisfactory accuracy by putting in focus only the most influential parameters. This is especially important having in mind that in spite of the complexity of the algorithms, their accuracy in practice is rather limited, with assessed standard deviation from the real values around 2 dB. After the analysis of calculation results for typical sound insulation scenarios in buildings, it is concluded that several parameters, such as sound reduction index of the building elements and vibration reduction index of the junctions, have the greatest influence on the resulting values, while the contribution of other input parameters is much smaller.

Finally, the results of the detailed model for calculation of frequency dependent sound insulation descriptors and (also standardized) simplified model, which is based on single-number valued parameters and simplified mathematical algorithms, are compared over a large sample of real building elements. It is shown that with many realistic calculation setups, significant deviations between the results of the calculation using the two models may occur, up to several decibels. For that reason, additional correction of the results obtained using the simplified model is suggested, which should improve its agreement with the more comprehensive and accurate detailed model. Using these findings, the possibilities for further simplification of the calculations in typical scenarios are considered, with acceptable drop of accuracy, compared to the full detailed model.

Keywords: building acoustics, calculation of sound insulation, noise protection

Scientific area: electrical engineering

Scientific subarea: acoustics

UDC number: 621.3

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Problem buke u životnoj sredini, vrste i izvori buke	1
1.2. Pojam i značaj zvučne izolacije	3
2. Kvantifikovanje buke i zvučne izolacije	6
2.1. Deskriptori buke u životnoj sredini	6
2.2. Deskriptori zvučne izolacije	11
2.3. Izražavanje zvučne izolacije jednim brojem	14
2.3.1. Istorijski razvoj ideje o kvantifikovanju zvučne izolacije jednim brojem....	15
2.3.2. Kvantifikovanje pomoću referentne krive	16
2.3.3. Kvantifikovanje pomoću referentnih spektara i spektralna korekcija	19
2.4. Akustičke karakteristike vazdušne buke u životnoj sredini	27
2.4.1. Buka u domaćinstvima	28
2.4.2. Buka saobraćaja	31
3. Postupak proračuna zvučne izolacije	33
3.1. SEA model	36
3.2. Klasičan model (EN 12354)	38
3.2.1. Proračun izolacije od vazdušnog zvuka i zvuka udara između prostorija	39
3.2.2. Proračun izolacije od spoljašnjeg vazdušnog zvuka	47
3.2.3. Pojednostavljeni model	49
3.2.4. Tačnost proračuna	51
4. Monitoring vazdušne buke u domaćinstvima	54
4.1. Snimanje i merenje buke u domaćinstvima	54
4.2. Spektar buke u domaćinstvima	55
4.2.1. Analizirane aktivnosti i izvori buke	55
4.2.2. Rezultati	56
4.2.3. Diskusija	58
4.2.4. Zaključci	63
4.3. Analiza impulsnog karaktera buke u domaćinstvima	64
4.3.1. Analiza kućnih aktivnosti i dominantni izvori impulsne buke	65
4.3.2. Rezultati analize standardnih deskriptora buke	67

4.3.3. Analiza deskriptora impulsivnosti buke.....	69
4.3.4. Diskusija rezultata	79
4.3.5. Zaključak	80
5. Monitoring saobraćajne buke u urbanoj sredini	83
5.1. Analiza spektra saobraćajne buke u urbanoj sredini	83
5.1.1. Snimanje i merenje buke drumskog saobraćaja	84
5.1.2. Rezultati spektralne analize buke	85
5.1.3. Diskusija i zaključci	89
6. Realizacija softvera za proračun zvučne izolacije	92
6.1. Osnovni koraci pri realizaciji softvera za proračun zvučne izolacije	94
6.2. Prilagođenje softvera nacionalnoj regulativi i njegovoj primeni u projektovanju	98
6.3. Procedure primene softvera	100
7. Analiza uticaja pojedinih parametara na rezultate proračuna zvučne izolacije	103
7.1. Uticaj osnovnih fizičkih parametara pregrada	105
7.1.1. Analizirani parametri i postavke proračuna	105
7.1.2. Rezultati i diskusija	108
7.1.3. Zaključci	115
7.2. Uticaj izolacije bočnih pregrada	116
7.2.1. Analizirane pregrade i postavke proračuna	116
7.2.2. Rezultati i diskusija	116
7.2.3. Zaključci	121
7.3. Uticaj spojeva zajedničke pregrade sa bočnim pregradama	121
7.3.1. Analizirani tipovi spojeva i postavke proračuna	122
7.3.2. Rezultati	122
7.3.3. Diskusija i zaključci	124
8. Analiza razlika jednobrojnih vrednosti parametara proračunatih korišćenjem detaljnog i pojednostavljenog modela	126
8.1. Postavke proračuna	127
8.2. Rezultati	128
8.3. Diskusija	134
8.4. Zaključci	145

9. Predlog jednog aproksimativnog postupka proračuna zvučne izolacije	146
9.1. Aproksimativne formule	146
9.2. Diskusija	149
10. Zaključak	152
Literatura	157
PRILOG A	166
PRILOG B	171
Biografija autora	178
Izjava o autorstvu	179
Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	180
Izjava o korišćenju	181

1. Uvod

Zvučna izolacija u zgradama aktuelna je tema u današnjem životu čoveka. U nedostatku prirodnih, bioloških mehanizama za odbranu od neželjenih zvukova iz okruženja, čovek nužno mora pribegavati drugim sredstvima za njihovo smanjenje. U zgradama u kojima ljudi žive i rade, građevinski elementi koji ograničavaju prostorije imaju odlučujuću ulogu u sprečavanju neželjene zvučne energije da dopre do potencijalno ugroženih osoba kojima treba obezbediti akustički komfor. Zbog toga se pitanje zvučne izolacije nameće kao važno u projektovanju i izgradnji svih vrsta zgrada. S druge strane, dometi zvučne izolacije u smanjenju buke u zgradama uvek su ograničeni kako mogućim fizičkim svojstvima pregrada, tako i finansijskim sredstvima koje je racionalno uložiti u taj segment. Iz tog razloga pitanje buke u okruženju i njenog karaktera u velikoj meri određuje i način tretiranja i primene zvučne izolacije u praksi. U svim okolnostima, buka kao pojava i izolacija kao sredstvo moraju se posmatrati integralno, kao dva nerazdvojiva aspekta u ostvarivanju akustičkog komfora.

1.1. Problem buke u životnoj sredini, vrste i izvori buke

Buka se najčešće jednostavno definiše kao svaki neželjeni zvuk u okruženju [Harris, 1957; Kuttruff, 2007]. Već iz ove kratke definicije izvesne su dve važne osobine zvuka buke. Najpre, pitanje buke relevantno je u svim situacijama u kojima postoje ljudi, ili u ređim slučajevima osetljiva tehnička oprema, koji su njome potencijalno ugroženi. To su pre svega sve prostorije u kojima ljudi žive i rade, dakle stambene prostorije i radno okruženje, ali i spoljašnji prostori, poput ulica, trgova i zelenih površina, posebno u urbanim sredinama. Druga činjenica koja neposredno proizilazi iz definicije buke jeste da je to zvuk koji se želi potisnuti i na taj način smanjiti ugroženost ljudi izloženih njenom dejstvu. Ovo važi bez obzira da li se radi o objektivno visokim intenzitetima buke, koji direktno mogu uticati na fizičko zdravlje pojedinaca, ili o buci kao ometajućem faktoru po kvalitet života, tj. akustički komfor – stres, komunikaciju, produktivnost na radnom mestu i slično.

Opšte je poznato da izloženost prekomernoj buci može imati trajne posledice, pre svega po čovekovo čulo sluha. To je najčešće slučaj pri radu na specifičnim radnim

mestima, u blizini izvora buke visokog intenziteta, kao što su gradilišta, mašinska postrojenja, pa čak i tokom muzičkih izvođenja. Međutim, iako uobičajeno nižeg nivoa i manje očiglednih efekata po zdravlje stanovništva, podjednako važna zbog svoje široke rasprostranjenosti je komunalna buka, kojoj su veliki delovi stanovništva izloženi svakodnevno tokom redovnih životnih aktivnosti. Iako ne izaziva posledice trenutno, permanentna buka u životnoj sredini iznad određenog subjektivnog praga, zbog dugotrajne i stalne izloženosti može izazvati trajne posledice i ozbiljno uticati na kvalitet života. Svetska zdravstvena organizacija navodi mnoge posledice izloženosti buci u životnoj sredini, među njima i poremećaje pažnje i sna, kardiovaskularne i psihofiziološke smetnje, stres i promene u ponašanju [WHO, 2014]. Iz tog razloga ista organizacija preporučuje da, na primer, tokom sna nivo buke u okruženju bude do 30 dB(A), a u školskim učionicama do 35 dB(A) [WHO, 2014].

Tema ovog rada je zvučna izolacija u zgradama, pa su od interesa svi izvori buke koji mogu biti uzrok ugroženosti bukom ljudi koji u njima borave: u spoljašnjoj sredini, poput saobraćajne buke, i unutar zgrada, označeni kao „buka iz susedstva“. Prema načinu generisanja spoljašnja i unutrašnja buka mogu biti vazдушna i strukturna. Tabela 1.1 navodi neke važnije izvore vazdušne i strukturne buke u zgradama i spoljašnjoj sredini. Koji od njih će biti dominantan zavisi od različitih okolnosti, kao na primer urbanizovanosti i naseljenosti lokacije, blizine saobraćajnih čvorišta, većih saobraćajnica, pruga, aerodroma ili industrijskih postrojenja i slično, ali i intenziteta buke generisane u susednim domaćinstvima i zgradama.

Tabela 1.1. Važniji izvori buke u životnoj sredini

	vazдушna buka	strukturna buka
spoljašnja buka	drumski saobraćaj, vazdušni saobraćaj, železnički saobraćaj, industrijska buka	šinski saobraćaj, industrijska buka
unutrašnja buka	glasani govor i vika, muzika, uređaji u domaćinstvu, kućni ljubimci	koraci, pomeranje nameštaja, lupa vratima, mašinska postrojenja, liftovi

Iako se u gusto naseljenim gradskim sredinama saobraćaj javlja kao stalni izvor komunalne buke, sve evidentniji postaje udeo buke koju generišu ljudi u boravišnim

prostorimama (domaćinstvima, kancelarijama i drugim prostorijama za boravak) [Langdon et al., 1977]. Posebno značajno je pitanje akustičkog komfora noću i uticaj buke na kvalitet sna. Rezultati istraživanja komunalne buke u tri evropske zemlje – Nemačkoj, Engleskoj i Holandiji [Van den Berg, 2004] pokazuju da najveći procenat stanovništva koji smatra da je ozbiljno ugrožen bukom navodi drumski saobraćaj kao glavni uzrok buke, zatim buku suseda, vazdušnog saobraćaja, a na kraju železničkog saobraćaja i industrijsku buku. Prema Svetskoj zdravstvenoj organizaciji, buka saobraćaja ima štetne posledice na skoro trećinu stanovništva Evrope, a oko jedna petina je izložena nivou buke tokom noći koji može izazvati ozbiljne posledice po zdravlje [WHO, 2014]. Poremećaji sna usled buke navode se kao posebno uticajni na akustički komfor u zgradama i opšti osećaj stresa u urbanim sredinama [Guski, 1977]. Sa druge strane, takođe se procenjuje da preko 50 miliona Evropljana trpi niži kvalitet života usled buke iz susedstva [Rasmussen et al., 2013].

Sve navedeno uticalo je da problem komunalne buke zauzme važno mesto u akustici. Zaštita od buke, kao jedna podoblast akustike, bavi se metodama za ostvarivanje prihvatljive buke, pre svega po nivou, ali i drugih njenih karakteristika koje utiču na subjektivnu ugroženost bukom kao što su spektralni sadržaj, impulsivnost i slično. Zaštita se postiže raznim merama i intervencijama na tri osnovna elementa tog procesa: na samom izvoru buke, na potencijalnim prijemnicima, i na putanji koju zvuk prelazi prostirući se od izvora do prijemnika. U Tabeli 1.2 data je podela najčešćih mogućih intervencija prema [Harris, 1957]. Koja se od navedenih tehnika može efikasno upotrebiti zavisi od konkretnih specifičnih okolnosti. Osnovni mehanizam zvučne zaštite u zgradama jesu izolaciona dejstva pregrada (zidova, podova i tavanica) na putu između izvora buke unutar zgrade ili u spoljašnjoj sredini i potencijalnog prijemnika, odnosno ugroženih ljudi u zgradama.

1.2. Pojam i značaj zvučne izolacije

Zavisno od sredine u kojoj je generisan, zvuk može biti vazdušni i strukturni (u čvrstim materijalima). U skladu sa tim, postoje dve vrste zvuka (buke) od kojih se čovek štiti zvučnom izolacijom – vazdušni zvuk i zvuk udara (generiše se strukturno), pa se sa aspekta izvora buke razlikuju izolacija od vazdušnog zvuka i izolacija od zvuka udara.

Iako udarni zvuk može biti i spoljašnji, na primer usled šinskog saobraćaja, predmet zvučne izolacije u zgradama su samo unutrašnji izvori udarne buke poput mašina ili ljudskih koraka koji se strukturno generišu, najčešće u podovima prostorija. Izolacija od vazdušnog zvuka obuhvata kako unutrašnje izvore buke (buku u domaćinstvima i ostalim boravišnim prostorijama), tako i spoljašnje (saobraćajnu i industrijsku buku). U prvom slučaju govori se o izolaciji unutrašnjih elemenata u zgradama, a u drugom o izolaciji fasadnih konstrukcija.

Tabela 1.2. Najčešće intervencije u cilju zaštite od buke (prema [Harris, 1957])

predmet intervencije	Intervencija
izvor buke	smanjenje akustičke snage, prigušenje vibracija, promena režima rada
putanja prenosa	promena pozicija izvora i/ili prijemnika, postavljanje pregrada, zvučnih barijera i oklopa, povećanje apsorpcije u prostoriji
prijemnik	korišćenje zaštitne opreme, smanjenje vremenskog intervala izloženosti buci, edukacija stanovništva o buci i njenim efektima

Poput načina generisanja zvuka, i njegov prenos može biti vazdušni i strukturni. Vazdušni prenos obuhvata sve putanje zvuka koje se formiraju:

- kroz razne otvore na građevinskim elementima (na primer ventilacione otvore ili unutrašnje sisteme za ventilaciju),
- kroz bočne prostore (na primer kroz susedni hodnik ili vazdušni prostor između spušenog plafona i međuspratne konstrukcije).

Strukturni prenos podrazumeva prenos kroz čvrstu strukturu pregrada i svih elemenata koje one obuhvataju – vrata, prozori, spojevi i slično. S obzirom na način generisanja i prostiranja buke, za zvučnu izolaciju u zgradama relevantna su sledeća četiri akustička procesa:

- vazdušni prenos vazdušnog zvuka,
- strukturni prenos vazdušnog zvuka,
- vazdušni prenos udarnog zvuka i
- strukturni prenos udarnog zvuka.

Povećana potreba za akustičkim komforom u prostorijama za život i rad i značaj pitanja zvučne izolacije, posebno u urbanim sredinama, učinili su da se poslednjih decenija

pojavi veliki broj međunarodnih i nacionalnih standarda i drugih regulativa i iz oblasti zvučne izolacije u zgradama. Veza između buke, zvučne izolacije i akustičkog komfora definisana je ISO standardom [ISO 6242-3, 1992]. Regulativa kojom se propisuju minimalni zahtevi za zvučnu izolaciju u domaćinstvima danas postoji na nacionalnom nivou u preko 30 evropskih zemalja [Rasmussen et al., 2013]. Prvi takvi kriterijumi pojavili su se 50-ih godina XX veka. U proteklih dvadesetak godina u nekoliko zemalja usvojene su i prve klasifikacije domaćinstava prema stanju zvučne izolacije. Poslednjih godina uloženi su dodatni napor da se ostvari usaglašavanje kriterijuma zvučne izolacije u evropskim zemljama [COST Action TU0901, 2014]. Sve to govori da postoji stalni proces tehničkog uređivanja i usavršavanja stručne oblasti zvučne izolacije u zgradama, što je tema i ovoga rada.

2. Kvantifikovanje buke i zvučne izolacije

Iako i buka u životnoj sredini i zvučna izolacija kao mehanizam odbrane od nje imaju ishodište u subjektivnom osećaju akustičkog komfora ljudi, praktične okolnosti postavljaju potrebu da se i buka i izolacija na neki način kvantifikuju objektivnim, fizičkim parametrima. Postupak za objektivno predstavljanje subjektivnog osećaja kao što je akustički komfor podrazumeva izvesnu immanentnu nesigurnost u validnost objektivnih numeričkih parametara. Zbog toga je inženjerska praksa uvela jedan skup deskriptora, uvek sa ciljem da se dobije pouzdana korelacija između vrednosti objektivnih parametara i subjektivnog doživljaja komfora. U nastavku će biti opisani najčešće korišćeni deskriptori buke u životnoj sredini i zvučne izolacije u zgradama.

2.1. Deskriptori buke u životnoj sredini

Tema zvučne izolacije neodvojivo je povezana sa temom buke u životnoj sredini. Kvantifikovanje zvučne izolacije u svojoj suštini se zasniva na kvantifikovanju slabljenja buke na putu od njenog izvora do mesta prijema, to jest potencijalno ugroženih ljudi. Prema tome, i za analizu zvučne izolacije neophodno je raspolagati deskriptorima buke, kao i metodama njihovog merenja. Standardizovani deskriptori i metode definisani su u standardu ISO 1996 [ISO 1996].

Kvantifikovanje buke u životnoj sredini u opštem slučaju je složeno iz više razloga. Najpre, različiti izvori buke u različitim okolnostima generisaće akustički signal različitog karaktera (neki važniji izvori dati su u Tabeli 1.1). Ta raznovrsnost je izvor složenost pri pokušaju definisanja jedinstvenog kvantifikatora koji bi se mogao efikasno primeniti u svakom konkretnom slučaju. S druge strane, zvučna izolacija po pravilu ima ishodište u subjektivnom akustičkom komforu ljudi čije se stanje samo približno može kvantifikovati objektivnim parametrima. Otuda su za efikasno kvantifikovanje buke u životnoj sredini, primenjivo u inženjerskoj praksi, neophodna neka uopštavanja i pojednostavljenja.

Parametar koji stoji u osnovi svih najčešće korišćenih deskriptora buke jeste nivo zvučnog pritiska L , izražen u decibelima. Nivo zvuka je vremenski i frekvencijski zavisna veličina, pa se za izražavanje buke koristi vremenski i frekvencijski ponderisana

veličina koja se naziva ekvivalentni nivo zvučnog pritiska L_{eq} . Vremenska ponderacija podrazumeva merenje ekvivalentnog nivoa u određenim vremenskim intervalima, to jest vremenskim „prozorima“. Najčešće je to 1 s (ponderacija označena kao „*slow*“) ili 125 ms („*fast*“). Za detekciju vršnih vrednosti buke izrazito impulsnog karaktera mogu se koristiti i kraći vremenski intervali, do čak trajanja pojedinačnog odmerka signala. Da bi se fluktuacije nivoa buke tokom dužeg vremenskog perioda usrednjile, za određivanje ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska koriste se i daleko duži vremenski intervali: od 15 minuta do delova dana (jutro, dan, noć i slično), celog dnevnog ciklusa od 24 h, pa čak i čitave godine.

Frekvencijska ponderacija nivoa buke vrši se zbog prilagođavanja dobijenih vrednosti ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska subjektivnom utisku jačine zvuka. To se realizuje uvođenjem filtracije signala kojom se simulira frekvencijska zavisnost osetljivosti ljudskog čula sluha na zvučnu pobudu. Najšire korišćena je A-ponderacija koja načelno podražava frekvencijski zavisnu krivu subjektivne percepcije zvuka glasnoće 40 fona. U slučajevima buke visokih intenziteta koristi se C-ponderacija kao bolji reprezent subjektivnog doživljaja takvog zvuka. Da bi se naznačilo koja je frekvencijska ponderacija korišćena pri određivanju ekvivalentnog nivoa buke jedinici decibel se dodaje odgovarajuće slovo – dBA ili dBC.

Drugi nivo obeležavanja je u samoj oznaci nivoa, gde se u indeksu odgovarajućim slovom zajedno definišu vrste primenjenih ponderacija. Na primer, vremenska ponderacija *fast* se označava slovom *F*, za *slow* se koristi *S* i slično. Tako se formiraju oznake kao što je L_{AS} , koja označava da je korišćena A frekvencijska i *slow* vremenska ponderacija.

Pored opisanih ponderacija standardom su definisane i dodatne korekcije utvrđenog nivoa buke da bi se dobijena numerička vrednost prilagodila subjektivnoj percepciji i karakteru signala. Tako se prema ISO 1996 dvadesetčetvoročasovni ekvivalentni nivo zvučnog pritiska definiše kao:

$$L_{den} = 10 \log_{10} \left[\frac{d}{24} 10^{(L_d + K_d)/10} + \frac{e}{24} 10^{(L_e + K_e)/10} + \frac{n}{24} 10^{(L_n + K_n)/10} \right], \quad (J2.1)$$

gde su d , e i n vremenska trajanja dana, večeri i noći u časovima, respektivno ($d+e+n = 24$), a L_d , L_e i L_n ekvivalentni nivoi izmereni tokom dana, večeri i noći, respektivno. K_d , K_e i K_n su korekcionni faktori za dan, veče i noć, respektivno, i oni se uvode radi

usaglašavanja vrednosti nivoa buke sa osetljivošću ljudi na buku tokom različitih delova dana. Prema evropskoj direktivi 2002/49/EC za ocenu buke u životnoj sredini [Directive 2002/49/EC, 2002] i Aneksu A standarda ISO 1996-1:2003 [ISO 1996]: $K_d = 0$ dB, $K_e = 5$ dB i $K_n = 10$ dB, što proizilazi iz činjenice da postoji veća osetljivost stanovništva na buku tokom večeri i noći u odnosu na period dana. Ovako definisana vrednost L_{den} korelisana je sa procentom stanovništva za koji se očekuje da će biti posebno ugrožen bukom kojoj je izložen [Schultz, 1978].

Izmereni nivoi buke mogu se korigovati u zavisnosti od dominantnih izvora buke da bi se u obzir uzeo različit karakter zvuka koju oni generišu i specifičnosti uticaja koji imaju na njihov subjektivni doživljaj. Postojeći međunarodni standardi iz domena komunalne buke, kao i nacionalne regulative uglavnom razmatraju kvantifikovanje spoljašnje buke, pre svega industrijske i buke saobraćaja. Tako standard ISO 1996-1:2003 propisuje vrednosti korekcionih faktora koje se dodaju izmerenim vrednostima ekvivalentnih nivoa zvučnog pritiska prema Tabeli 2.1. Različiti tipovi buke koriguju se prema stepenu ugroženosti koju izazivaju u odnosu na buku drumskog saobraćaja, za koju je korekcija 0 dB. Vazdušni saobraćaj tako izaziva približno jednaku uznemirenost bukom kao drumski saobraćaj čiji je ekvivalentni nivo za 3 do 6 dB viši [Kryter, 1982; Vos, 1992]. Slično tome, buka impulsnog karaktera ima približno jednak efekat kao kontinualna buka drumskog saobraćaja čiji je ekvivalentni nivo za 5-10 dB viši [Vos, 1992; Vos, 2001]. Izrazito impulsna buka može poticati od različitih izvora zvučnih impulsa visokog intenziteta, kao što su vatreno oružje, čekići industrijskih presa, pneumatski čekići i slično. Nasuprot tome, regularna impulsna buka obuhvata ubobičajenije izvore zvučnih impulsa nižeg intenziteta, kao na primer lupa vratima od kola, crkvena zvona i slično. Pa ipak, potrebno je naglasiti da još uvek ne postoji opšte usvojen način za kvantifikovanje impulsivnosti buke niti objektivno merilo kojem od navedena tri tipa impulsni izvori pripadaju. Konačno, ponuđena je korekcija nivoa buke u slučaju takozvane tonalne buke, što podrazumeva da u zvuku postoje jasne tonske, uskopojasne komponente. To je slučaj sa muzikom ili zvukom koji generišu rotirajući delovi mašina.

Za kvantifikovanje buke unutar zgrada da bi se odredio kvalitet akustičkog komfora takođe se upotrebljavaju deskriptori zasnovani na nivou zvučnog pritiska. Kada na zgradu deluje spoljašnja buka uticaj zvučne energije reflektovane o površinu

same fasade zgrade minimizira se merenjem na određenoj udaljenosti od površine fasade, po pravilu na 2 m. U prostorijama unutar zgrade ne može se izbeći uticaj akustičkih karakteristika prostorija na nivo zvuka u njima. Ovo važi bez obzira da li se izvor nalazi u samoj prostoriji ili izvan nje. Kompenzacija ovog uticaja se postiže normalizacijom nivoa buke prema ukupnoj apsorpciji u prostoriji:

$$L_n = L + \frac{A}{A_0} \text{ dB}, \quad (\text{J2.2a})$$

ili vremenu reverberacije u njoj:

$$L_{nT} = L - \frac{T}{T_0} \text{ dB}. \quad (\text{J2.2b})$$

A u ovom slučaju predstavlja ukupnu apsorpciju unutar prostorije, a T vreme reverberacije. A_0 i T_0 predstavljaju referentne vrednosti ova dva parametra usvojene kao tipične za nameštene stambene prostorije. Usvojene su vrednosti $A_0 = 10 \text{ m}^2$ i $T_0 = 0,5 \text{ s}$. Za razliku od spoljašnje buke, još uvek ne postoje opšte usvojene procedure za korekciju vrednosti nivoa zvučnog pritiska u zavisnosti od karaktera buke generisane od različitih izvora buke u domaćinstvima.

Tabela 2.1. Vrednosti korekcionih faktora u zavisnosti od tipa buke prema ISO 1996-1:2003

	tip buke	K [dB]
dominantni izvor buke	drumski saobraćaj	0
	vazdušni saobraćaj	3 do 6
	železnički saobraćaj	-6 do -3
	industrijska buka	0
karakter buke	regularna impulsna buka	5
	izrazito impulsna buka	12
	tonalna buka	3 do 6

Buka u životnoj sredini u opštem slučaju ima manje ili više izražene varijacije nivoa u vremenu. Zbog toga su pored standardno korišćenih dugovremenskih ekvivalentnih nivoa zvučnog pritiska (L_{eq}) uvedeni i dodatni deskriptori, takođe zasnovani na vremenski i frekvencijski ponderisanom nivou zvučnog pritiska [ISO 1996]. To su:

- maksimalan nivo zvučnog pritiska (L_{max}),
- minimalan nivo zvučnog pritiska (L_{min}),

- standardna devijacija nivoa tokom dužeg vremenskog intervala (σ),
- kvantili, odnosno nivoi zvuka premašeni u $N\%$ vremena (L_N), gde je N obično 5, 10, 50, 90 ili 95,
- kombinacije prethodnih parametara, na primer razlike $L_{10} - L_{90}$., $L_5 - L_{eq}$ i slično.

Specifičnu grupu parametara čine *emergence* deskriptori. Oni su korišćeni, pre svega, za karakterizaciju buke saobraćaja [Can et al., 2008]. Njihova uloga je da kvantifikuju pojavu (eng. *emergence*) ekscenih bučnih događaja koji nivoom dovoljno premašuju dugovremenski ekvivalentni nivo. Ukupnim trajanjem bučnog događaja smatra se vremenski interval tokom kojeg kratkovremenski nivo zvučnog pritiska u svakom trenutku premašuje određeni usvojeni prag L_α . U *emergence* deskriptore spadaju:

- broj bučnih događaja *NNE* (od eng. *number of noisy events*),
- indeks maskiranja *MI* (od eng. *mask index*) predstavlja ukupno trajanje svih bučnih događaja,
- srednje trajanje bučnih događaja t_{avg} i
- ekvivalentni nivo bučnih događaja $L_{eq,NE}$.

Iz gornjih definicija sledi i da su prva tri parametra međusobno povezana relacijom:

$$t_{avg} = \frac{MI}{NNE}. \quad (J2.3)$$

Indeks maskiranja, osim u vremenskim jedinicama, može se izraziti i kao procenat od ukupnog trajanja signala buke. Prag L_α u odnosu na koji se određuju *emergence* deskriptori može biti neka usvojena konstantna vrednost ili vrednost definisana relativno u odnosu na dugovremenski ekvivalentni nivo. Za buku saobraćaja koriste se konstantne vrednosti praga. najčešće 75 dB ili 80 dB. Relativni prag može biti, na primer, $L_{eq} + 10$ dB ili $L_{eq} + 15$ dB. Kada se koristi relativni prag, u vrednostima *emergence* deskriptora gubi se podatak o apsolutnim nivoima bučnih događaja, pa oni samo odlikavaju impulsni karakter bučnih događaja.

2.2. Deskriptori zvučne izolacije

Standardi iz oblasti građevinske akustike definišu deskriptore zvučne izolacije u zgradama i pojedinačnih građevinskih elemenata, kao i procedure za njihovo merenje [ISO 140, ISO 10140]. Procedure su definisane za laboratorijska i za terenska merenja. U Tabeli 2.2. navedeni su standardni deskriptori zvučne izolacije u zgradama i građevinskih elemenata: pregrada (zidovi, tavanice), dodatnih elemenata (zidne i podne obloge, spuštene plafoni, plivajući podovi), prozora i vrata i malih elemenata (ventilacioni otvori i slično). Kako izolacija u opštem slučaju zavisi od frekvencije, njene vrednosti se po pravilu izražavaju u oktavnim ili, najčešće, tercnim frekvencijskim podopsezima. Tradicionalno, zvučna izolacija meri se u frekvencijskim podopsezima 1/3 oktave od 100 Hz do 3150 Hz ili oktavnim frekvencijskim podopsezima od 125 Hz do 2000 Hz. Ovaj frekvencijski opseg (100 Hz do 3150 Hz) naziva se i osnovni opseg. Nasuprot tome, prošireni opseg podrazumeva frekvencijske podopsege 1/3 oktave od 50 Hz do 5000 Hz ili oktavne frekvencijske podopsege od 63 Hz do 4000 Hz. Pojedinačne vrednosti deskriptora se po pravilu zaokružuju na jednu decimalu.

Tabela 2.2. Standardni deskriptori zvučne izolacije

	Oznaka	Naziv deskriptora
izolacija građevinskih elemenata	R	izolaciona moć
	D	zvučna izolovanost
	L	nivo zvuka udara
	ΔR	doprinos obloge povećanju izolacione moći
	ΔL	doprinos obloge smanjenju nivoa zvuka udara
izolacija u zgradama	R'	građevinska izolaciona moć
	D	zvučna izolovanost
	L'	nivo zvuka udara

Svi deskriptori izolacije od vazdušnog zvuka građevinskih elemenata bazirani su na razlici nivoa zvuka sa predajne (ka izvoru) i prijemne (ka prijemu) strane pregrade:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S_s}{A} \text{ dB}, \quad (\text{J2.4})$$

$$\Delta R = R_{with} - R_{without}, \quad (\text{J2.5})$$

$$D = L_1 - L_2 \text{ i} \quad (\text{J2.6})$$

gde su L_1 i L_2 nivoi zvuka sa predajne i prijemne strane, respektivno, S_s je površina pregrade, a A apsorpcija u prijemnoj prostoriji. U slučaju deskriptora za izolaciju fasada izvor se nalazi u spoljašnjoj sredini. Nivo L_1 se meri na rastojanju od 2 m od fasade i obeležava sa $L_{1,2m}$. Razlika između izolacione moći (R) i izolovanosti (D) pregrade je korekcionni izraz sa desne strane jednačine (J2.4) $10\log_{10}(S_s/A)$, čija je uloga da eliminiše uticaj akustičkih karakteristika prijemne prostorije na vrednost pokazatelja zvučne izolacije. Apsorpcija prijemne prostorije A dobija se posredno preko vrednosti vremena reverberacije T koja se može meriti. Standard predviđa da se izračunavanje vrši pomoću Sabinovog obrasca:

$$A = 0,16 \frac{V}{T} [\text{m}^2], \quad (\text{J2.7})$$

U gornjem izrazu V je zapremina prostorije.

Građevinska vrednost izolacione moći (R') definisana je na identičan način kao izolaciona moć pregrade, sa tom razlikom što podrazumeva realne okolnosti prenosa zvuka, osim direktnim putem kroz pregradu koja neposredno razdvaja prostorije, i ostalim bočnim putevima. Uticaj bočnih puteva potencijalno povećava vrednost nivoa zvuka u prijemnoj prostoriji L_2 . Suština laboratorijskih merenja izolacione moći pregrade R je u tome da je onemogućaven prolazak zvuka bočnim putevima van same ispitivane pregrade. Konačno, vrednost ΔR obloge definisana je kao razlika izolacionih moći osnovne pregrade sa (R_{with}), i bez obloge ($R_{without}$).

Za razliku od vazdušnog zvuka, u slučaju zvuka udara materijal pregradne konstrukcije pobuđen je direktno. Time je dostupan merenju samo nivo zvuka u prijemnoj prostoriji. Zato se kao deskriptor izolacije od zvuka udara uzima nivo zvuka udara u prijemnoj prostoriji L , pri čemu se u postupku merenja koristi standardizovani izvor zvuka udara, što znači poznata, unapred definisana mehanička pobuda.

Nivo zvuka u prijemnoj prostoriji se uobičajeno normalizuje na način definisan jednačinama (J2.2a) i (J2.2b). Time se kompenzuje uticaj akustičkih karakteristika same prostorije na vrednost nivoa. U skladu s tim, zvučna izolovanost D i nivo zvuka udara L mogu se normalizovati prema vrednosti vremena reverberacije ili apsorpcije u prijemnoj prostoriji. U prvom slučaju govori se o standardizovanim, a u drugom o normalizovanim vrednostima deskriptora. Oznakama parametara dodaju se indeksi nT ,

odnosno n , respektivno. Tako se standardizovane vrednosti označavaju sa L_{nT} , D_{nT} , a normalizovane vrednosti L_n , D_n . Standardizovane vrednosti deskriptora se izračunavaju dodavanjem faktora kojim se uračunava kompenzacija na osnovu vremena reverberacije. Tako se standardizovana vrednost zvučne izolovanosti dobija dodavanjem faktora:

$$+10 \log_{10} \frac{T}{T_0} \text{ dB} \quad (\text{J2.8a})$$

a standardizovana vrednost nivoa zvuka udara sa:

$$-10 \log_{10} \frac{T}{T_0} \text{ dB} \quad (\text{J2.8b})$$

gde T označava vreme reverberacije u prijemnoj prostoriji, a T_0 referentno vreme reverberacije čija je usvojena vrednost 0,5 s. Normalizovane vrednosti deskriptora se izračunavaju dodavanjem faktora kojim se uračunava kompenzacija na osnovu apsorpcije u prostoriji. Normalizovana vrednost zvučne izolovanosti se dobija dodavanjem vrednosti:

$$-10 \log_{10} \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (\text{J2.9a})$$

a normalizovana vrednost nivoa zvuka udara sa:

$$+10 \log_{10} \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (\text{J2.9b})$$

gde A označava apsorpciju u prijemnoj prostoriji, a A_0 referentnu apsorpciju čija je usvojena vrednost 10 m^2 . Suprotan predznak u faktorima za zvučnu izolovanost i nivo zvuka udara posledica je negativnog predznaka nivoa L_2 u definiciji izolovanosti prema jednačini (J2.6). Normalizacija vrednosti izolacione moći apsorpcijom u prijemnoj prostoriji izvršena je već prema definiciji parametra, jednačini (J2.4).

U praksi se za nivo zvuka udara najčešće koristi normalizacija prema ukupnoj apsorpciji u prijemnoj prostoriji L_n . Slično kao za izolacionu moć pregrada, laboratorijskoj vrednosti L_n pridružuje se i građevinska vrednost L'_n koja obuhvata realne okolnosti prenosa zvuka udara bočnim putanjama. Doprinos dodatnih podnih obloga (plivajućih podova, podnih prostirki i slično) ili spuštenih plafona smanjenju nivoa zvuka udara (ΔL) definiše se kao razlika normalizovanog nivoa zvuka udara bez i sa dodatnim elementom na pobuđenoj tavanici:

$$\Delta L = L_{n,without} - L_{n,with}. \quad (J2.10)$$

Na kraju, treba napomenuti da se pored laboratorijskih i građevinskih vrednosti deskriptora izolacije u nekim okolnostima koriste i njihove terenske (*in situ*) vrednosti i obeležavaju indeksom *situ* (na primer R_{situ}). One se mogu tumačiti kao građevinske vrednosti iz kojih su uklonjeni doprinosi svih putanja prenosa zvuka osim kroz samu pregradu, odnosno kao „laboratorijske“ vrednosti izolacije u realnim zgradama i neidealim uslovima kada je pregrada okružena drugim pregradama ograničenih izolacionih moći ka kojima se ostvaruje prenos zvučne energije. Ove veličine relevantne su upravo stoga što na ispoljena izolaciona svojstva pregrada utiču i njima susedne pregrade s kojima se dodiruju (nezavisno od bočnog prenosa i zračenja susednih pregrada). Ono što čini razliku u odnosu na laboratorijsku vrednost je gubitak energije vibracija u materijalu pregrade na svim spojevima. *In situ* vrednosti je u realnim okolnostima teško meriti zbog istovremeno prisutnog zračenja bočnih pregrada u prijemnoj prostoriji, pa ove veličine imaju prevashodno teorijski značaj u proračunima zvučne izolacije.

2.3. Izražavanje zvučne izolacije jednim brojem

Izolaciona moć pregrada predstavlja se vrednostima po opsezima, 1/3 oktave, što znači dijagramom ili tabelom. Radi jednostavnijeg definisanja i lakše upotrebe kriterijuma za minimalno dozvoljene vrednosti zvučne izolacije, standardom su definisane jednobrojne (merodavne) vrednosti svih deskriptora. U njihovom označavanju se parametrima iz Tabele 2.2 u indeksu dodaje oznaka w (od eng. *weighted*). Tako se dobijaju oznake X_w , gde je X neki od deskriptora zvučne izolacije. Minimalni kriterijumi zvučne izolacije u zgradama izraženi jednobrojnim vrednostima, kao i kriterijumi klasifikacije zgrada prema ostvarenoj zvučnoj izolaciji, po pravilu su definisani nacionalnim regulativama [Rasmussen et al., 2010; Rasmussen, 2010]. Primer takvog standarda u Republici Srbiji je SRPS U.J6.201:1990 [SRPS U.J6.201, 1990], koji propisuje minimalne vrednosti izolacije od vazdušnog i udarnog zvuka u zgradama namenjenim boravku ljudi.

2.3.1. Istorijski razvoj ideje o kvantifikovanju zvučne izolacije jednim brojem

Međunarodni standardi u kojima se opisuju metode za kvantifikovanje zvučne izolacije jednobrojnim, merodavnim vrednostima postoje još od 60-ih godina XX veka [Rasmussen et al., 2010]. Oni su nastali iz potrebe da se po svojoj prirodi frekvencijski zavisne izmerene vrednosti izolacije na jednostavan način međusobno porede, a takođe i da se porede sa utvrđenim kriterijumima koji moraju biti ispunjeni u zgradama. Prvi takav standard objavljen je pod oznakom ISO/R 717:1968 i bio je većinom zasnovan na istraživanjima komunalne buke i zvučne izolacije rađenim u Nemačkoj [Rasmussen, 2010]. Standard je predviđao da se jednobrojne vrednosti izračunavaju preko empirijski ustanovljenih referentnih krivih izolacije definisanih u frekvencijskim podopsezima. Procedura se zasnivala na vertikalnom pomeranju referentne krive po nivoima tako da se u dovoljnoj meri ostvari njeno slaganje sa izmerenom krivom deskriptora. Očitavanjem jedne od vrednosti pomerene referentne krive dobijana je jednobrojna vrednost parametra. Ovaj postupak je detaljnije opisan u sledećem poglavlju ovog rada.

Pored opisanog postupka ocene zvučne izolacije jednobrojom vrednošću pomoću referentne krive, u Francuskoj je razvijan pristup baziran na činjenici da izolacija od vazdušnog zvuka u osnovi predstavlja razliku nivoa buke na predajnoj i prijemnoj strani. Zbog toga, posledično, subjektivna ugroženost bukom zavisi ne samo od izolacionih svojstava građevinskih elemenata, već i od spektralnog sadržaja samog signala buke. Raznolikost potencijalnih izvora u životnoj sredini uslovlila je da su definisana dva referentna spektra vazdušne buke:

- spektar A-ponderisanog roze šuma, namenjen za ocenu stanja izolacije od unutrašnje buke i
- spektar A-ponderisane buke saobraćaja, namenjen za ocenu stanja izolacije od spoljašnje buke.

Oba pristupa, nemački i francuski, ugrađena su paralelno u kasnije standarde [ISO 717-1, 1996], kao i trenutno važeći ISO 717 [ISO 717]. U predlogu novog standarda pod oznakom ISO 16717 [ISO 16717] koji je u procesu razmatranja referentne krive su izostavljene, i predlaže se određivanje zvučne izolacije jednim brojem isključivo primenom referentnih spektara.

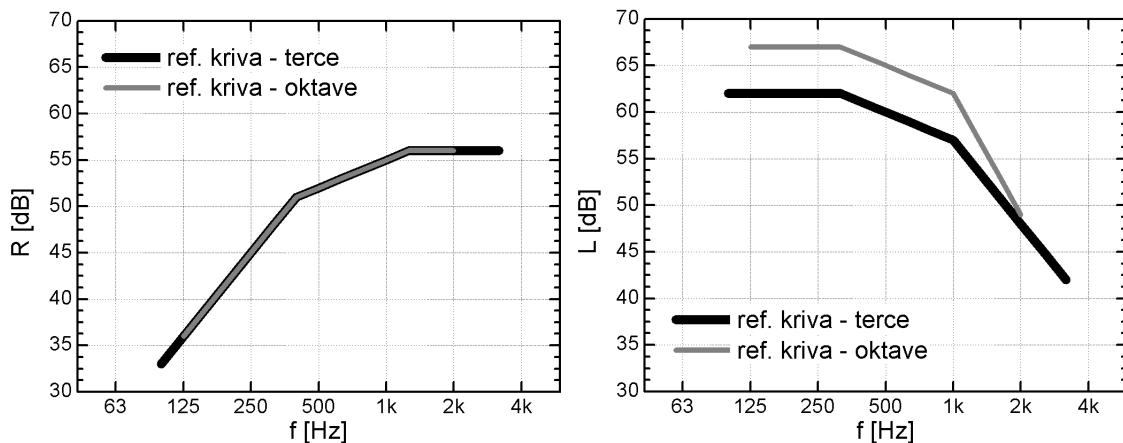
Bez obzira koji se od dva pristupa koristi za ocenu zvučne izolacije jednim brojem, činjenica je da to predstavlja pojednostavljenje sa gubitkom podataka o frekvencijski zavisnoj veličini. Ta činjenica može značajno uticati na relevantnost jednobrojne vrednosti u prisustvu izvora buke različitih spektralnih karakteristika. Kao direktna posledica toga, građevinski elementi sa jednakom merodavnom vrednošću izolacije mogu u realnosti obezbeđivati različit nivo akustičkog komfora u zavisnosti od njihovih izolacionih karakteristika po frekvencijama i spektralnih karakteristika signala buke [Rychtáriková et al., 2012]. Ukoliko realna buka ima zvučnu energiju dominantno koncentrisanu u delu frekvencijskog opsega u kom karakteristika izolacije ima izražen pad, ukupna prenetna energija biće veća nego u slučaju kada maksimum nivoa buke koincidira sa maksimumom izolacije. Ovakvi podaci o frekvencijski zavisnim veličinama gube se pri proračunu jednobrojnih, merodavnih parametara.

2.3.2. Kvantifikovanje pomoću referentne krive

Još uvek važeći standard ISO 717 [ISO 717] definiše procedure za proračun jednobrojnih, merodavnih vrednosti zvučne izolacije na osnovu prethodno izmerenih (ili proračunatih) vrednosti u oktavnim ili tercnim frekvencijskim podopsezima. Standard ima iz dva dela, od kojih je prvi namenjen izolaciji od vazdušnog zvuka, a drugi izolaciji od zvuka udara. Iako standard definiše i dodatne procedure za izračunavanje spektralnih korekcionih faktora u osnovnom i proširenom frekvencijskom opsegu, u njegovoj osnovi je izračunavanje merodavnih vrednosti poređenjem sa predefinisanim referentnim krivama u osnovnom opsegu.

ISO 717 definiše u osnovnom frekvencijskom opsegu po jednu referentnu krivu za izolaciju od vazdušnog zvuka i izolaciju od zvuka udara (tercni podopsezi 100-3150 Hz, odnosno oktavni podopsezi 125-2000 Hz). Referentne krive u oktavnim ili tercnim podopsezima koriste se u zavisnosti od frekvencijskih podopsega u kojima su date ulazne vrednosti izolacije. Ove referentne krive prikazane su na Slici 2.1, a njihove numeričke vrednosti date su u Tabeli 2.3. U slučaju vazdušnog zvuka, vrednosti krivih u tercnim i oktavnim podopsezima se preklapaju, dok je za udarni zvuk kriva po oktavama izdignuta za 5 dB u odnosu na krivu po tercima, zbog energetske sume nivoa zvuka udara u tri terce po svakoj oktavi. Izuzetak predstavlja oktava 2kHz, gde je nivo

svoga 1 dB iznad odgovarajuće terčne vrednosti. Time je uneta korekcija umesto vrednosti u najvišoj terci (3150Hz), koja nije pokrivena najvišom oktavom, a u praksi može značajnije uticati na ukupnu izolaciju masivnih tavanica.



Slika 2.1. Referentne krive za proračun merodavnih vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka (levo) i zvuka udara (desno) prema ISO 717

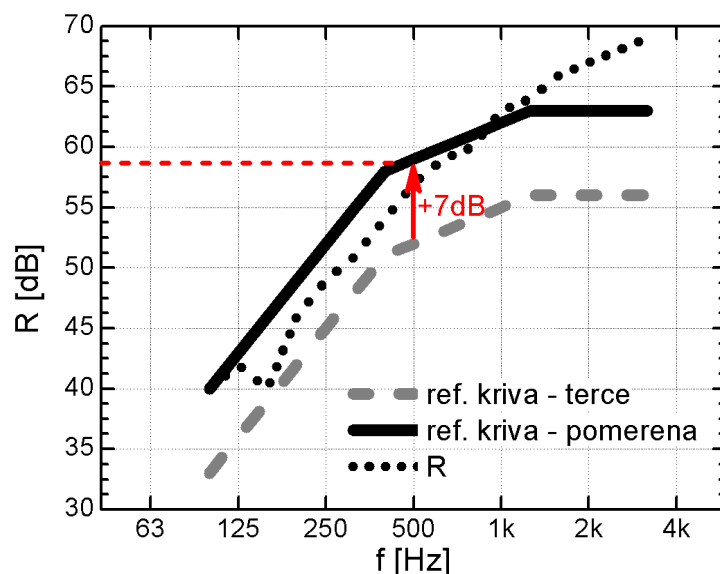
Tabela 2.3. Vrednosti referentnih krivih za vazdušni zvuk i zvuk udara prema ISO 717

f [Hz]	vazdušni zvuk		zvuk udara	
	terce	oktave	terce	oktave
100	33	36	62	67
125	36		62	
160	39		62	
200	42	45	62	67
250	45		62	
315	48		62	
400	51	52	61	65
500	52		60	
630	53		59	
800	54	55	58	62
1k	55		57	
1,25k	56		54	
1,6k	56	56	51	49
2k	56		48	
2,5k	56		45	
3,15k	56		42	

Jednobrajna merodavna vrednost dobija se poređenjem vrednosti parametra zvučne izolacije u oktavama ili tercama sa odgovarajućom referentnom krivom.

Poređenje se vrši pomeranjem referentne krive po vertikalnoj osi prema krivoj zvučne izolacije u koracima od po 1 dB, sve dok suma nepovoljnih odstupanja krive izolacije u odnosu na referentnu ne postane maksimalna moguća, ali manja od 32 dB ukoliko se izračunavanje vrši po tercama, odnosno 10 dB ukoliko se vrši po oktavama. Pod nepovoljnim odstupanjem u nekom frekvencijskim podopsegu smatra se odstupanje pri kome je vrednost zvučne izolacije manja (u slučaju vazdušnog zvuka), odnosno veća (u slučaju zvuka udara) od vrednosti referentne krive. Merodavna vrednost očitava se tako na pomerenj referentnoj krivoj na frekvenciji 500 Hz. U slučaju zvuka udara i oktavnih podopsega, dobijena jednobrojna vrednost se umanjuje za 5 dB, koliko je i oktavna referentna kriva pomerenjena u odnosu na krivu po tercama. Iz ovoga takođe sledi da su sve merodavne vrednosti celobrojne, iako ulazne veličine imaju vrednosti u frekvencijskim podopsezima zaokružene na jednu decimalu.

Jedan primer izračunavanja merodavne vrednosti izolacione moći R_w pregrade na osnovu vrednosti izolacione moći R zadate u tercnim podopsezima ilustrovan je na Slici 2.2. Referentna kriva je pomerenjena vertikalno do mesta na kome suma negativnih odstupanja (to su sve vrednosti na krivoj R koje su ispod pomerenjene referentne krive) maksimalno velika, ali manja od 32 dB. U prikazano slučaju pomeranj je za 7 dB naviše. Tada se sa referentne krive očitava vrednost na 500 Hz, što je u ovom slučaju 59 dB, i to je dobijena vrednost merodavne izolacione moći R_w .



Slika 2.2. Primer računanja merodavne vrednosti izolacione moći korišćenjem referentne krive ($R_w = 59$ dB)

2.3.3. Kvantifikovanje pomoću referentnih spektara i spektralna korekcija

Pored izračunavanja merodavnih vrednosti poređenjem sa referentnim krivama, standard ISO 717 propisuje i mogućnost takozvane spektralne korekcije dobijenih jednobrojnih vrednosti, a to je njihovo prilagođenje različitim potencijalnim spektrima buke od kojih se štiti izolacijom. Spektralna korekcija je postupak u kome se određenim algoritmom dobija vrednost korekcionog faktora. Ona se dodaje jednobrojnoj vrednosti da bi se bolje predstavio nivo izolacije u slučaju konkretne vrste buke. Uz oznaku korekcionog faktora uobičajeno se u indeksu naznačava za koju vrstu buke se odnosi.

Tako se u standardu ISO 717, pored referentnih krivih za vazdušni zvuk, definišu dva referentna spektra, označeni kao Spektar br. 1 i Spektar br. 2. Oni reprezentuju uobičajene spektre buke u životnoj sredini. Prema napomenama datim u standardu referentni Spektar br. 1 predstavlja spektar buke generisane tokom normalnih životnih aktivnosti (govor, muzika, radio, TV i igra dece), kao i drumskog i železničkog saobraćaja visokih brzina i bliskog preleta aviona. Drugi spektar predstavlja spektar saobraćajne buke nižeg intenziteta, udaljenih preleta aviona i disko muzike. Zbog toga se za spektre 1 i 2 koriste oznake L_{living} i $L_{traffic}$, respektivno.

Kao i referentne krive, referentni spektri definisani su posebno u oktavnim i tercnim frekvencijskim podopsezima, s tim što su spektri definisani i za prošireni frekvencijski opseg, od 50 Hz do 5000 Hz. Podrazumeva se da parametar zvučne izolacije za koji se računa vrednost korekcionog faktora mora imati poznate vrednosti u istim frekvencijskim podopsezima kao i referentni spektar koji se koristi. Vrednosti referentnih spektara u tercnim podopsezima i proširenom frekvencijskom opsegu date su u nastavku poglavlja u Tabeli 2.4. Prvi spektar (Spektar br. 1, odnosno L_{living}) ima oblik A-ponderisanog roze šuma i reprezentuje unutrašnju buku u zgradama. Spektar br. 2 ($L_{traffic}$) ima oblik A-ponderisane buke saobraćaja.

Korekcionni faktori dobijeni korišćenjem referentnih spektara 1 i 2, označeni sa C i C_{tr} , prema sledećoj formuli:

$$C_{(tr)} = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^k 10^{(L_i - X_i)/10} - X_w, \quad (J2.11)$$

gde je L vrednost referentnog spektra, X parametar zvučne izolacije, X_w njegova merodavna vrednost, i redni broj frekvencijskog podopsega, a k ukupan broj podopsega.

Indeks tr koristi se za korekcionni faktor dobijen korišćenjem referentnog Spektra br. 2. Korekcionni faktori mogu se računati u osnovnom ili proširenom frekvencijskom opsegu (u tercama: 100-3150 Hz, 50-3150 Hz, 100-5000 Hz i 50-5000 Hz ili u oktavama: 125-2000 Hz, 63-2000 Hz, 125-4000 Hz i 63-4000 Hz). Ukoliko se koristi opseg širi od osnovnog, to se naznačava u indeksu, na primer $C_{tr,50-3150}$ i slično.

Korekcionni faktori treba da utiču na merodavnu vrednost dobijenu primenom referentne krive samo svojim oblikom, a ne i ukupnom energijom. Zbog toga su svi referentni spektri normalizovani tako da im je ukupna energija približno jednaka 0 dB. Preciznije, ukupna energija Spektra br. 1 definisanog u tercnim podopsezima od 50 Hz do 5000 Hz iznosi -0,0114 dB, a Spektra br. 2 0,2267 dB. Kao i merodavne vrednosti deskriptora izolacije, korekcionni faktori se zaokružuju na najbližu celobrojnu vrednost.

Korišćenje korekcionnih faktora u osnovnom ili proširenom frekvencijskom opsegu za sada je prema zakonskoj regulativi iz oblasti zvučne izolacije obavezno samo u nekoliko evropskih zemalja. U šest zemalja faktor C koristi se za ocenu zvučne izolacije unutar zgrada, a u još nekoliko za klasifikaciju zgrada prema zvučnoj izolaciji [Rasmussen et al., 2010]. U skorije vreme naročito je postalo aktuelno pitanje harmonizacije deskriptora zvučne izolacije u evropskim zemljama. Razlog za to je što je zvučnu izolaciju moguće kvantifikovati korišćenjem velikog broja kombinacija deskriptora izolacije i korekcionnih faktora. Za vazdušni zvuk, na primer, to su: R'_w , $R'_w + C$, $R'_w + C_{50-3150}$, $D_{nT,w}$, $D_{nT,w} + C$, $D_{nT,w} + C_{100-5000}$, $D_{nT,w} + C_{tr}$, $D_{n,w}$ itd. Na nivou Evrope još uvek ne postoji jedinstven stav o najrelevantnijim deskriptorima [Rasmussen, 2010], mada su krupni koraci u harmonizaciji postignuti međunarodnim projektom sa tim ciljem [COST Action TU0901, 2014]. Neki autori predlažu da harmonizovani deskriptori zvučne izolacije unutar zgrada uključuju korekcionni faktor C i to $D_{nT,w} + C$ [Neubauer, 2005] ili $D_{nT,w} + C_{50-3150}$ [Rasmussen et al., 2010].

Prošireni frekvencijski opseg u ovom trenutku ima obaveznu primenu samo u Švedskoj, dok se u još nekoliko evropskih zemalja koristi opciono za definisanje visoke klase domaćinstava [Rasmussen, 2010]. Da bi se izbeglo manje pouzdano merenje zvučne izolacije na niskim frekvencijama (ispod 100 Hz) ali ipak uključio doprinos zvučne energije buke unutar zgrada u ovom delu frekvencijskog opsega, korekcionni faktor C_{tr} koristi se u Engleskoj i Velsu za definisanje minimalnih kriterijuma izolacije kako fasadnih tako i unutrašnjih pregrada. Ipak, i ovakav pristup je kritikovan u

literaturi, kako zbog neadekvatnog tretmana frekvencija ispod 100 Hz [Rasmussen et al., 2010], tako i za davanje prevelikog značaja izolaciji u ovom delu frekvencijskog opsega u odnosu na srednje frekvencije koje su važnije za subjektivni doživljaj akustičkog komfora [Smith et al., 2003; Rychtáriková et al., 2012].

Pitanje značaja vrednosti zvučne izolacije i referentnih spektara na najnižim frekvencijama postaje posebno važno imajući u vidu da se lake gipsane pregrade u principu odlikuju bržim padom izolacionih performansi ka niskim frekvencijama u poređenju sa masivnim pregradama slične jednobrojne vrednosti izolacije. Istovremeno, lake konstrukcije postaju sve zastupljenije u savremenoj gradnji u Evropi. Naročito osetljive na proširenje frekvencijskog opsega mogu biti merodavne vrednosti izolacije fasadnih pregrada, kako zbog činjenice da energija spoljašnje buke ima izraženije niskofrekvencijske komponente [Mašović et al., 2013 l], tako i zbog drugih, neakustičkih karakteristika fasadnih konstrukcija koje mogu značajno uticati na njihova izolaciona svojstva na niskim frekvencijama, kao što su konfiguracija fasade (ravna ili ugaona) i udeo prozora i balkonskih vrata u ukupnoj površini fasade [Mašović et al., 2013 k].

Radi bolje korelisanosti sa subjektivnim doživljajem izolacije od zvuka udara u slučaju tavanica bez dodatnih elemenata poput plivajućih podova, standard ISO 717-2 definiše poseban spektralni korekcionni faktor koji se označava sa C_I . Njegova vrednost je određena izrazom:

$$C_I = X_{sum} - 15\text{dB} - X_w, \quad (\text{J2.12})$$

gde je X parametar izolacije od zvuka udara (L_n , L'_n ili L'_{nT}), a X_w njegova merodavna vrednost izračunata pomoću referentne krive. X_{sum} iz gornjeg izraza definisano je formulom:

$$X_{sum} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^k 10^{X_i/10}, \quad (\text{J2.13})$$

gde je i indeks frekvencijskog podopsega, a k ukupan broj podopsega. Vrednost X_{sum} zaokružuje se na najbliži ceo broj. Korekcionni faktor C_I se zatim dodaje merodavnoj vrednosti deskriptora izolacije od zvuka udara izračunatog korišćenjem referentne krive. U izračunavanju ovog korekcionnog faktora posmatrani frekvencijski opseg može biti od 100 Hz do 2500 Hz (terce), od 125 Hz do 2000 Hz (oktave) ili proširen prema niskim frekvencijama, kada obuhvata i opseg oktave 63 Hz.

Izračunate vrednosti spektralnih korekcionih faktora deskriptora izolacije od vazdušnog i zvuka udara imaju za cilj da povećaju korelisanost dobijenih merodavnih vrednosti izolacije sa njenom subjektivnom ocenom. Ta ocena, osim od izolacionih karakteristika pregrada, zavisi i od spektralnog sadržaja generisane buke od koje se štiti. Zbog toga postoji predlog novog standarda pod oznakom ISO 16717 [ISO 16717], koji bi trebao da zameni aktuelni standard ISO 717. U njemu je potpuno napušten koncept ocene zvučne izolacije korišćenjem referentnih krivih u korist referentnih spektara. Prema tom predlogu, jednobrojna vrednost izolacije od vazdušnog zvuka računa se kao razlika ukupnog nivoa referentnog spektra buke pre i nakon prolaska kroz pregradu, to jest nakon umanjenja za vrednosti zvučne izolacije u tercnim podopsezima proširenog opsega od 50 Hz do 5000 Hz. Takav proračun se realizuje prema formuli:

$$X = 10 \log_{10} \frac{\sum_i 10^{L_i/10}}{\sum_i 10^{(L_i - X_i)/10}}, \quad (\text{J2.14})$$

gde je X jednobrojna vrednost deskriptora zvučne izolacije, L_i je nivo buke u tercnom podopsegu i , X_i je vrednost deskriptora zvučne izolacije u istom podopsegu, a i je redni broj podopsega. Za izračunavanje jednobrojne vrednosti doprinosa obloge izolaciji od vazdušnog zvuka, uvodi se pojam referentne pregrade sa unapred definisanim vrednostima izolacione moći. Formula (J2.14) tada ima prilagođeni oblik:

$$\Delta R = 10 \log_{10} \frac{\sum_i 10^{(L_i - R_{i,ref,without})/10}}{\sum_i 10^{(L_i - R_{i,ref,with})/10}}, \quad (\text{J2.15})$$

gde su $R_{i,ref,with}$ i $R_{i,ref,without}$ vrednosti izolacione moći referentne pregrade sa i bez obloge, respektivno. Predlog standarda predviđa da se sve jednobrojne veličine zaokružuju na najbližu celobrojnu vrednost, ali se za povećanu preciznost i izražavanje nesigurnosti ostavlja mogućnost zaokružavanja na prvu decimalu.

Predlog standarda ISO 16717 definiše tri referentna spektra i tri referentne pregrade za izražavanje izolacije od vazdušnog zvuka. Definisani referentni spektri su:

- $L_{living,i}$, koji odgovara spektru buke generisane tokom normalnih životnih aktivnosti,
- $L_{traffic,i}$, spektar saobraćajne buke i
- $L_{speech,i}$, spektar govora.

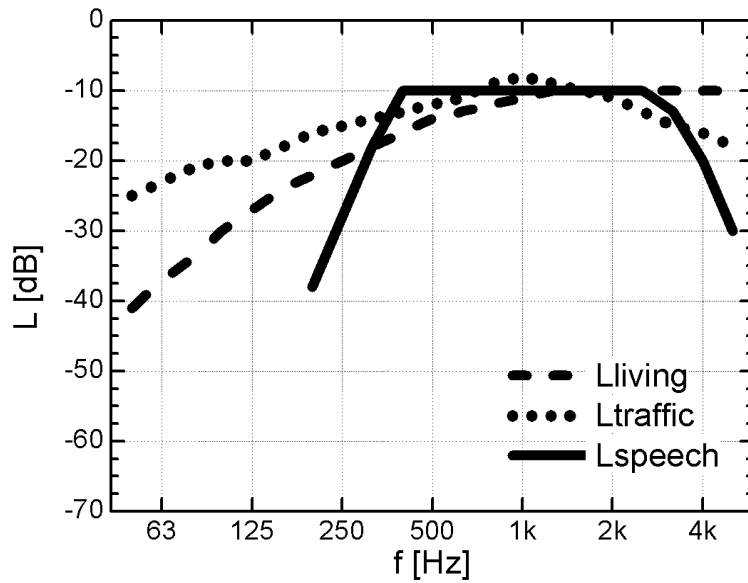
U opštem slučaju, L_{living} se koristi za kvantifikovanje izolacije unutrašnjih građevinskih elemenata odnosno izolacije između prostorija, $L_{traffic}$ za izolaciju fasada a L_{speech} za ocenu privatnosti unutar zgrada, na primer u poslovnim prostorijama. Spektri L_{living} i $L_{traffic}$ imaju jednake vrednosti kao Spektar br. 1 i Spektar br. 2 u proširenom opsegu datim u standardu ISO 717-1, respektivno. Stoga će u nastavku izlaganja biti korišćene obe vrste naziva za ova dva referentna spektra. Treći spektar označen kao L_{speech} uveden je prema istraživanjima subjektivne percepcije govora prenetog između prostorija koje je publikova H.K.Park [Park et al., 2009].

U Tabeli 2.4 prikazane su vrednosti referentnih spektara (L) i izolacionih moći referentnih pregrada (R) u tercnim frekvencijskim podopsezima. Svi spektri su A-filtrirani da bi izračunata jednobrojna vrednost zvučne izolacije bila korelisana sa subjektivnom percepcijom energije buke, odnosno govora, i normalizovani tako da im je ukupan nivo energije približno jednak 0 dB (L_{living} -0,0114 dB, $L_{traffic}$ 0,2267 dB i L_{speech} -0,0935 dB). Na Slikama 2.3 i 2.4 nalazi se grafički prikaz spektara i izolaciona moć referentnih pregrada.

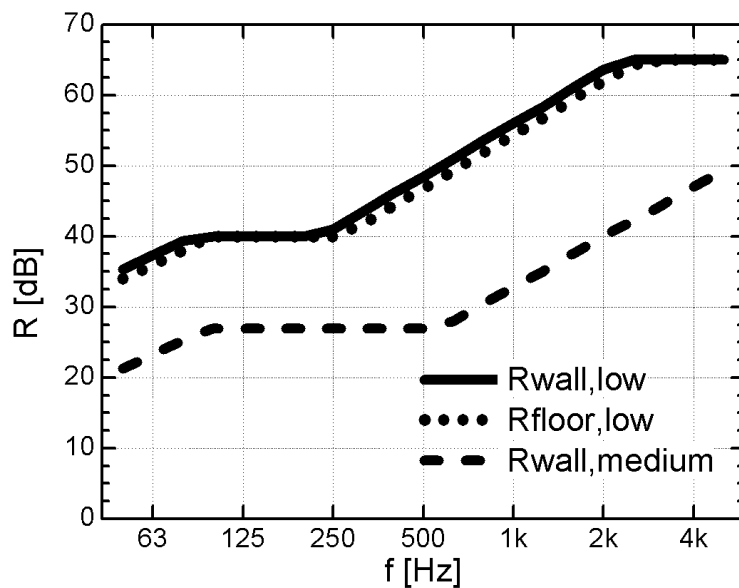
Tabela 2.4. Vrednosti nivoa referentnih spektara (L) i izolacije referentnih pregrada (R) po tercama prema predlogu standarda ISO 16717

i	f [Hz]	L_{living} [dB]	$L_{traffic}$ [dB]	L_{speech} [dB]	L_{impact} [dB]	$R_{wall,low}$ [dB]	$R_{floor,low}$ [dB]	$R_{wall,medium}$ [dB]	R_{heavy} [dB]	R_{timb12} [dB]	R_{timb3} [dB]
1	50	-41	-25	-	-23,8	35,3	34	21,3	29,6	17,1	?)
2	63	-37	-23	-	-22,8	37,3	36	23,3	30,2	18,2	?)
3	80	-34	-21	-	-21,8	39,4	38,1	25,3	30,7	19,2	?)
4	100	-30	-20	-	-20,8	40	40	27	31,2	20,2	29,2
5	125	-27	-20	-	-19,8	40	40	27	31,6	21,1	27,1
6	160	-24	-18	-	-18,8	40	40	27	32,2	22,2	25,2
7	200	-22	-16	-38	-17,8	40	40	27	32,7	23,2	23,2
8	250	-20	-15	-28	-16,8	41	40	27	33,1	24,1	24,1
9	315	-18	-14	-18	-15,8	43,5	41,8	27	33,6	25,1	25,1
10	400	-16	-13	-10	-14,8	46,1	44,4	27	34,2	28,2	26,2
11	500	-14	-12	-10	-13,8	48,5	46,8	27	34,6	31,1	27,1
12	630	-13	-11	-10	-12,8	51	49,3	28	35,2	34,2	28,2
13	800	-12	-9	-10	-11,8	53,6	51,9	30,5	35,7	38,2	31,2
14	1k	-11	-8	-10	-10,8	56	54,4	32,8	36,2	42,2	34,2
15	1,25k	-10	-9	-10	-9,8	58,4	56,8	35,1	37,1	46,1	37,1
16	1,6k	-10	-10	-10	-8,8	61,1	59,5	37,6	38,2	50,2	41,2
17	2k	-10	-11	-10	-7,8	63,6	61,9	40	39,2	54,2	45,2
18	2,5k	-10	-13	-10	-6,8	65	64,3	42,3	40,1	58,1	49,1
19	3,15k	-10	-15	-13	-	65	65	44,6	-	-	-
20	4k	-10	-16	-20	-	65	65	47,1	-	-	-
21	5k	-10	-18	-30	-	65	65	49,4	-	-	-

*) nije definisano predlogom standarda



Slika 2.3. Referentni spektri prema predlogu standarda ISO 16717-1



Slika 2.4. Izolacione moći referentnih pregrada prema predlogu standarda ISO 16717-1

Predlog novog standarda podrazumeva da se umesto oznake w u indeksu jednobrojnog deskriptora zvučne izolacije koristi oznaka korišćenog referentnog spektra (*living*, *traffic* ili *speech*). Tako na primer, jednobrojna vrednost izolacione moći građevinske pregrade izračunata korišćenjem referentnog spektra L_{living} ima oznaku R_{living} . Iz jednakosti referentnih spektara L_{living} i Spektar br. 1 i L_{traffic} i Spektar br. 2 u proširenom frekvencijskom opsegu takođe sledi jednakost odgovarajućih jednobrojnih

vrednosti parametara sa uračunatim spektralnim korekcionim faktorima: X_{living} i $X + C_{50-5000}$ i $X_{traffic}$ i $X + C_{tr,50-5000}$, gde je X opšta oznaka za deskriptor izolacije od vazdušnog zvuka.

Kako doprinos obloge povećanju izolacione moći (ΔR) osim od same obloge zavisi i od izolacionih svojstava osnovne pregrade, definisana su tri tipa referentnih pregrada. To su zid sa niskom frekvencijom koincidencije ($R_{wall,low}$), pod sa niskom frekvencijom koincidencije ($R_{floor,low}$) i zid sa srednje visokom frekvencijom koincidencije ($R_{wall,medium}$). Odgovarajuća vrednost ΔR primenjuje se u zavisnosti od tipa osnovne pregrade u realnom slučaju, birajući tako da ona bude najsličnija referentnoj pregradi.

Za izražavanje izolacije od zvuka udara, predlog standarda ISO 16717 uvodi potpuno nov pristup. Umesto najčešće korišćenog deskriptora, normalizovanog nivoa zvuka udara, predlaže se uvođenje koncepta izolacione moći zvuka udara. Kao razlog za uvođenje novog koncepta, navodi se usklađivanje sa izolacijom od vazdušnog zvuka. Time se postiže da, za razliku od nivoa zvuka udara, manje vrednosti izolacione moći zvuka udara znače i lošiju izolaciju, kao što je to slučaj sa deskriptorima izolacije od vazdušnog zvuka (R, D). Štaviše, oznake deskriptora postaju identične, sa pridodatim indeksom *impact* – $R_{impact}, D_{impact}, \Delta R_{impact}$ i slično.

Formula za izražavanje izolacije od zvuka udara jednim brojem je:

$$X_{impact} = 10 \log_{10} \frac{\sum_i 10^{L_i/10}}{\sum_i 10^{(L_i - X_i)/10}}, \quad (J2.16)$$

a za doprinos podne obloge:

$$\Delta R_{impact} = 10 \log_{10} \frac{\sum_i 10^{(L_i - R_{i,ref,without})/10}}{\sum_i 10^{(L_i - R_{i,ref,with})/10}}, \quad (J2.17)$$

i identične su formulama (J2.14) i (J2.15), sa jedinom razlikom što su pridodati indeksi *impact* i definisane posebne vrednosti referentnog spektra (L_{impact}) i izolacionih karakteristika referentnih tavanica, date u Tabeli 2.4. X_i sada predstavlja izolacionu moć (R) ili izolovanost (D) zvuka udara u ternom podopsegu i . L_i su vrednosti referentnog spektra zvuka udara standardizovanog izvora zvuka udara (tapkalice), prema ISO 140-6:1998 [ISO 140]. U formuli za doprinos dodatnog elementa važi relacija: $R_{i,ref,with} =$

$R_{i,ref,without} + \Delta R_i$, gde su $R_{i,ref,with}$ i $R_{i,ref,without}$ izolacione moći od zvuka udara referentne tavanice sa i bez dodatnog elementa, respektivno, a ΔR_i doprinos obloge smanjenju nivoa zvuka udara.

Kao i u slučaju doprinosa obloge izolaciji od vazdušnog zvuka, vrsta referentne tavanice bira se u skladu sa karakteristikama stvarne tavanice, a na raspolaganju su tri tipa golih referentnih tavanica, ovde obeleženih sa R_{heavy} , R_{timb12} i R_{timb3} . Prva se odnosi na masivne, a druge dve na drvene tavanice. Njihove vrednosti su takođe prikazane u tabeli. Radi kompatibilnosti, date su i formule za proračun novih deskriptora pomoću još uvek važećih deskriptora zasnovanih na nivou zvuka udara (L):

$$R_i = D_{n,i} = 78,2\text{dB} + 10\log_{10}\left(\frac{f_i}{1\text{Hz}}\right)\text{dB} - L_{n,i}, \quad (\text{J2.18})$$

$$D_{nT,i} = 78,2\text{dB} + 10\log_{10}\left(\frac{f_i}{1\text{Hz}}\right)\text{dB} - L_{nT,i}, \quad (\text{J2.19})$$

a za doprinos obloge smanjenju zvuka udara važi $\Delta R_i = \Delta L_i$.

Napuštanje koncepta referentne krive znači da propisani referentni spektri dobijaju presudni uticaj na jednobrojne vrednosti izolacije. Tako na primer, prema jednačini (J2.14), jednobrojna vrednost zvučne izolacije od vazdušnog zvuka direktno zavisi od oblika A-ponderisanog referentnog spektra buke, to jest od razlike spektra i vrednosti deskriptora zvučne izolacije u svakom od frekvencijskih podopsega. Količnik u jednačini predstavlja zapravo A-ponderisani odnos ukupne energije vazdušne buke pre i nakon slabljenja zvučnom izolacijom, a jednobrojna vrednost izolacije (X) je onda subjektivno doživljeno slabljenje ukupnog nivoa buke čiji A-ponderisani spektar ima oblik identičan obliku korišćenog referentnog spektra. Dobijena merodavna jednobrojna vrednost važi za slučaj buke referentnog spektra, ali ne i za buku drugačijeg spektralnog sadržaja. Iz toga sledi da relevantnost izračunate jednobrojne vrednosti zvučne izolacije direktno zavisi od sličnosti između oblika referentnog spektra i realne buke. Zbog toga je za validno predstavljanje zvučne izolacije jednim brojem neophodno poznavanje i određenih akustičkih karakteristika realne buke od koje se štiti izolacijom.

2.4. Akustičke karakteristike vazdušne buke u životnoj sredini

Jednobrejne merodavne vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka zavise od karaktera buke od koje zvučna izolacija štiti ljude koji borave u zgradama. Najjednostavniji primer za to su niže minimalno dozvoljene merodavne vrednosti zvučne izolacije fasadnih zidova u tišim delovima grada zonama u odnosu na bučne centralne zone [TSG-1-005:2012, 2012; SRPS U.J6.201:1990, 1990]. Minimalne vrednosti izolovanosti fasadnih zidova definišu se najčešće tako da se obezbedi dovoljno nizak A-ponderisani nivo spoljašnje buke prenete u boravišne prostorije [Rasmussen, 2006], na primer 30-35 dB(A), čime se ostvaruje zadovoljavajući akustički komfor. Pod pretpostavkom da je ukupan nivo buke van prostorije poznat, minimalni kriterijumi zvučne izolacije definišu se na osnovu razlike ove dve vrednosti. U slučaju izolacije fasadnih pregrada, najčešće se kao nivo spoljašnje buke usvaja vrednost L_{den} , definisana prema akustičkoj zoni kojoj zgrada pripada – gradski centar, stambena zona, blizina većih saobraćajnica i slično. U slučaju buke u domaćinstvima koriste se određene pretpostavke o tipičnim nivoima generisane buke, na primer 70 dB(A), mada oni mogu značajno varirati u zavisnosti od aktivnosti ljudi [Adnađević et al., 2010; Adnađević et al., 2011 c]. Međutim, kao što je već napomenuto, jednobrojna vrednost dugovremenog ekvivalentnog nivoa buke ne mora biti jasno korelisano sa njenom subjektivnom percepcijom. Svođenjem nivoa buke na jednu vrednost gubi se informacija o vremenskim i spektralnim osobinama buke, koje u znatnoj meri mogu uticati na subjektivnu ugroženost. Na primer, buka pretežno impulsnog karaktera može nepovoljnije delovati na čoveka od kontinualne buke jednakog dugovremenog ekvivalentnog nivoa. Takođe istaknute uskopojasne komponente mogu nositi jednaku ukupnu energiju kao i širokopojasna buka, ali će izazivati veće ometanje.

Zvučna izolacija je uvek frekvencijski zavisna, pa zbog toga ukupan nivo prenete buke zavisi od razlike u frekvencijskom domenu između nivoa buke sa pobudne strane i izolacije. Prema trenutno važećem standardu ISO 717 spektar buke većine dominantnih spoljašnjih i unutrašnjih izvora vazdušne buke varira između referentnih Spektara br. 1 i 2, odnosno L_{living} i $L_{traffic}$. Uvođenje referentnih spektara buke i odgovarajućih korekcionih faktora ima za cilj da prilagodi izračunate merodavne

vrednosti zvučne izolacije subjektivnom doživljaju akustičkog komfora pri zaštiti od buke različitih spektralnih karakteristika. Kao što je pokazano, stepen slaganja oblika ovih spektara i spektra realne buke direktno utiče na saglasnost između izračunatih jednobrojnih vrednosti i subjektivne ocene zvučne izolacije. Stoga je ispitivanje validnosti referentnih spektara, to jest njihove sličnosti sa realnom bukom od koje se štiti, neophodan za kvalitetnu ocenu zvučne izolacije u realnim okolnostima.

Međutim, subjektivna percepcija stanja izolacije u nekoj zgradi ne zavisi samo od spektralnog sadržaja buke. Osim frekvencijskog domena, karakteristike signala buke u vremenskom domenu takođe mogu uticati na njeno dejstvo. Na primer, buka u kojoj postoje nagle promene nivoa u vremenu ne mogu se kvantifikovati dugovremenskim ekvivalentnim nivoima zvučnog pritiska. Na prvom mestu to je pojava impulsnih događaja u signalu buke, koji sa sobom nose relativno veliku zvučnu energiju u kratkim vremenskim intervalima. U nastavku će ukratko biti sumirane vremenske i spektralne karakteristike unutrašnje i spoljašnje buke u životnoj sredini, relevantne za ocenu zvučne izolacije.

2.4.1. Buka u domaćinstvima

Referentni spektar buke u domaćinstvima (Spektar br. 1 prema ISO 717-1, odnosno *L_{living}* prema ISO 16717-1) svojim oblikom značajno utiče na proračunatu jednobrojnu vrednost zvučne izolacije unutrašnjih elemenata (prema predlogu standarda ISO 16717-1) ili korekcionog faktora *C* (prema postojećem standardu ISO 717-1). Novija istraživanja pokazuju da spektar buke može u znatnoj meri uticati na doživljaj ostvarenog akustičkog komfora i subjektivnu ocenu zvučne izolacije [Park et al., 2009; Vian et al., 1983]. Pa ipak u literaturi, posebno novijoj, ne postoji mnogo podataka o merenjima buke generisane u domaćinstvima tokom normalnih životnih aktivnosti kao ni njenom spektru [Muellner et al., 2012; Mašović et al., 2013 a]. Jedno istraživanje iz sredine 70-ih godina XX veka prikazuje rezultate merenja spektra buke tipičnih kućnih uređaja – mašine za veš, fena, kuhinjskih aparata i slično [Jackson et al., 1975]. Ipak, razumno je pretpostaviti da su u međuvremenu u domaćinstvima postali zastupljeniji brojni novi ili tehnološki unapređeni uređaji, kao na primer, savremeni kućni audio sistemi, koji nisu pokriveni ovim istraživanjem. Promene koje su se dogodile u tom

domenu morale su uticali na promenu tipičnog spektra generisane buke u stanovima. Sa stanovišta izolacije unutrašnjih pregrada u zgradama, osim kućnih uređaja relevantni su i drugi izvori buke koji mogu delovati uznemirujuće – glasan govor i smejanje, muzički instrumenti, kućni ljubimci i slično.

Proširenje frekvencijskog opsega u kome se tretira zvučna izolacija sa 100-3150 Hz na 50-5000 Hz, što se dogodilo u novije vreme, dodatno povećava značaj referentnih spektara buke. Naročito kritično je proširenje opsega ka niskim frekvencijama (do 50 Hz umesto 100 Hz), gde vrednosti zvučne izolacije po pravilu opadaju u poređenju sa višim delovima frekvencijskog opsega, posebno u slučaju lakih pregrada [Monteiro et al., 2012]. Prema nekim autorima [Park et al., 2009; ISO 16717] proširenje opsega na prvom mestu treba da poveća korelisanost jednobrojnih vrednosti zvučne izolacije sa subjektivnom percepcijom. Ovo je posebno značajno imajući u vidu da su danas u domaćinstvima često zastupljeni izvori buke na frekvencijama ispod 100 Hz [Mortensen, 1999]. Među njima se izdvaja reprodukovana muzika kao glavni izvor niskofrekvencijske buke [Mašović et al., 2011 a, Mašović et al., 2011 b] i dominantni žalbi građana, čak i u zgradama sa inače zadovoljavajućim merodavnim vrednostima zvučne izolacije [Grimwood, 1997]. Ipak, treba napomenuti da su zahtevi za zadovoljavajućom izolacijom od buke koja nastaje govorom i muzikom u velikoj meri različiti, upravo zbog različitih oblika njihovih spektara i širine frekvencijskog opsega od interesa [Park et al., 2009].

Iako se u predlogu standarda ISO 16717-1 navodi da proširenje frekvencijskog opsega ispod 100 Hz ne bi trebalo da utiče na povećanje nesigurnosti određivanja jednobrojne vrednosti zvučne izolacije, pojedini autori upućuju na povećan rizik po preciznost jednobrojnih vrednosti usled veće nesigurnosti u određivanju vrednosti izolacije na niskim frekvencijama. Ovo posebno važi imajući u vidu da na nesigurnost izmerenih vrednosti izolacije na niskim frekvencijama utiču specifični faktori kao što su dimenzije i oblik predajne i prijemene prostorije, vreme reverberacije u njima i pozicije izvora i prijemnika [Kropp et al., 1994]. Navedeni faktori ne zavise od primenjene tehnike merenja izolacije, već utiču na pojavu i oblik stojećih talasa u prostorijama, a time i raspodelu zvučne energije na niskim frekvencijama u njima, koja je objekt merenja (nivoi L_1 i L_2). Kao posledica, izmerene vrednosti izolacije mogu da variraju od slučaja do slučaja, u zavisnosti od navedenih faktora.

Proširenje frekvencijskog opsega kritikovano je u literaturi i sa psihoakustičkog aspekta. Iako se muzika sa niskofrekvencijskim komponentama generisana audio opremom, radio prijemnikom, TV-om i slično često navodi kao čujna u zgradama sa zadovoljavajućom izolacijom, to ne znači da je ona i glavni izvor uznemiravanja bukom [Grimwood, 1997]. Prema nekim autorima značaj niskih frekvencija na opštu ugroženost bukom nije dovoljno veliki da bi opravdalo proširenje obaveznog frekvencijskog opsega [Vian et al., 1983]. Izvori buke na srednjim frekvencijama, kao što su glasan govor ili smeh, mogu imati značajniju ulogu. Vian et al. su u svom istraživanju ustanovili da je subjektivna ugroženost bukom manja u slučaju krivih zvučne izolacije koje opadaju strmije ka niskim frekvencijama odnosno dominantno slabe komponente iz srednjeg dela frekvencijskog opsega, nego u slučaju ravnijih krivih, čak i u slučaju signala muzike.

Na kraju, treba još jednom napomenuti da na subjektivni osećaj ugroženosti vazдушnom bukom, pored oblika spektra, mogu uticati i druge karakteristike generisane buke, kao što su prisustvo tonskih i impulsnih komponenti. Impulsne pojave u zvucima generisanim tokom normalnih životnih aktivnosti u domaćinstvima nisu retke – udarci kuhinjskim posuđem, kašalj, vika dece, čak i glasan smeh. Pa ipak, impulsni karakter buke u domaćinstvima je veoma retko analiziran u literaturi [Adnađević et al., 2011 a; Adnađević et al., 2011 b]. Tonske komponente u buci u domaćinstvima javljaju se pre svega pri glasnoj reprodukciji muzike i pro sviranju muzičkih instrumenata.

Iz svega navedenog sledi da je karakterizacija unutrašnje buke u zgradama, kako u frekvencijskom tako i u vremenskom domenu, neophodna za kvalitetno numeričko izražavanje zvučne izolacije unutrašnjih pregrada, pre svega jednobrojnih vrednosti. Za slučaj izolacije od zvuka udara novija istraživanja pokazuju povećanje korelisanosti jednobrojnih vrednosti normalizovanih nivoa zvuka udara tavanica i subjektivne percepcije buke sa proširenjem frekvencijskog opsega ka nižim frekvencijama i ispod proširenog opsega, do čak 20 Hz [Ljunggren et al., 2014]. Prema istom istraživanju to ne važi za izolaciju od vazdušnog zvuka, gde dalje proširenje frekvencijskog opsega ka niskim frekvencijama ne povećava korelisanost sa subjektivnim doživljajem izolacije. Sve to ukazuje da u oblasti buke u domaćinstvima postoji prostor za dalja istraživanja.

2.4.2. Buka saobraćaja

Spoljašnja buka, pre svega buka saobraćaja znatno je češće tretirana u praksi od buke u domaćinstvima. Međunarodni standard koji definiše deskriptore buke u životnoj sredini i procedure za njihovo merenje, orijentisan je pre svega na saobraćajnu i industrijsku buku [ISO 1996]. U domenu građevinske akustike spoljašnja buka relevantna je za ocenu zvučne izolacije fasadnih elemenata. Spektar br. 2, odnosno $L_{traffic}$, koristi se kao referentni spektar za ocenu zvučne izolacije od spoljašnje buke jednobrojnomo vrednošću i predstavlja A-ponderisan spektar buke saobraćaja.

Glavna karakteristika saobraćajne buke su kratkoročne i dugoročne fluktuacije nivoa koje standardni parametri zasnovani na dugovremenim ekvivalentnim A-ponderisanim nivoima nisu u mogućnosti da kvantifikuju [Can et al., 2008]. To su na primer varijacije nivoa tokom dana usled smene saobraćajnog špica, perioda sa većom gustinom saobraćaja i mirnijih intervala, zatim smene stanja tokom radnih dana i vikenda, praznika ili godišnjih doba, kao i kratkoročne varijacije na saobraćajnicama regulisanim svetlosnom signalizacijom. Karakteristične su i varijacije nivoa pri pojedinačnim prolascima vozila u ulicama veoma niskog intenziteta saobraćaja. Ovakve vremenske varijacije utiču i na različit subjektivan doživljaj percepirane buke saobraćaja [Raimbault et al., 2003].

Spektar saobraćajne buke u urbanim sredinama takođe može varirati u zavisnosti od različitih okolnosti – tipa vozila i podloge, intenziteta saobraćaja, brzine vozila, fizičkog okruženja (zgrade, zelene površine i slično), vremenskih uslova itd. U takvim situacijama korelisanost jednobrojne vrednosti dobijene korišćenjem referentnog spektra $L_{traffic}$ sa subjektivnim osećajem izolacije od spoljašnje buke može biti u znatnoj meri narušena [Mašović et al., 2013 b]. Posebno od značaja može biti uvedeno proširenje relevantnog frekvencijskog opsega u kome se tretira izolacija od spoljašnjeg zvuka – od 50 Hz do 5000 Hz. Proširenje opsega prema niskim frekvencijama može u slučaju izolacije od spoljašnje buke imati potencijalno veći značaj nego u slučaju unutrašnje buke, jer su vrednosti referentnih spektara na njima više. Samim tim, niže vrednosti izolacije fasadnih pregrada na niskim frekvencijama mogu značajno oboriti izračunate vrednosti jednobrojnih parametara i time uticati na ocenu izolacije pregrada.

Referentni spektri, nezavisno od širine frekvencijskog opsega u kom su definisani, svojim oblikom trebalo bi da verodostojno reprezentuju oblik spektra realne buke saobraćaja kojom je pogođena fasada zgrade. Pa ipak, saobraćajna buka je veoma promenljivog spektra. Već prema podacima iz standarda ISO 717-1 može se zaključiti da, iako je Spektar br. 2 prevashodno namenjen buci saobraćaja u gradskim sredinama, Spektar br. 1 je pogodniji za predstavljanje buke saobraćaja na autoputu sa prosečnim brzinama vozila iznad 80 km/h. Takođe, s obzirom da je još uvek važeći referentni spektar buke saobraćaja definisan 60-ih godina XX veka, razumno je očekivati da su povećanje broja vozila i tehnološka unapređenja uticala na oblik spektra saobraćajne buke danas. U literaturi već postoje predlozi revizije postojećih i uvođenja novih referentnih spektara buke saobraćaja [Buratti et al., 2014].

3. Postupak proračuna zvučne izolacije

Sa pojavom prvih propisa koji su uveli minimalne kriterijume zvučne izolacije u zgradama, što je bilo sredinom prošlog veka, javila se potreba za definisanjem metoda za proračun, odnosno predikciju vrednosti zvučne izolacije u budućim zgradama u fazi njihovog projektovanja. To je bilo neophodno da bi propisani kriterijumi bili zadovoljeni nakon izgradnje. Ove metode treba da omoguće predikciju izolacionih karakteristika pregrade na prijemnoj prostoriji koja je izložena dejstvu buke. Za vazdušni zvuk to mogu biti unutrašnji zidovi, tavanice i fasadni zidovi, a za zvuk udara tavanice između prostorija. Konkretno, pod time se podrazumevaju proračuni izolacionih moći navedenih pregrada, odnosno nivoa zvuka udara tavanica, a kao ulazni parametri proračuna koriste se različiti podaci o fizičkim svojstvima pregrada.

U početku su preporuke za predikciju zvučne izolacije u zgradama bile opisnog karaktera [Gerretsen, 1979], odnosno, za različite tipove najčešće korišćenih pregrada definisane su očekivane vrednosti izolacije koje se njima ostvaruju. Prvi matematički modeli za proračun izolacije od vazdušnog zvuka pregrada (zidova ili tavanica) bili su definisani za masivne homogene pregrade i zasnovani na „zakonu mase“ [Kurtović, 1977]:

$$R(\vartheta) = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\omega m' \cos \vartheta}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \right], \quad (\text{J3.1})$$

gde su: ω kružna frekvencija ($\omega = 2\pi f$), m' površinska masa pregrade, ρ_0 gustina vazduha ($1,2 \text{ kg/m}^3$), c_0 brzina zvuka u vazduhu (340 m/s) i ϑ ugao incidencije zvuka na pregradu u odnosu na osu normalnu na nju. Pod pretpostavkom difuznog polja sa predajne strane pregrade, izolaciona moć se može izračunati integraljenjem po svim uglovima incidencije ϑ [Vér et al., 2006]:

$$\tau = \int_0^{\pi/2} \tau(\vartheta) \sin 2\vartheta d\vartheta, \quad (\text{J3.2a})$$

gde je τ koeficijent transmisije. Njegova vrednost definiše izolacionu moć izrazom $R = -10 \log_{10}(\tau)$. Ove formule izvedene su pod pretpostavkom da u pregradama ne postoje gubici zvučne energije duž spojeva sa ostalim, susednim pregradama. U realnosti, čak i u laboratorijskim uslovima, ovakvi gubici utiču na izolacionu moć analizirane pregrade. Zbog toga su u literaturi predloženi i složeniji modeli od zakona

mase, i jedan takav model prikazan je u Aneks B evropske norme koja definiše postupak proračuna zvučne izolacije u zgradama EN 12354-1. Pokazano je da je koeficijent transmisije [Josse et al., 1964; Richter, 1968]:

$$\tau = \begin{cases} \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2f \eta_{tot}}, & f > f_c \\ \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi \sigma^2}{2\eta_{tot}}, & f \approx f_c \\ \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left(2\sigma_f + \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1^2 + l_2^2} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \frac{\sigma^2}{\eta_{tot}} \right), & f < f_c \end{cases}, \quad (J3.2b)$$

Ovde je f_c frekvencija koincidencije pregrade, η_{tot} faktor ukupnih gubitaka u materijalu pregrade, σ faktor zračenja za slobodne fleksione talase, σ_f faktor zračenja za prinudni prenos (koji se ne može zanemariti na frekvencijama ispod frekvencije koincidencije pregrade), a l_1 i l_2 su dimenzije pravougaone pregrade. Definisanjem koeficijenta transmisije određena je i izolaciona moć kao $R = -10 \log_{10}(\tau)$. Frekvencija koincidencije pregrade može se proračunati korišćenjem formule [Beranek, 1960]:

$$f_c = c_0^2 / (1,8 c_L t), \quad (J3.3)$$

gde je c_L brzina longitudinalnih talasa u osnovnom materijalu pregrade, a t njena debljina.

Faktor ukupnih gubitaka, η_{tot} u izrazu (J3.2b) kvantifikuje tri tipa gubitaka zvučne energije u pregradama: unutrašnje gubitke, gubitke usled zračenja i gubitke na spojevima pregrade. Ova tri tipa gubitaka izražena su preko tri sabirka u formuli za faktor ukupnih gubitaka, respektivno [Richter, 1968]:

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{2\rho_0 c_0 \sigma}{2\pi f m'} + \frac{c_0}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k \quad (J3.4),$$

gde su η_{int} faktor unutrašnjih gubitaka, S površina pregrade, l_k ($k = 1, 2, 3, 4$) dimenzije pravougaone pregrade, a α_k koeficijenti apsorpcije fleksionih talasa na spoju k . Faktori zračenja σ i σ_f su veličine koje zavise od fizičkih karakteristika pregrada kao što su njene dimenzije, površinska masa i frekvencija koincidencije, dok koeficijenti apsorpcije α_k zavise i od indeksa prenosa vibracija (K_{ij}) na spojevima pregrade. Pošto indeks prenosa vibracija opisuje slabljenje energije vibracija pri prenosu iz pregrade i u pregradu j , koeficijenti apsorpcije time kvantifikuju gubitke na spojevima pregrade, a dobijene vrednosti izolacione moći zavise i od susednih pregrada u konkretnoj situaciji

(laboratorijskoj ili *in situ*). Zakon mase definisan jednačinom (J3.1) ne vidi pojavu takvih gubitaka. Stoga se dobijene vrednosti izolacione moći za slučaj konkretne situacije na terenu dodatno obeležavaju sa R_{situ} . Faktor ukupnih gubitaka određuje i strukturno vreme reverberacije unutar pregrade:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{tot}} \quad (J3.5).$$

Prvi proračuni izolacije tavanica od zvuka udara takođe su bili namenjeni homogenim masivnim konstrukcijama. Za standardni izvor zvuka udara (tapkalicu) vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara u tercnim frekvencijskim podopsezima može se proračunati prema obrascu [Cremer et al., 2005]:

$$L_n \approx \left[155 - 30 \log_{10} m' + 10 \log_{10} T_s + 10 \log_{10} \sigma + 10 \log_{10} \frac{f}{1000} \right] \text{dB}. \quad (J3.6)$$

Iz teorije reciprociteta takođe sledi da, kada se prinudni prenos energije (ispod frekvencije koincidencije) može zanemariti, suma izolacione moći i normalizovanog nivoa zvuka udara homogene masivne tavanice zavisi samo od frekvencije [Heckl et al., 1963; Gerretsen, 1994]. Za terčne frekvencijske podopsege data je izrazom:

$$R + L_n = [38 + 30 \log_{10} f] \text{dB}. \quad (J3.7)$$

Prikazani matematički modeli koriste se za proračun laboratorijskih i *in situ* vrednosti deskriptora izolacije pregrada. Zvuk u zgradama prostire se, osim kroz pregradu direktno izloženu buci, i kroz njoj susedne bočne pregrade čiji doprinos u realnim okolnostima najčešće nije zanemarljiv (osim u slučaju fasadnih zidova sa dodatnim elementima poput prozora ili balkonskih vrata koji dominantno određuju izolaciju od spoljašnjeg vazdušnog zvuka). Da bi se procenile građevinske vrednosti izolacije bočni prenos je najčešće uračunavan paušalno. Jedan takav primera je uvođenje dodatne margine od 2 dB za koju se umanjuju izmerene ili proračunate laboratorijske vrednosti izolacionih moći pregrada i tako estimiraju vrednosti građevinske izolacione moći [DIN 4109, 1989].

Šezdesetih godina prošlog veka javili su se i prvi matematički modeli za proračun građevinskih vrednosti izolacije u zgradama zasnovani na statističkoj teoriji i difuznom polju u predajnoj i prijemnoj prostoriji i prenosu zvuka u zgradama [Gerretsen, 1979]. Jedan od najsveobuhvatnijih bio je SEA model (eng. *Statistical Energy Analysis*), a u nešto jednostavnijoj formi i „klasični“ model koji će poslužiti kao

osnova danas jednim postojećim međunarodnim normama za predikciju zvučne izolacije, čija je oznaka EN 12354.

3.1. SEA model

SEA model za proračun prenosa zvuka i zvučne izolacije u zgradama nastao je početkom 60-ih godina XX veka [Lyon et al., 1962]. Baziran je na konceptu protoka zvučne snage i principu održanja zvučne energije. Tok zvučne energije prati se između različitih podsistema u stacionarnom režimu u frekvencijskom domenu. U slučaju proračuna zvučne izolacije unutrašnjih pregrada, celokupan sistem čine predajna i prijemna prostorija, a podsisteme svi direktni i indirektni vazdušni i strukturni prenosi i građevinski elementi koji u njima učestvuju. Pritom se podrazumeva da su odzivi podsistema dominantno prisutni na njihovim sopstvenim modovima.

Osnovna tema SEA modela prenosa zvuka između prostorija je proračun zvučne energije sadržane u sopstvenim modovima svih elemenata svih podsistema i njihovog preklapanja u spektru [Vorländer, 2008]. Da bi matematički model bio jednostavniji, uvedena je pretpostavka da su svi podsistemi nezavisni jedan od drugog (neupareni) i da u svakom posmatranom frekvencijskom opsegu imaju statistički mnogo nezavisnih sopstvenih modova. U slučaju da je naveden uslov o nezavisnosti podsistema ispunjen i pod pretpostavkom da su ulazna i izlazna snaga celog sistema jednake, prema principu održanja energije disipirana snaga podsistema i data je formulom [Lyon et al., 1965]:

$$P_{i,diss} = \omega \eta_i E_i, \quad (J3.8)$$

gde je ω kružna frekvencija, η_i faktor gubitaka usled disipacije, a E_i energija stacionarnog stanja sadržana u modovima podsistema, čija je gustina (broj po Hz) v_i . Kada su dva podsistema i i k povezana tako da između njih postoji protok zvučne energije, zakon održanja energije daje:

$$P_{ik} = \omega v_i \eta_{ik} \left(\frac{E_i}{v_i} - \frac{E_k}{v_k} \right), \quad (J3.9)$$

gde P_{ik} predstavlja tok zvučne snage između podsistema i i k , a η_{ik} nastale gubitke. Pri tome važi i zakon reciprociteta:

$$P_{ik} = -P_{ki} \quad (J3.10)$$

iz koga sledi:

$$v_i \eta_{ik} = v_k \eta_{ki} \quad (\text{J3.11})$$

Ukupna snaga prosleđena podsistemu i tada se može izračunati kao suma disipovane snage i snage prenete od ostalih podsistema $k \neq i$:

$$P_{i,in} = P_{i,diss} + P_{ik} = \omega \eta_i E_i + \sum_k \omega v_i \eta_{ik} \left(\frac{E_i}{v_i} - \frac{E_k}{v_k} \right), \quad (\text{J3.12})$$

a faktor ukupnih gubitaka u njemu, $\eta_{i,tot}$, kao:

$$\eta_{i,tot} = \eta_i + \sum_k \eta_{ik} = \frac{2,2}{fT_i}, \quad (\text{J3.13})$$

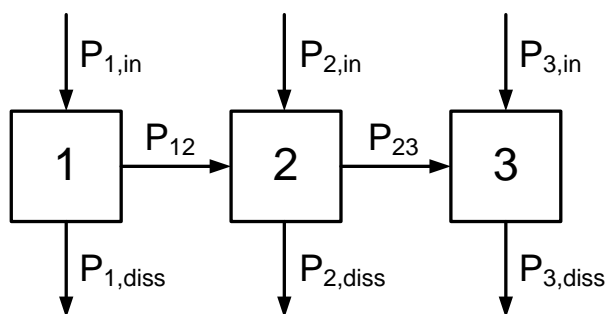
gde je T_i vreme reverberacije podsistema i .

Prenos energije između susednih prostorija najjednostavnije se može modelovati sa tri redno vezana podsistema [Lyon et al., 1965; Crocker et al., 1969], kao što je to prikazano na Slici 3.1. Prvi podsistem u tom slučaju predstavlja predajnu prostoriju, drugi zajedničku pregradu, a treći prijemnu prostoriju. Za proračun građevinske izolacije od vazdušnog zvuka između predajne i prijemne prostorije relevantan je odnos energija u njima – E_1/E_3 , kada je pobuđena predajna prostorija ($P_{1,in} \neq 0$), dok su prosleđene snage ostalim podsistemima jednake nuli ($P_{2,in} = P_{3,in} = 0$). Rešavanjem sistema jednačina (J3.12) po svim podsistemima sistema sa ovako zadatim početnim uslovima, odnos energija E_1/E_3 može se izraziti preko faktora gubitaka unutar i između podsistema. Da bi model bio kompletniji i obuhvatio i indirektan prenos, bočne pregrade mogu se predstaviti dodatnim podsistemima sa odgovarajućim vezama između njih [Gerretsen, 1979; Crocker et al., 1969]. Na kraju, umesto faktora gubitaka mogu se koristiti odgovarajuće jednačine [Gerretsen, 1979]:

- za faktor ukupnih gubitaka podsistema: $\eta_{i,tot} = \frac{2,2}{fT_i}$ (videti i jednačinu (J3.5)),
- za faktor gubitaka između prostorije i i njene pregrade k : $\eta_{ik} = \frac{\tau_k m'_k S_k \eta_{k,tot}}{4V_i \rho_0 \sigma_k}$,
- za faktor gubitaka između pregrade i i susedne prostorije k : $\eta_{ik} = \frac{\sigma_i \rho_0 c_0}{\omega m'_i}$ i
- za faktor gubitaka između dve pregrade sa zajedničkim spojem i i k :

$$\eta_{ik} = \frac{m'_k S_k \eta_{k,tot}}{m'_i S_i} d_{ik},$$

gde su τ , m' , S , η_{tot} i σ koeficijent transmisije, površinska masa, površina, faktor ukupnih gubitaka i faktor zračenja fleksionih talasa pregrade, respektivno, V zapremina prostorije, ρ_0 i c_0 gustina vazduha i brzina zvuka u njemu, respektivno, a d_{ij} odnos brzine vibracija u pregradama i i j .



Slika 3.1. SEA model prenosa zvuka između predajne i prijemne prostorije predstavljen sa tri podsistema

SEA model opisuje tok zvučne energije u zgradama u frekvencijskom domenu. Kako se zvučna izolacija u praksi najčešće tretira u tercnim frekvencijskim podopsezima, navedene formule mogu se primeniti u svakom od tercnih frekvencijskih podopsega ponaosob. Što je gustina modova podsistema po frekvenciji veća, to će biti veća i tačnost matematičkog modela. Ukoliko su tokovi energije kroz zajedničku i sve bočne pregrade statistički nezavisni (bez međusobnog uticaja) i razdvojivi, i ukoliko se zanemare sve putanje energije iz predajne u prijemnu prostoriju drugog i višeg reda (kroz više od jednog spoja pregrada), može se pokazati da SEA pristup i klasični pristup prikazan u normama EN 12354, daju isti matematički model za proračun građevinskih vrednosti izolacije za frekvencijski opseg iznad frekvencije koincidencije pregrada [Gerretsen, 1979]. Ovaj model je detaljnije prikazan u nastavku.

3.2. Klasičan model (EN 12354)

Klasičan model prostiranja zvučne energije u zgradama zasnovan je na pretpostavci postojanja difuznog polja u prostorijama i statističkoj teoriji zvučnog polja [Gerretsen, 1986]. U literaturi je takođe pokazano da se pod određenim pretpostavkama i pojednostavljenjima, pre svega zanemarivanjem svih putanja prenosa zvuka kroz više

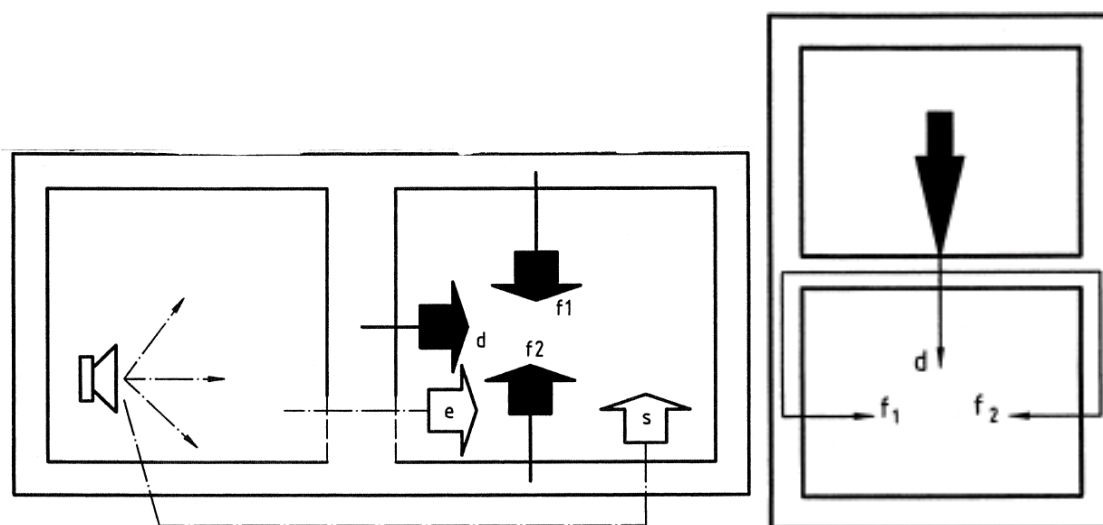
od jednog spoja između pregrada, SEA model može svesti na model identičan klasičnom [Gerretsen, 1979]. Stoga je klasičan model kao svedeniji odabran za osnovu danas jedinim važećim internacionalnim standardima za predikciju zvučne izolacije u zgradama [Gerretsen, 1994].

Evropska norma EN 12354 propisuje matematičke modele za proračun zvučne izolacije, unutrašnje buke i zvučne apsorpcije u građevinskoj akustici [EN 12354]. Standard ima 6 delova, od kojih prva dva propisuju modele za proračun zvučne izolacije od vazdušnog (Deo 1) i udarnog zvuka (Deo 2) između prostorija. Deo 3 i Deo 4 standarda bave se izolacijom fasadnih pregrada od spoljašnjeg vazdušnog zvuka (Deo 3) i prenosom unutrašnjeg zvuka spolja (Deo 4). Preostala dva dela za cilj imaju predikciju buke unutrašnjih tehničkih instalacija i opreme (Deo 5) i zvučne apsorpcije i vremena reverberacije u prostorijama (Deo 6). Kako im je tema proračun zvučne izolacije, prva četiri dela norme EN 12354 koriste skup deskriptora izolacije zajednički sa standardima iz serija ISO 140 i ISO 10140, koji propisuju metode za laboratorijska i terenska merenja njihovih vrednosti. Ovi deskriptori opisani su u poglavlju 2.2. Rezultat proračuna po pravilu su skupovi vrednosti deskriptora u oktavnim ili tercnim podopsezima, pa se za proračunavanje jednobrojnih (merodavnih) vrednosti koriste standardi iz serije ISO 717. Tako dobijene merodavne vrednosti mogu se zatim porediti sa minimalnim kriterijumima za zvučnu izolaciju propisanim nacionalnim regulativama. Na taj način proračuni prikazani u normama iz serije EN 12354 mogu se koristiti u fazi projektovanja zgrada radi procene da li će zakonom propisane vrednosti biti zadovoljene. Od pojave 2000. godine, norma je usvojena najpre u razvijenim zemljama Evropske unije, gde je njegoa primena obavezna pri projektovanju novih zgrada. U Republici Srbiji, norma je usvojena kao standard 2008. godine, ali još uvek nema obaveznu primenu.

3.2.1. Proračun izolacije od vazdušnog zvuka i zvuka udara između prostorija

Kao osnovni deskriptor izolacije od vazdušnog zvuka između prostorija usvojena je građevinska izolaciona moć zajedničke pregrade (R'), a od udarnog zvuka normalizovani nivo zvuka udara (L_n'). Pod zajedničkom pregradom podrazumeva se deo građevinske pregrade koju „vide“ obe, predajna i prijemna prostorija, sa svim

eventualnim dodatnim elementima na njoj. Zbog složenosti matematičkih procedura, model razmatra samo scenario dve susedne prostorije – „jedna pored druge“ (zajednička pregrada je zid) ili „jedna iznad druge“ (zajednička pregrada je tavanica) i ova dva scenarija prikazana su na Slici 3.2. Pod bočnim pregradama podrazumevaju se sve pregrade koje su susedne zajedničkoj pregradi i sa njom imaju zajednički spoj. U slučaju vertikalno postavljenih prostorija (jedna iznad druge), to su bočni vertikalni zidovi u predajnoj i prijemnoj prostoriji, dok su u slučaju horizontalno postavljenih prostorija (jedna pored druge) to i horizontalne pregrade, tavanice i podovi u obe prostorije. U slučaju smaknutih prostorija, pod bočnom pregradom podrazumevaju se i one pregrade u jednoj od prostorija koje se nalaze u nastavku zajedničke pregrade do njihovog prvog sledećeg spoja. Ukoliko na bilo kojoj bočnoj pregradi postoji diskontinuitet po jednoj njenoj celoj dimenziji, poput dodatnog spoja sa susednom smaknutom prostorijom ili vrata od poda do plafona, efektivnim delom bočne pregrade smatra se samo njen deo od spoja sa zajedničkom pregradom do diskontinuiteta.



Slika 3.2. Putanje direktnog i indirektnog prenosa vazdušnog (levo) i udarnog zvuka (desno) između prostorija [EN 12354]

Implicitno, modelom su pokriveno samo pregrade pravougaonog i prostorije paralelopipednog oblika, pa se pregrade i prostorije složenijih oblika moraju svesti na ovaj osnovni oblik u proračunima. Proračun je moguć i za slučaj smaknutih prostorija, kada se pojedine bočne pregrade nalaze u nastavku zajedničke, ali prostorije svakako

moraju imati zajedničku pregradu, odakle sledi da dijagonalno postavljene prostorije sa zajedničkim samo jednim spojem zidova ili prostorije između kojih postoji međuprostor nisu obuhvaćene ovakvim modelom. Radi daljeg pojednostavljenja modela, putanje zvuka kroz više od jednog spoja između pregrada se ne razmatraju, uz pretpostavku da je rasipanje zvučne energije u različitim pravcima na svakom od spojeva dovoljno veliko da se uticaj zvučne energije čija putanja od predajne do prijemne prostorije uključuje dva ili više spojeva može zanemariti.

Kao što je navedeno u poglavlju 1.2, vazdušni zvuk iz predajne u prijemnu prostoriju može da pređe na dva načina – vazдушnim i strukturnim putem. Vazdušni prenos moguć je samo u okolnostima u kojima postoji veza između dve prostorije vazдушnim putem, na primer ventilacionim otvorima na zajedničkoj pregradi (direktan vazdušni prenos) ili bočnim ventilacionim sistemima, međuprostorom spuštenih tavanica i izdignutih podova, bočnim hodnicima i slično (indirektan vazdušni prenos). Kako je strukturni prenos moguć kroz zajedničku, ali i njoj susedne i sa njom spojene bočne pregrade, i strukturni prenos može biti direktan, isključivo kroz zajedničku pregradu, i indirektan (eng. *flanking*), preko bočnih pregrada. Najkraći put strukturnog prenosa zvuka svakako je kroz zajedničku pregradu, ali doprinos strukturnog prenosa putem bočnih zidova često nije zanemarljiv i mora se uzeti u obzir pri proračunu zvučne izolacije. Dok je putanja direktnog strukturnog prenosa kroz zajedničku pregradu jedinstvena, postoji više putanja za indirektan strukturni prenos i to: od bočnih pregrada predajne prostorije ka zajedničkoj, od zajedničke pregrade ka bočnim pregradama prijemne prostorije i od bočnih pregrada predajne prostorije ka bočnim pregradama prijemne prostorije. Za proračun zvuka udara, od značaja su samo direktan i indirektan strukturni prenos, odnosno prenos udarne strukturne pobude kroz pregrade prostorija i spojeve između njih, dok se eventualni vazdušni prenos zanemaruje.

Slika 3.2 prikazuje tipične putanje prenosa zvuka između predajne i prijemne prostorije relevantne za proračun zvučne izolacije od vazdušnog zvuka i zvuka udara prema klasičnom modelu. Za strukturni prenos vazdušnog zvuka (crne strelice na slici levo) prikazane su direktna (d) i dve bočne putanje (f1 i f2), a za vazdušni prenos vazdušnog zvuka prikazane su po jedna direktna (e) i indirektna putanja (s). Nezavisno od toga da li su prostorije jedna iznad druge ili jedna pored druge, u slučaju susednih nesmaknutih prostorija postoji jedna direktna strukturna putanja prenosa vazdušnog

zvuka kroz zajedničku pregradu (Dd) i dvanaest bočnih strukturnih putanja (Fd, Df i Ff) kroz četiri spoja zajedničke pregrade, gde se velika slova u oznakama putanja odnose na predajnu, a mala na prijemnu stranu zajedničke pregrade. Strukturni prenos strukturnog zvuka (Slika 3.2 desno) dat je za slučaj prostorija jedna iznad druge i to putanja direktnog (d) i dve putanje bočnog prenosa (f1 i f2). Kada nesmaknute prostorije imaju zajedničku tavanicu postoji jedna direktna (Dd) i četiri bočne putanje (Df) kroz četiri bočne pregrade donje, prijemne prostorije. Ukoliko su prostorije jedna pored druge direktan strukturni prenos strukturnog zvuka ne postoji, već se zvuk udara prenosi dvema bočnim putanjama kroz zajednički zid (Fd) i pod u prijemnoj prostoriji (Ff).

Radi pojednostavljenja matematičkih procedura i lakšeg uvida u tok zvučne energije kroz pojedinačne građevinske elemente, direktnim i indirektnim putanjama, kao i doprinos pojedinačnih putanja ukupnoj izolaciji, građevinska izolaciona moć (R') i normalizovani nivo zvuka udara (L_n') raščlanjeni su na komponente direktnog i indirektnog prenosa navedene u Tabeli 3.1 (i u indeksima normalizovanog nivoa zvuka udara bočnim putanjama predstavlja pod predajne prostorije, a j zid ili pod prijemne prostorije). Izolaciona moć (R) i normalizovana zvučna izolovanost (D_n) kvantifikuju strukturni i vazdušni prenos vazdušnog zvuka kroz pojedinačne elemente, respektivno, dok parametar L_n (normalizovani nivo zvuka udara) kvantifikuje prenos zvuka udara. Raščlanjivanje različitih putanja prenosa moguće je samo pod pretpostavkom o energetskom prenosu zvučne energije, odnosno statističkoj nezavisnosti navedenih parametara za različite elemente, koja je u realnosti samo aproksimativna. U realnim okolnostima, direktna (R_{Dd}) i bočne izolacione moći (R_{Df} , R_{Fd} i R_{Ff}), kao i normalizovani nivoi zvuka udara direktnim ($L_{n,d}$) i indirektnim prenosom ($L_{n,ij}$) su u određenoj meri međusobno zavisne veličine. Ipak, elegantnost i pojednostavljenost proračuna koji se time postižu opravdavaju uvođenje ovakve podele i eventualnu netačnost rezultata koju aproksimacija unosi.

Direktan strukturni prenos vazdušnog i udarnog zvuka – izolaciona moć R_{Dd} i normalizovani nivo zvuka udara $L_{n,d}$ – zavise od *in situ* vrednosti izolacione moći (R_{situ}) i normalizovanog nivoa zvuka udara ($L_{n,situ}$) zajedničke pregrade i eventualnog doprinosa dodatnih obloga na njoj (ΔR , ΔL), na strani predajne (D) ili prijemne prostorije (d):

$$R_{Dd} = R_{sep,situ} + \Delta R_D + \Delta R_d, \quad (J3.14)$$

$$L_{n,d} = L_{n,situ} - \Delta L_D - \Delta L_d, \quad (J3.15)$$

Dodatne obloge zastupljene su najčešće u vidu zidnih obloga u horizontalno postavljenim prostorijama, odnosno podnih obloga, plivajućih podova i spuštene tavanica između prostorija jedna iznad druge. $R_{sep,situ}$ i $L_{n,situ}$ su *in situ* vrednosti izolacione moći i normalizovanog nivoa udara zajedničke pregrade, respektivno, definisane su pomoću njihovih laboratorijskih vrednosti (R_{sep} i L_n) i laboratorijskih ($T_{s,lab}$) i *in situ* ($T_{s,situ}$) vrednosti strukturnih vremena reverberacije [Gerretsen, 1994]:

$$R_{sep,situ} = R_{sep} - 10 \log_{10} \left(\frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \right) \text{dB} \quad (J3.16)$$

$$L_{n,situ} = L_n + 10 \log_{10} \left(\frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \right) \text{dB}. \quad (J3.17)$$

Indeks *sep* u oznakama izolacionih moći u formulama (J3.14 i J3.16), ističe da se izolaciona moć odnosi na zajedničku pregradu koja razdvaja dve prostorije (od eng. *separating element*).

Tabela 3.1. Međusobno nezavisni parametri koji predstavljaju doprinose različitih vrsta prenosa i putanja vazdušnog i udarnog zvuka

prostorija prijemna \ predajna	zajednička pregrada (D)	bočna pregrada (F)
zajednička pregrada (d)	$R_{Dd}, D_{n,e}, L_{n,d}^*$	$R_{Fd}, L_{n,ij}^{**}$
bočna pregrada (f)	$R_{Df}, L_{n,ij}^*$	$R_{Ff}, D_{n,s}^{***}, L_{n,ij}^{**}$

* za prostorije jedna iznad druge,

** za prostorije jedna pored druge,

*** $D_{n,f}$ za spuštene tavanice i slične sisteme indirektnog strukturnog prenosa koji u značajnoj meri uključuju i vazdušni prenos

Sa druge strane, bočne izolacione moći R_{ij} (R_{Df} , R_{Fd} i R_{Ff}) i normalizovani nivoi zvuka udara za bočne strukturne prenose ($L_{n,ij}$), pored *in situ* vrednosti izolacionih moći dveju pregrada kroz koje se zvučna energija prenosi (i i j), normalizovanog nivoa zvuka udara poda u predajnoj prostoriji i eventualnih dodatnih slojeva na njima, zavise i od slabljenja zvučne energije na njihovom spoju. Ova slabljenja izražavaju se srednjom vrednošću *in situ* razlike nivoa brzine vibracija između pregrada u oba smera – od pregrade i ka pregradi j i obrnuto:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = \frac{D_{v,ij,situ} + D_{v,ji,situ}}{2} [\text{dB}], \quad (\text{J3.18a})$$

gde je $D_{v,ij,situ} = 10\log_{10}(d_{v,ij,situ})$, a $d_{v,ij,situ}$ odnos brzina vibracija u elementima i i j . Pod pretpostavkom difuznog zvučnog polja u predajnoj i prijemnoj prostoriji i statističke teorije prenosa zvučne energije, mogu se izvesti sledeći obrasci [Gerretsen, 1986]:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \Delta R_i + \Delta R_j + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10\log_{10} \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \text{ dB} \quad (\text{J3.19})$$

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_j - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10\log_{10} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \text{ dB}. \quad (\text{J3.20})$$

S_i i S_j su površine pregrada i i j , a S_s površina zajedničke pregrade. Gubici energije na spojevima zavise od više fizičkih pojava:

- geometrije spojeva (njihove dužine, l_{ij} , i površina pregrada koje ih čine, S_i i S_j),
- smanjenja energije vibracija prolaskom kroz spoj, predstavljenih indeksom prenosa vibracija (K_{ij}) i
- energetskih gubitaka unutar pregrada koje čine spoj, predstavljenih njihovim *in situ* strukturnim vremenima reverberacije ($T_{s,situ}$).

Ovo je izraženo formulom:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = \max \left(K_{ij} - 10\log_{10} \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}} \text{ dB}, \quad 0\text{dB} \right), \quad (\text{J3.18b})$$

gde je:

$$a_{i,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,situ}} \sqrt{\frac{1000}{f}} \quad (\text{J3.21})$$

in situ ekvivalentna apsorpciona dužina elementa i .

Za sve lake, nehomogene pregrade, poput gipsanih i drvenih pregrada, uvodi se dodatna aproksimacija $T_{s,i,situ} = T_{s,i,lab}$. Tada je $R_{i,situ} = R_i$, $L_{n,situ} = L_n$ i $a_{i,situ} = S_i$.

Konačno, ukupna izolacija od vazdušnog zvuka zavisi i od eventualnog vazdušnog prenosa između prostorija, koji se kvantifikuje normalizovanim vrednostima izolovanosti malih elemenata ($D_{n,e}$) poput ventilacionih otvora, ili bočnih sistema ($D_{n,s}$ ili $D_{n,f}$) poput hodnika, ventilacionih kanala i slično. Kada se sumiraju svi eventualni energetski doprinosi prenosnih putanja između predajne i prijemne prostorije, formula za izračunavanje građevinske vrednosti izolacione moći dobija oblik:

$$R' = -10 \log_{10} \left[10^{-R_{Dd}/10} + \sum_F 10^{-R_{Fd}/10} + \sum_f 10^{-R_{Df}/10} + \sum_F 10^{-R_{Ff}/10} + \frac{A_0}{S_s} \left(\sum_e 10^{-D_{n,e}/10} + \sum_s 10^{-D_{n,s}/10} \right) \right] \quad (J3.22)$$

Slično tome, energetskom sumom svih strukturnih putanja, za merodavnu vrednost normalizovanog nivoa zvuka udara u slučaju prostorija jedna iznad druge dobija se:

$$L'_n = 10 \log_{10} \left(10^{L_{n,d}/10} + \sum_f 10^{L_{n,Df}/10} \right), \quad (J3.23)$$

a u slučaju prostorija jedna pored druge:

$$L'_n = 10 \log_{10} \sum_j 10^{L_{n,Fj}/10}. \quad (J3.24)$$

U gornjim sumama članovi F i f označavaju sumiranje po svim bočnim pregradama (najčešće njih četiri) u predajnoj i prijemnoj prostoriji, respektivno, e po svim postojećim malim elementima na zajedničkoj pregradi, s po bočnim sistemima, a j po pregradama susednim podu u predajnoj prostoriji (najčešće zajednički zid i pod prijemne prostorije).

Laboratorijska i *in situ* strukturna vremena reverberacije pregrada, kao i indeks prenosa vibracija (K_{ij}), neophodni za proračun, još uvek su retko merene veličine o kojima postoji malo podataka u literaturi [Alba et al., 2007; Pedersen, 1995; Schneider et al., 2011; Schiavi et al., 2010]. Stoga se u praksi najčešće pribegava njihovom matematičkom proračunu. Za proračun strukturnih vremena reverberacije homogenih pregrada mogu se koristiti formule (J3.4) i (J3.5) u kojima implicitno, preko parametra α_k , figuriše i sam indeks prenosa vibracija na spojevima pregrade. Odatle sledi da proračun vrednosti strukturnih vremena reverberacije homogene pregrade iziskuje poznavanje vrednosti više fizičkih parametara koji je opisuju:

- dimenzije pregrade (l_k),
- površinska masa materijala (m'),
- frekvencija koincidencije (f_c),
- interni gubici u materijalu (η_{int}),
- indeksi prenosa vibracija (K_{ij}) svih spojeva pregrade.

Nažalost, osim dimenzija i površinske mase, vrednosti ostalih parametara najčešće nisu lako dostupne. Kao alternativa mogu se koristiti njihove vrednosti ili empirijske formule

za njihov proračun date u literaturi, pri čemu će tačnost proračuna izolacije onda zavisiti od saglasnosti usvojenih teorijskih vrednosti sa realnim. Tako, na primer, Aneks B EN 12354-1 nudi vrednosti osnovnih fizičkih parametara za najčešće korišćene materijale homogenih pregradnih konstrukcija (Tabela 3.2). Površinska masa materijala može se izračunati kao proizvod njegove gustine (ρ) i debljine (t), a frekvencija koinkidencije prema formuli (J3.3).

Tabela 3.2. Vrednosti osnovnih fizičkih parametara nekih materijala prema [EN 12354]

materijal	ρ [kg/m³]	c_L [m/s]	η_{int} [/]
beton	2300	3500	0,006
kalcijum-silikat	1750	2600	0,015
laki beton	1300	1700	0,015
porozni beton	650	1400	0,010

Za u opštem slučaju frekvencijski zavisne vrednosti indeksa prenosa vibracija, Aneks E norme EN 12354-1 navodi empirijske formule, prema kojima njegove vrednosti zavise od tipa spoja (kruti ili elastični, krstasti, T ili L-spoj), u kojima figurišu površinske mase pregrada koje čine spoj. Skorija, pak, merenja čiji su rezultati navedeni u literaturi, u značajnoj meri osporavaju tačnost ovih formula [Schneider et al., 2011; Schiavi et al., 2010] i uglavnom naglašavaju da empirijske formule daju nešto niže vrednosti indeksa od realnih [Schiavi et al., 2010; Crispin et al., 2004]. Za krute krstaste spojeve i krute T-spojeve masivnih homogenih pregrada (kao na primer betonskih zidova, zidova od cigle ili sitno rebrastih tavanica), ove razlike su oko 5 dB, zavisno od tipa pregrada, odnosa njihovih površinskih masa i putanje kroz spoj (prostiranje prema pregradi u nastavku spoja pokazuje veća odstupanja nego prostiranje ka susednoj normalnoj pregradi). Generalno, odstupanja mogu ići i do 10 dB, pa čak i više. U slučaju krutih L-spojeva, teorijske vrednosti variraju oko 3 dB ispod izmerenih [Barbatesi et al., 2007]. U literaturi je još manje podataka o elastičnim spojevima i spojevima lakih nehomogenih pregrada. Prema jednom istraživanju [Crispin et al., 2004], izračunate vrednosti indeksa prenosa vibracija elastičnih spojeva su u proseku nekoliko decibela ispod izmerenih.

Čak i laboratorijski izmerene vrednosti indeksa prenosa vibracija pokazuju značajne varijacije, sa standardnim devijacijama oko 2 dB. Zavisno od načina pobude

(čekić ili šejker) i pobuđene strane pregrade (unutrašnja ili spoljašnja), standardne devijacije mogu biti i znatno više. Na kraju, varijacije u vrednosti indeksa mogu nastati i kao posledica stvarne strukture spoja na terenu i loše izvedbe, što predstavlja dodatnu razliku u odnosu na teorijski idealizovan slučaj. U nekim istraživanjima [Gerretsen, 1979] se, takođe, navodi da odstupanja realnih vrednosti $\overline{D_{v,ij,situ}}$ od vrednosti proračunatih korišćenjem jednačine (J3.18b) i empirijskih formula za indeks prenosa vibracija imaju standardnu devijaciju 5 dB. Prema [Galbrun, 2008], međutim, srednja razlika nivoa brzine vibracija između pregrada prema jednačini (J3.18b) ima sistematsko odstupanje od oko 5 dB u odnosu na realne izmerene vrednosti.

Ukoliko se u praksi ne raspolaže ni vrednostima izolacije pregrada, Aneksima B standarda EN 12354-1 i EN 12354-2 ostavljena je mogućnost proračuna laboratorijskih vrednosti izolacione moći (R) i normalizovanog nivoa zvuka udara (L_n) masivnih, homogenih zidova i tavanica pravougaonog oblika prema formulama (J3.3)-(J3.7). Ipak, za to je potrebno poznavanje vrednosti istog skupa fizičkih parametara kao i u slučaju strukturnih vremena reverberacije. Konačno, iako su odgovarajućim standardima [ISO 140; ISO 10140] definisane procedure merenja normalizovanih zvučnih izolovanosti malih elemenata ($D_{n,e}$) i bočnih sistema ($D_{n,s}$), podataka o njihovim laboratorijskim i terenskim merenjima još uvek ima malo. Stoga su u Aneksu F EN 12354-1 i Aneksu D EN 12354-2 navedene formule za njihov proračun u tipičnim slučajevima u praksi, poput ventilacionih otvora na fasadnim zidovima, spuštenih tavanica i bočnih hodnika.

3.2.2. Proračun izolacije od spoljašnjeg vazdušnog zvuka

Za osnovni deskriptor zvučne izolacije fasadnih pregrada mogu se usvojiti građevinska izolaciona moć (R') pregrade ili standardizovana izolovanost (D_{nT}). Kako se spoljašnja buka najčešće meri na udaljenosti od 2 m od same fasade, standardizovana izolovanost fasada najčešće se izračunava kao $D_{2m,nT}$. Korišćenjem jednačina (J2.4), (J2.6) i (J2.7) dobija se veza između dva parametra:

$$D_{2m,nT} = R' + 10 \log_{10} \frac{V}{6T_0S} \text{ dB} + \Delta L_{fs}, \quad (\text{J3.25})$$

gde V označava zapreminu prijemne prostorije, S ukupnu površinu fasade, a dodatni faktor ΔL_{fs} razliku nivoa usled oblika fasade. Faktor ΔL_{fs} izražava dodatno slabljenje spoljašnjeg zvuka koje ne nastaje u samoj fasadnoj pregradi, već usled spoljašnje konfiguracije fasade. Za ravnu fasadu on iznosi 0 dB, dok za terasastu može iznositi i više decibela, zavisno od sposobnosti spoljašnje konstrukcije da služi kao dodatna barijera na putu spoljašnjeg zvuka ili eventualno dodatni apsorber ukoliko na fasadi postoje apsorbujući materijali. U zgradama sa fasadama sa balkonima, ΔL_{fs} najčešće ima vrednost 1-2 dB.

Pod fasadnim zidom podrazumeva se svaki zid prostorije okrenut ka spoljašnjoj sredini. U slučaju ugaonih prostorija, to može biti i više pregrada. Međutim, u praktičnim okolnostima na ukupnu izolaciju fasada od spoljašnjeg vazdušnog zvuka vrlo retko u značajnoj meri utiču izolacione moći pregrada, već je ona dominantno određena izolacionim karakteristikama dodatnih fasadnih elemenata, kao što su prozori, balkonska vrata, otvori za ventilaciju i slično. Stoga, primenom teorije složenih pregrada (pregrada koje se sastoje iz više elemenata različitih izolacionih karakteristika) [Kuttruff, 2007] i energetsom sumom uticaja svih fasadnih elemenata (uporediti sa jednačinom (J3.22)), dobija se sledeća formula za proračun izolacije fasade:

$$R' = -10 \log_{10} \left(\sum_i \frac{S_i}{S} 10^{-R_i/10} + \sum_e \frac{A_0}{S} 10^{-D_{n,e}/10} \right), \quad (\text{J3.26})$$

gde su sume date po svim fasadnim elementima i (zidovi, prozori, balkonska vrata...) površina S_i i izolacionih moći R_i i svim malim elementima e normalizovnih vrednosti izolovanosti $D_{n,e}$.

Kako je strukturni prenos spoljašnjeg vazdušnog zvuka kroz bočne zidove praktično uvek zanemarljiv kada fasadni zid sadrži dodatne elemente, on se u proračunima izolacije fasadnog zida skoro uvek može zanemariti. Jedini izuzetak su masivni fasadni zidovi bez dodatnih elemenata, kada se bočni prenos aproksimativno kompenzuje oduzimanjem 2 dB od laboratorijskih vrednosti izolacionih moći svih fasadnih pregrada.

3.2.3. Pojednostavljeni model

Do sada opisane procedure klasičnog modela koriste se za proračun frekvencijski zavisnih vrednosti zvučne izolacije u frekvencijskim podopsezima. To su po pravilu terčni ili oktavni frekvencijski podopsezi, iz kojih se jednobrojne merodavne vrednosti mogu zatim proračunati posebnim procedurama opisanim u [ISO 717; ISO 16717]. Sledeći klasičan pristup mogu se formulisati i skraćene matematičke procedure za direktan proračun jednobrojnih vrednosti izolacije. Ovo je tzv. pojednostavljeni model (eng. *simplified model*), nasuprot već opisanom detaljnom modelu (eng. *detailed model*). Matematičke formule pojednostavljenog modela u celini su bazirane na jednačinama detaljnog modela, sa tom razlikom što u njima figurišu jednobrojne, merodavne, odnosno širokopojasne vrednosti parametara, umesto skupova vrednosti u frekvencijskim podopsezima. Ulazni parametri pojednostavljenog proračuna stoga podrazumevaju merodavne vrednosti izolacionih moći (R_w umesto R), normalizovane izolovanosti ($D_{n,w}$ umesto D_n) i normalizovane nivoe zvuka udara ($L_{n,w}$ umesto L_n) građevinskih elemenata. Kao rezultati proračuna dobijaju se merodavne vrednosti građevinske izolacione moći (R'_w umesto R'), normalizovanog nivoa zvuka udara ($L'_{n,w}$ umesto L'_n) i standardizovane izolovanosti ($D_{2m,nT,w}$ umesto $D_{2m,nT}$). Štaviše, ulazne jednobrojne vrednosti mogu uključivati i neki od spektralnih korekcionih faktora opisanih u poglavlju 2.3.3. Isti korekcionni faktor će samim tim biti uključen i u dobijene izlazne merodavne vrednosti, pri čemu se podrazumeva da je i frekvencijski opseg u kom je računat korekcionni faktori ostao isti. Predikcija izolacije od vazdušnog zvuka i zvuka udara pojednostavljenim modelom takođe je uvrštena u evropsku normu EN 12354.

Skraćena procedura pojednostavljenog modela, međutim, podrazumeva i dodatne aproksimacije i ograničenja u odnosu na detaljni model. Ovaj model namenjen je prevashodno slučaju masivnih zajedničkih i bočnih pregrada i njegova tačnost u slučaju nehomogenih, lakih pregrada je smanjena. Glavno pojednostavljenje modela u odnosu na detaljni je u izražavanju gubitaka zvučne energije unutar pregrada, koji su u detaljnom modelu kvantifikovani faktorom ukupnih gubitaka, odnosno strukturnim vremenom reverberacije (jednačina (J3.5)). U pojednostavljenom modelu ovi parametri implicitno su uračunati samo aproksimativno i ne postoji distinkcija između

laboratorijskih i *in situ* vrednosti izolacionih moći i normalizovanih nivoa zvuka udara elemenata. Pojednostavljene jednačine (J3.14), (J3.19) i (J3.22) za izolaciju od vazdušnog zvuka imaju oblik:

$$R_{Dd,w} = R_{sep,w} + \Delta R_{Dd,w}, \quad (J3.27)$$

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f} \text{ dB i} \quad (J3.28)$$

$$R'_w = -10 \log_{10} \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_F 10^{-R_{Fd,w}/10} + \sum_f 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_F 10^{-R_{Ff,w}/10} \right], \quad (J3.29)$$

gde je l_f dužina spoja između pregrada i i j . Vrednosti indeksa prenosa vibracija K_{ij} , kao i srednje vrednosti *in situ* razlike nivoa brzine vibracija između pregrada $\overline{D_{v,ij,situ}}$ u detaljnom modelu mogu biti frekvencijski zavisne, pa se u pojednostavljenom modelu aproksimativno koristi vrednost indeksa prenosa vibracija na 500 Hz. Kako je u realnosti povećanje merodavne izolacione moći (ΔR_w) dve dodatne obloge na istoj putanji prenosa manji od sume njihovih dobitaka (ΔR) pojedinačno [СНП, 1978], $\Delta R_{Dd,w}$ i $\Delta R_{ij,w}$ u gornjim izrazima računaju se prema formuli:

$$\Delta R_{ij,w} = \begin{cases} \Delta R_{i,w} + \frac{\Delta R_{j,w}}{2}, & \Delta R_{i,w} \geq \Delta R_{j,w} \\ \Delta R_{j,w} + \frac{\Delta R_{i,w}}{2}, & \Delta R_{i,w} < \Delta R_{j,w} \end{cases}. \quad (J3.30)$$

Proračun izolacije od udarnog zvuka prema pojednostavljenom modelu još je svedeniji i važi samo za slučaj prostorija jedna iznad druge. Formula (J3.23) ima oblik:

$$L'_{n,w} = L_{n,w} - \Delta L_w + K, \quad (J3.31)$$

gde K predstavlja korekcionni faktor za bočni prenos. Njegova vrednost data je u [EN 12354] tabelarno i varira između 0 dB i 6 dB, a najveća je kada je masivna tavanica okružena mnogo lakšim bočnim pregradama. U slučaju pregrada približno jednakih površinskih masa ili masivnijih bočnih pregrada, korekcionni faktor ima vrednost 0 dB. Na kraju, detaljni i pojednostavljeni model imaju identičan oblik u slučaju proračuna izolacije fasada, sa tom razlikom što će u jednačinama (J3.25) i (J3.26) figurisati merodavne vrednosti parametara, odnosno R_w umesto R i $D_{n,w}$ umesto D_n .

Dodatna praktična prednost pojednostavljenih modela je da, zbog lakše

računarske implementacije, ne iziskuju primenu skupih specijalizovanih softvera, kao što je to najčešće slučaj sa detaljnim modelima. Međutim, podrazumevane aproksimacije i ograničenja mogu uzrokovati razlike u jednobrojnim vrednostima izolacije proračunatih detaljnim modelom i zatim ponderacijom prema procedurama ISO 717 i direktno pojednostavljenim klasičnim modelom.

3.2.4. Tačnost proračuna

Klasični modeli proračuna zvučne izolacije, detaljni i pojednostavljeni, izvedeni su pod nizom pretpostavki i praktičnih aproksimacija. Posledica toga je njihova ograničena tačnost, u smislu poklapanja izračunatih i realnih, izmerenih vrednosti izolacije u konkretnom slučaju. Uzroka za to ima više – nepreciznost ulaznih podataka, nesigurnost terenskih merenja, kao i stepen saglasnosti idealizovanog scenarija pri proračunima i realne situacije na terenu, koji zavisi od tačnosti uvedenih pretpostavki i aproksimacija modela i stvarne izvedbe pregrada, spojeva i ostalih elemenata u zgradi. Posebno značajan uticaj na tačnost proračuna imaju tačnost ulaznih podataka, ali i razlike u realizacijama spojeva između pregrada u praksi [Galbrun, 2008]. Svi navedeni uzroci mogu doprineti značajnijem smanjenju tačnosti rezultata proračuna, ali i otežavaju njenu generalnu procenu, posebno imajući u vidu da su međunarodni standardi sa opisanim procedurama proračuna aktuelni svega petnaestak godina, pa se potvrda njihove tačnosti u praksi još uvek očekuje.

U [EN 12354] dati su neki podaci o tačnosti propisanih modela za proračun zvučne izolacije u zgradama, koji se pre svega odnose na zgrade sa svim masivnim i homogenim pregradama od materijala poput betona, cigle, blokova i slično. Prema njima, odstupanja izračunatih jednobrojnih merodavnih vrednosti građevinske izolacione moći u odnosu na izmerene imaju standardnu devijaciju 1,5-2,5 dB, bez sistematskog odstupanja (sa srednjom vrednošću jednakoj nuli). Vrednost standardne devijacije pritom zavisi od poklapanja teorijskog modela i realnog slučaja. Izračunate vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara između prostorija sa zajedničkom tavanicom, za izolaciju od zvuka udara, takođe ne pokazuju sistematska odstupanja u odnosu na realne vrednosti i takođe imaju vrednost standardne devijacije oko 2 dB. Očekivana tačnost proračuna najmanja je pri proračunu izolacije od zvuka udara između

prostorija jedna pored druge, kada se osim standardne devijacije od 3 dB javljaju i sistematska odstupanja od 0 dB do čak 5 dB. Ovo se može objasniti odsustvom direktnog prenosa između predajne i prijemne prostorije i postojanjem samo bočnog strukturnog prenosa kroz spoj zajedničkog zida sa podovima predajne i prijemne prostorije. U takvim okolnostima smanjenog broja razmatranih putanja prostiranja zvuka između prostorija, svaka nesaglasnost teorijskog modela sa realnom situacijom može uzrokovati značajna odstupanja izračunatih vrednosti od realnih. Konačno, očekivana preciznost izračunatih jednobrojnih vrednosti izolacije fasadnih pregrada ima standardnu devijaciju oko 1,5 dB, a u pojedinačnim frekvencijskim podopsezima i do 3 dB. U svakom slučaju, pri izvršavanju proračuna, u standardima se preporučuje variranje vrednosti ulaznih parametara, posebno kod atipičnih scenarija i kompleksnijih situacija, kao i kada tačne vrednosti ulaznih podataka nisu unapred poznate. Variranje vrednosti ulaznih parametara uzrokuje varijacije jednobrojnih vrednosti dobijenih proračunom i omogućava uvid u moguću netačnost dobijenih rezultata.

Preciznija ocena tačnosti standardizovanih modela proračuna zvučne izolacije u različitim scenarijima očekuje se u budućnosti, sa omasovljenjem njihove primene i dodatnim proverama u različitim realnim okolnostima. Već sada postoje izvesni izveštaji u literaturi u vezi sa tačnošću opisanih modela proračuna zvučne izolacije. Prema jednom istraživanju [Metzen, 1999] koje uključuje 31 terensko merenje zvučne izolacije, pre svega masivnih zajedničkih i bočnih elemenata, detaljni model proračuna pokazuje uglavnom zadovoljavajuće poklapanje sa izmerenim vrednostima, uz standardnu devijaciju odstupanja koja iznosi oko 2 dB. Drugo istraživanje istog autora [Metzen, 2005] pokazuje da je tačnost predikcije veća u slučaju lakih pregrada i zgrada u kojima dominiraju lake, drvene konstrukcije. Pedersen [Pedersen, 1999], na osnovu više od 200 merenja, zaključuje da predikcije imaju zadovoljavajuću tačnost u slučaju vazdušnog zvuka, kao i zvuka udara između prostorija sa zajedničkom masivnom tavanicom. Drugi izveštaji u literaturi, međutim, govore o mogućim posledicama zanemarivanja bočnih putanja višeg reda (kroz više od jednog spoja) u zgradama po tačnost proračuna zvučne izolacije u njima i pojavu sistematske greške [Craik, 2001; Galbrun, 2008]. U njima se sugeriše i da veća tačnost predikcije konstatovana u ranijim slučajevima proračuna zapravo može biti posledica odstupanja

pogrešno pretpostavljenih vrednosti ulaznih parametara u odnosu na realne, a ne tačnosti teorijskih modela.

Prema navodima u EN 12354, tačnost pojednostavljenog modela proračuna izolacije može se smatrati približno jednakom tačnosti detaljnih modela u smislu standardne devijacije odstupanja izračunatih merodavnih vrednosti od realnih, uz eventualno u proseku nešto više vrednosti u slučaju pojednostavljenog modela. Pojednostavljeni model izolacije od vazdušnog zvuka ima netačnost standardne devijacije oko 2 dB i daje sistematski nešto više vrednosti građevinske izolacione moći od izmerenih. Tačnost pojednostavljenih proračuna izolacije od zvuka udara i izolacije fasada ima približno jednaku standardnu devijaciju od oko 2 dB. Metzen u svojoj analizi prevashodno masivnih pregrada [Metzen, 1999] takođe zaključuje da detaljni i pojednostavljeni model imaju približno jednaku tačnost. Nasuprot tome, druga istraživanja [Manuel, 2009] pokazuju da pojednostavljeni model generalno daje čak između 1 dB i 7 dB više jednobrojne vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka u odnosu na detaljni model. Kao mogući razlog navodi se nedovoljno tačna estimacija bočnog prenosa pojednostavljenim modelom. Ispitivanje razlika između detaljnog i pojednostavljenog modela ima poseban značaj s obzirom da se zbog svoje lakše realizacije i bržeg proračuna merodavnih vrednosti, pojednostavljeni model često koristi u praksi za predikciju izolacije u zgradama.

4. Monitoring vazdušne buke u domaćinstvima

Kao što je već navedeno u uvodnom poglavlju, pitanje zvučne izolacije u zgradama usko je povezano sa karakterizacijom buke u životnoj sredini, spoljašnje i unutrašnje. Proračun zvučne izolacije, ukoliko pretenduje da numerički izrazi subjektivan doživljaj smanjenja buke u životnoj sredini, odnosno ostvarenog akustičkog komfora, mora da uključi i kvantifikovanje buke od koje izolacija štiti potencijalno ugroženo stanovništvo. U suprotnom, dobijene vrednosti izolacije gube neophodnu korelisanost sa stvarnim subjektivnim doživljajem izolacije, a time i svoju konačnu svrhu, a to je predikcija moguće ugroženosti ljudi koji u zgradama borave bukom iz okruženja. Upravo to je glavni povod uvođenja spektralnih korekcionih faktora i referentnih spektara buke, opisanih u poglavlju 2.3.3 – prilagođenje izračunatih jednobrojnih vrednosti zvučne izolacije očekivanoj realnoj buci i njenom karakteru (u ovom slučaju spektralnom sadržaju), čime se povećava relevantnost dobijenih jednobrojnih vrednosti izolacije u realnim okolnostima. Stepen u kome će to biti postignuto zavisi od stanja stvarne buke na terenu u svakom konkretnom slučaju. U generalnom slučaju, monitoring realne buke na terenu pruža uvid u njene opšte akustičke karakteristike i tako predstavlja važan doprinos proveru tačnosti metoda ocene zvučne izolacije u realnim životnim okolnostima. U ovom radu razmatrana su dva tipa vazdušne buke – unutrašnja buka generisana tokom svakodnevnih životnih aktivnosti u domaćinstvima i buka drumskog saobraćaja (analizirana u sledećem poglavlju), kao najrasprostranjeniji vid spoljašnje buke u urbanim sredinama.

4.1. Snimanje i merenje buke u domaćinstvima

Za potrebe karakterizacije buke u zgradama, organizovan je niz snimanja vazdušne buke generisane tokom različitih životnih aktivnosti u domaćinstvima. Posmatrane su pre svega redovne, svakodnevne aktivnosti ljudi u domaćinstvima, ali i pojedini specifični, ekscesni događaji kao što su kućna okupljanja i zabave i većbanje muzičkih instrumenata. Pojedini izvori vazdušne buke pretežno impulsnog karaktera takođe su razmatrani, kao na primer udarci posuđem u kuhinji, ali ne i buka unutrašnjih instalacija i izvori strukturno generisane buke. Snimanja su izvršena u 29 domaćinstava

u različitim zgradama u Beogradu, u nameštenim stambenim prostorijama (dnevne sobe, trpezarije i kuhinje). Prostorije su različite veličine (zapremina od 31 m³ do 104 m³), većinom paralelopipednog oblika i opremljene uobičajenim nameštajem, pa je očekivan i uobičajen uticaj samih prostorija, pre svega njihovog oblika, ekvivalentne zvučne apsorpcije i difuznosti zvučnog polja u njima na izmerene signale buke. Vremena reverberacije prostorija variraju u opsegu od 0,5 s do 0,8 s. Merenja su vršena u jednoj tački u svakoj od prostorija. U skladu sa preporukama za merenje nivoa buke u zgradama [ISO 140], merni mikrofoni bili su postavljeni u dalekom polju dominantnih izvora buke i na udaljenosti većoj od 0,7 m od najbližih reflektujućih površina. Korišćena je frekvencija odmeravanja 48 kHz, sa rezolucijom 24 bita.

4.2. Spektar buke u domaćinstvima

Neposredni motiv za spektralnu analizu buke u domaćinstvima [Mašović et al., 2013 a] bio je poređenje oblika spektara uobičajenih izvora vazdušne buke u domaćinstvima sa standardizovanim referentnim spektrima – Spektar br. 1 i Spektar br. 2, odnosno *L_{living}* i *L_{traffic}* i *L_{speech}*. Kako je naglašeno u poglavlju 2.3.2, za validnu ocenu zvučne izolacije jednim brojem primenom referentne krive i spektralnih korekcionih faktora ili pak direktnim izračunavanjem jednobrojnih vrednosti preko referentnih spektara buke, neophodno je da usvojeni referentni spektri buke oblikom odgovaraju realnim spektrima buke u okruženju. U tom pogledu, sprovedena analiza oblika spektara realnih izvora buke u domaćinstvima treba da omogući kvalitetniju reprezentaciju unutrašnje buke i doprinese boljem kvantifikovanju zvučne izolacije unutrašnjih pregrada u zgradama jednobrojnim vrednostima u algoritmima za proračun izolacije.

4.2.1. Analizirane aktivnosti i izvori buke

U 29 domaćinstava u kojima je vršen monitoring buke, načinjeno je 38 snimaka buke generisane tokom različitih aktivnosti ljudi koji u njima borave, pri čemu su dodatno detektovani i izdvojeni najznačajniji izvori (generatori) buke i formirana baza

njihovih snimaka. Ukupno je izdvojeno 58 snimaka generatora buke i njihov prikaz prema aktivnosti tokom kojih su načinjeni dat je u Tabeli 4.1. Broj u zagradi pored naziva tipa aktivnosti označava broj snimaka generatora u formiranoj bazi koji su izdvojeni iz celokupnih snimaka te aktivnosti. Broj u zagradi pored naziva svakog pojedinačnog generatora buke označava broj snimaka u bazi u kojima se taj generator javlja. Pojedini generatori pojavljuju u više analiziranih aktivnosti, kao na primer glasan govor – tokom redovnih aktivnosti, kućnih okupljanja i kućnih zabava. Takođe, u pojedinim snimcima generatora istovremeno je aktivno više izvora buke, na primer pevanje i sviranje muzičkog instrumenta ili slušanje glasne muzike i usisavanje, pa broj detektovanih generatora buke tokom neke aktivnosti može biti i veći od broja snimaka generatora u bazi izdvojenih tokom te aktivnosti. Trajanje svakog izdvojenog snimka generatora u bazi zavisi od prirode generatora buke. U slučaju veoma kratkih signala (kašalj, kihanje, glasan smeh i sl.), ono je minimalno 1 s, dok u slučaju filma može biti i oko 2 h.

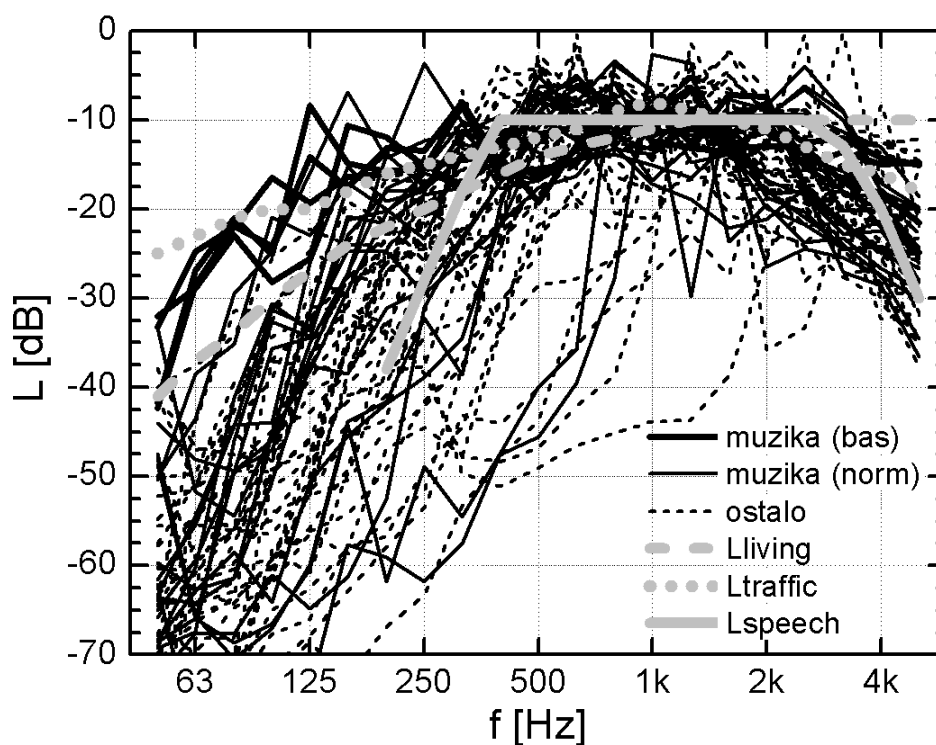
Tabela 4.1. Analizirani izvori buke u domaćinstvima

tip aktivnosti	oznaka	izvori buke
vežbanje muzike (11)	PM	violina (3), klavijature (1), pevanje (3), akustična gitara (2), električna gitara (4)
kućni poslovi (6)	HW	usisivač (4), usisivač sa vodenim filtrom (1), pumpa za dušek (1), glasna muzika (1)
redovne aktivnosti (8)	RA	kašalj (2), kihanje (1), telefonsko zvono (1), normalan govor (2), povišen govor (1), glasan govor (1)
gledanje TV (6)	TV	TV sitkom (1), TV reklame (1), film (2), opera (2)
kućno okupljanje (14)	HG	glasnan govor (3), glasan smeh (5), vika (1), tapšanje (2), vika dece (2), dečji vrisak (2)
obrok (3)	ML	posuđe (3)
kućna zabava (7)	HP	pevanje (3), akustična gitara (3), žamor (3), nazdravljanje (1), glasan govor (1)
kućni ljubimac (1)	PT	papagaj (1)
slušanje muzike (2)	LM	glasna muzika (2)

4.2.2. Rezultati

Kako su referentni spektri definisani u proširenom frekvencijskom opsegu, spektralna analiza vršena je u tercnim frekvencijskim podopsezima od 50 Hz do

5000 Hz. Radi poređenja sa referentnim spektrima L_{living} , $L_{traffic}$ i L_{speech} , spektri svih analiziranih generatora su A-ponderisani i normalizovani, tako da im je ukupna energija jednaka 0 dB. Svih 58 normalizovanih i ponderisanih spektara prikazano je na Slici 4.1. Kako se glasna muzika smatra glavnim uzrokom ugroženosti unutrašnjom bukom u zgradama na niskim frekvencijama, spektri signala u kojima je zastupljen neki oblik muzičkog sadržaja (reprodukovana, svirana ili pevana muzika) dati su na grafiku tamnim punim linijama, dok su ostali izvori prikazani isprekidanim linijama. Četiri detektovana spektra muzike sa posebno visokim nivoima na niskim frekvencijama, snimljeni tokom slušanja muzike preko kućnih audio sistema sa uključenim *sub-woofer* zvučnikom, prikazani su nešto debljim punim linijama. Radi poređenja, tri standardizovana referentna spektra predstavljena su sivim linijama – L_{living} isprekidanom, $L_{traffic}$ tačkastom i L_{speech} punom linijom.



Slika 4.1. Tercni spektri svih detektovanih generatora buke u domaćinstvima

Sa slike je evidentno da su u gornjem delu grafika, pre svega na niskim frekvencijama ispod 250 Hz, dominantno zastupljeni signali muzike, dok ostali analizirani izvori proizvode znatno uže A-ponderisane spektre buke. Poređenjem sa referentnim spektrima može se konstatovati da se većina izmerenih spektara nalazi

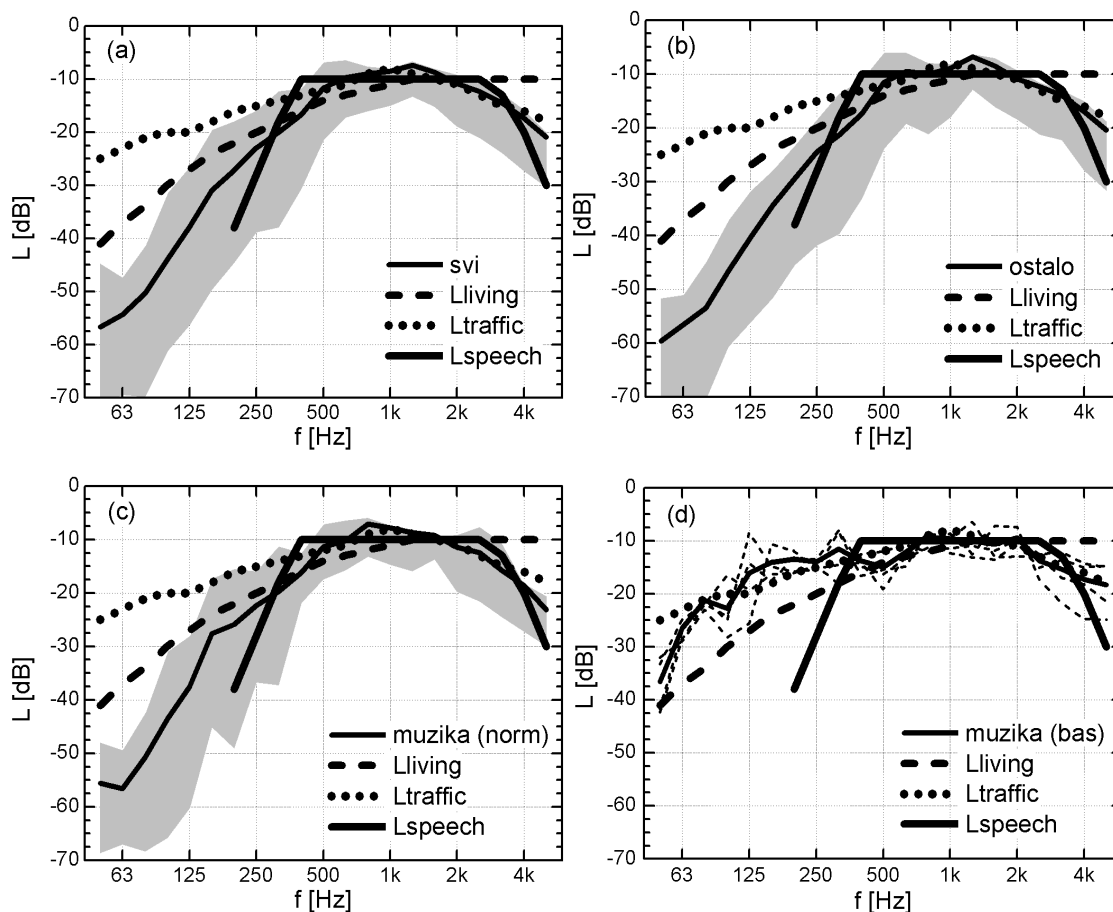
između krivih L_{living} i L_{speech} , a znatan broj i ispod L_{speech} krive. Radi lakšeg uvida u oblike spektara buke u domaćinstvima tipične za različite vrste generatora buke, Slika 4.2. prikazuje usrednjene izmerene spektre i poredi ih sa tri propisana referentna spektra. Iz celokupnog skupa analiziranih generatora buke, izdvojena su četiri podskupa – skup svih 58 izdvojenih generatora (a), podskup 37 generatora nemuzičkih signala (b), 17 generatora standardnih muzičkih signala bez naglašanih niskih frekvencija (c) i 4 generatora muzičkih signala sa posebno visokim nivoima na niskim frekvencijama (d). Sive površine na graficima (a)-(c) označavaju normalizovani opseg vrednosti jednu vrednost standardne devijacije iznad i ispod srednjih vrednosti. Drugim rečima, osenčene oblasti predstavljaju očekivane 66%-ne intervale poverenja iznad i ispod kojih se nalazi po 17% svih izmerenih vrednosti. S obzirom na mali broj snimljenih signala, tanke isprekidane linije na grafiku (d) predstavljaju sva četiri izmerena spektra muzike sa naglašenim sadržajem na niskim frekvencijama.

I sa ovih grafika potvrđuje se da većina analiziranih izvora buke u domaćinstvima proizvodi spektar buke koji oblikom pripada između L_{speech} i L_{living} referentnih spektara. Ovaj zaključak stoji nasuprot tvrdnji u [ISO 717] da spektri većine izvora buke u životnoj sredini imaju oblik između L_{living} i $L_{traffic}$. Svi usrednjeni grafici buke na Slici 4.2. (a)-(c) imaju sličan oblik, sa vrednostima značajno ispod krive L_{living} na niskim frekvencijama ispod 250 Hz i visokim frekvencijama iznad 2000 Hz. Na veoma niskim frekvencijama, ispod 125 Hz, L_{living} nadmašuje čak i 66%-ne intervale sigurnosti. Pojedini generatori u ovim podskupovima sa izraženim impulsnim karakterom, poput udaraca kuhinjskim posuđem, mogu emitovati spektar sličniji referentnom spektru L_{living} , ali samo u veoma kratkim vremenskim intervalima.

4.2.3. Diskusija

Nakon uvida u oblike spektara pojedinačnih analiziranih generatora buke u domaćinstvima može se izvršiti detaljnija kategorizacija generatora prema obliku spektra buke koju oni proizvode. Rezultati takve analize dati su u Tabeli 4.2, koja pokazuje sličnost oblika pojedinačnih izmerenih spektara buke i referentnih spektara L_{living} i $L_{traffic}$. Praktično svi snimljeni spektri iznad krive L_{living} u delu opsega ispod 250 Hz potiču od signala muzike u nekom obliku – svirane na električnim muzičkim

instrumentima ili reprodukovane kućnim audio sistemima. Nasuprot tome, sviranje na klasičnim muzičkim instrumentima u najvećem broju slučajeva produkuje usrednjeni spektar sličnog oblika kao uobičajeni, nemuzički izvori buke u domaćinstvima. Ipak, podrazumeva se da spektar muzičkih signala u opštem slučaju zavisi od njihovog tonalnog sadržaja i boje instrumenta.



Slika 4.2. Usrednjeni spektri buke: (a) svi izdvojeni generatori, (b) generatori nemuzičkih signala, (c) muzika u normalnim okolnostima (bez istaknutih niskih frekvencija) i (d) muzika sa visokim nivoima na niskim frekvencijama

S obzirom da se spektar $L_{traffic}$ (po još uvek aktuelnoj nomenklaturi – Spektar br. 2) u pojedinim evropskim zemljama koristi i za kvantifikovanje izolacije unutrašnjih elemenata u zgradama, treba napomenuti da iz dobijenih rezultata sledi da u normalnim okolnostima isključivo muzika reprodukovana preko kućnih audio sistema sa *subwoofer* jedinicom može proizvesti normalizovan A-ponderisan spektar sličnih vrednosti

spektru $L_{traffic}$, pa čak i tada u najvećem broju slučajeva sa izraženijim padom ispod 100 Hz i do 10 dB nižim vrednostima u tercnom podopsegu na 50 Hz. Odatle sledi da čak ni većina uobičajenih kućnih audio uređaja nema dovoljno širok frekvencijski odziv kojim se može proizvesti blaži pad A-ponderisanog spektra prema niskim frekvencijama, čime bi se opravdalo korišćenje spektra $L_{traffic}$ za unutrašnju buku. U skladu sa tim, čini se da A-ponderisan spektar saobraćajne buke u proširenom opsegu nije adekvatan reprezent ni glasne muzike u domaćinstvima sa izraženim niskofrekvencijskim komponentama.

Tabela 4.2. Sličnost oblika izmerenih spektara buke u domaćinstvima i referentnih spektara

referentni spektar	generatori buke
$L_{traffic}$	glasna muzika (audio uređaji, klavijature, kućni bioskop) sa naglašenim niskim frekvencijama
između L_{living} i $L_{traffic}$	opera (kućni bioskop), električna gitara
L_{living}	muzika i opera na TV, posuđe
između L_{speech} i L_{living}	povišen muški govor, žamor, pevanje, TV (reklame, film, sitkom), kašalj
L_{speech}	povišen govor, vrisak, ovacije, kijanje, violina, usisivač
ispod L_{speech}	žensko pevanje, dečja vika i vrisak, telefonsko zvono, papagaj

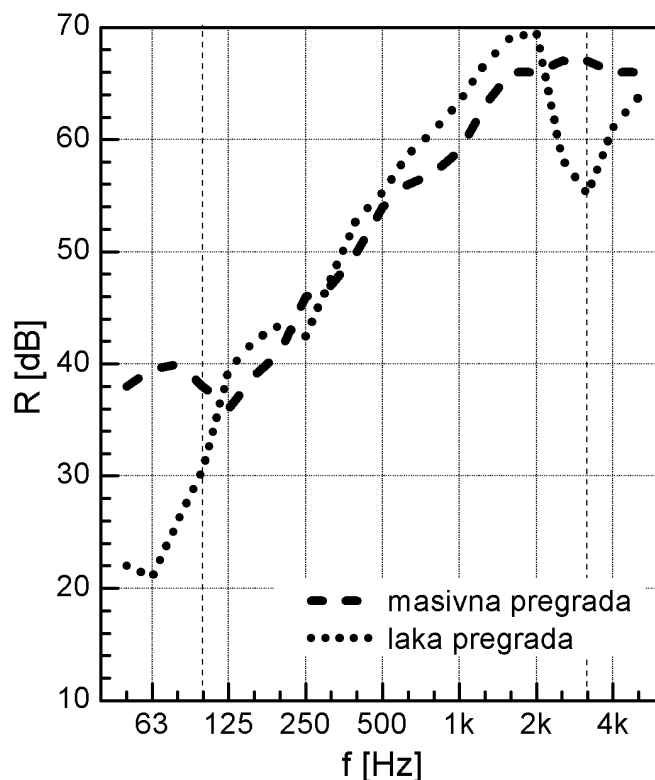
U kontekstu značaja zvučne izolacije na niskim frekvencijama na opšti doživljaj akustičkog komfora koji joj se pridaje u novijoj literaturi i predlozima standarda iz oblasti građevinske akustike i prisutnoj tendenciji proširenja frekvencijskog opsega u kom se zvučna izolacija meri i tretira, treba naglasiti da čak i izmereni spektri koji su u većem delu frekvencijskog opsega po obliku slični referentnim spektrima L_{living} i $L_{traffic}$ pokazuju brži pad ka najnižim frekvencijama proširenog spektra ispod 100 Hz od dva referentna spektra. Kao posledica precenjenih vrednosti referentnih spektara u ovom delu frekvencijskog opsega mogu se očekivati niže izračunate jednobrojne vrednosti deskriptora izolacije, koje ne odgovaraju realnim spektrima buke, a time ni subjektivnom doživljaju izolacije.

Varijacije vrednosti referentnih spektara u pojedinim frekvencijskim podopsezima, zavisno od oblika krive izolacione moći, mogu značajno uticati na izračunate jednobrojne vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka. To se različito

manifestuje kod homogenih masivnih i složenih gipsanih pregrada, koje generalno imaju međusobno značajno različite frekvencijske izolacione karakteristike. Dok masivne pregrade pokazuju znatno ujednačenije vrednosti izolacije po tercama i ravniju krivu izolacione moći, lake gipsane pregrade najčešće imaju veoma izražen pad izolacione moći prema niskim frekvencijama. Radi procene razlika dobijenih jednobrojnih vrednosti zvučne izolacije koje mogu nastati izborom drugačijih oblika referentnih spektara, nekoliko jednobrojnih deskriptora izolacije izračunato je za dva tipična oblika krivih izolacionih moći masivne i lake pregrade, prikazana na Slici 4.3, na sličan način kao u [Monteiro et al., 2012]. U Tabeli 4.3 navedene su izračunate vrednosti jednobrojnih parametara za obe analizirane pregrade i to:

- merodavna izolaciona moć (R_w) u osnovnom frekvencijskom opsegu od 100 Hz do 3150 Hz, takođe sa dodatim korekcionim faktorima ($R_w + C$, $R_w + C_{tr}$),
- R_{living} , $R_{traffic}$ i R_{speech} i
- jednobrojne vrednosti izračunate korišćenjem formule (J2.14), ali uz primenu usrednjenih krivih izmerenih spektara signala buke u domaćinstvima sa Slike 4.2 kao referentnih spektara L_i i to: R_{avg} – svi analizirani generatori buke, $R_{non-music}$ – generatori nemuzičkih signala, R_{music} – uobičajeni generatori muzičkih signala, R_{bass} – generatori muzičkih signala sa izraženim sadržajem na niskim frekvencijama.

Razlike vrednosti izolacionih moći dve analizirane pregrade jednakih merodavnih vrednosti R_w su male u većini tercnih frekvencijskih podopsega između 100 Hz i 3150 Hz, pa su i razlike između standardnih jednobrojnih parametara definisanih u osnovnom frekvencijskom opsegu male (do maksimalno 2 dB u slučaju $R_w + C_{tr}$). Nasuprot tome, jednobrojne vrednosti u proširenom frekvencijskom opsegu značajno se razlikuju iako referentni spektri zadržavaju identičan oblik u osnovnom opsegu. Kako obe pregrade imaju visoke vrednosti izolacije na frekvencijama iznad 3150 Hz, sledi da je povećanje razlika posledica uključivanja tercnih podopsega ispod 100 Hz, u kojima izolaciona karakteristika masivne pregrade ima značajno više vrednosti od izolacione moći lake pregrade. Kao rezultat, masivna pregrada ima oko 3 dB višu vrednost R_{living} i čak preko 8 dB višu vrednost $R_{traffic}$.



Slika 4.3. Primer izolacionih karakteristika masivne i lake pregrade jednakih merodavnih vrednosti izolacione moći ($R_w = 56$ dB)

Tabela 4.3. Vrednosti jednobrojnih parametara zvučne izolacije dobijenih korišćenjem različitih procedura i referentnih spektara buke

pregrada	R_w	$R_w + C$	$R_w + C_{tr}$	R_{living}	$R_{traffic}$	R_{speech}	R_{avg}	$R_{non-music}$	R_{music}	R_{bass}
masivna	56	54	50	54.9	48.8	56.1	57.0	57.7	55.3	47.0
laka	56	54	48	51.8	40.2	57.5	57.9	58.7	56.1	42.7

Prethodni rezultati pokazuju da vrednosti referentnih spektara vazdušne buke na frekvencijama ispod 100 Hz mogu imati odlučujući uticaj na izračunate jednobrojne vrednosti izolacije. Stoga je od ključne važnosti da primenjeni referentni spektar po obliku u što većoj meri odgovara spektru očekivane realne buke, posebno u najnižem delu opsega gde pregrade pokazuju pad vrednosti izolacionih moći i velike međusobne razlike. Prateći takav pristup, izmereni spektri buke u domaćinstvima mogu se iskoristiti za proračun jednobrojnih vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka. Tako, na primer, kada se umesto referentnih spektara u proširenom frekvencijskom opsegu koriste usrednjeni izmereni spektri buke u domaćinstvima prikazani na Slici 4.2, razlike jednobrojnih

vrednosti parametara postaju minimalne, do svega 1 dB, približno kao u slučaju neproširenog frekvencijskog opsega. Izuzetak je kriva muzičkih signala sa naglašenim niskofrekvencijskim sadržajem kada razlika iznosi oko 4 dB, ali je i dalje značajno manja od razlike dobijene korišćenjem referentnog spektra $L_{traffic}$.

4.2.4. Zaključci

Referentni spektar L_{living} , iako namenjen proračunu jednobrojnih vrednosti zvučne izolacije u prisustvu buke generisane tokom normalnih životnih aktivnosti i definisan u proširenom spektru kao tipičan oblik spektra buke generisane u domaćinstvima, ima više vrednosti na niskim frekvencijama u poređenju sa izmerenim spektrima buke u domaćinstvima, posebno ispod 100 Hz. Analize tipičnih generatora buke u domaćinstvima pokazuju da ovo važi čak i za većinu izvora muzičkih signala, osim onih sa dominantno izraženim nivoima na niskim frekvencijama, poput kućnih audio sistema opremljenih *sub-woofer* zvučničkom jedinicom. U tom slučaju, međutim, referentni spektar $L_{traffic}$ predstavlja adekvatniji reprezent, ali ponovo samo iznad 100 Hz. Prema prikazanim rezultatima, nijedan od referentnih spektara ne reprezentuje dobro vazдушnu buku u domaćinstvima na niskim frekvencijama, budući da imaju znatno više vrednosti u najnižim tercnim frekvencijskim podopsezima. Sa druge strane, mnogi analizirani spektri buke premašuju sva tri referentna spektra u opsegu srednjih frekvencija. To upućuje na zaključak da su A-ponderisani spektri buke generisane u domaćinstvima većinom uski, sa zvučnom energijom dominantno koncentrisanom u središnjem delu frekvencijskog opsega. U skladu sa tim, propisani referentni spektri buke moraju se pažljivo razmotriti pre korišćenja za izračunavanje jednobrojne vrednosti izolacije unutrašnjih pregrada od vazdušnog zvuka, ukoliko se teži njenoj korelisanosti sa subjektivnim doživljajem akustičkog komfora u slučaju uobičajenih izvora buke u domaćinstvima. Odabrani referentni spektar mora oblikom biti što bliži realnom spektru buke. Za odgovarajuće tipove izvora buke mogu se koristiti izmereni spektri buke poput onih datih na Slici 4.2.

4.3. Analiza impulsnog karaktera buke u domaćinstvima

Realna buka u životnoj sredini uvek sadrži neke impulsne zvučne pojave. Njih karakteriše pojava naglih kratkovremenih povećanja zvučne energije, to jest postojanje izraženih brzih promena nivoa zvuka u vremenu. Postoje i okolnosti u kojima buka ima dominantno impulsni karakter. Sve impulsne pojave nesumnjivo imaju uticaja na stanje akustičkog komfora, jer one na specifičan način deluju na ljude povećavajući efekat uznemiravanja.

U prisustvu impulsnih pojava uticaj buke u zgradama ne može se adekvatno reprezentovati samo dugovremenim deskriptorima, poput ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska u vremenskom domenu ili dugovremenskog spektra u frekvencijskom domenu. Međutim, još uvek ne postoji neki opšte prihvaćeni dodatni kvantifikator kojim bi se opisao uticaj impulsnih pojava na stanje akustičkog komfora. Za slučaj komunalne buke rešenje za to nađeno je u korekcijama koje se uvode pri određivanju merodavne vrednosti nivoa zvučnog pritiska. Prema ISO 1996-1:2003, koji definiše postupke merenja buke u životnoj sredini, postojanje impulsnih zvučnih pojava pri merenju povlači korekciju izmerene vrednosti. Ovakav stav zasnovan je na istraživanjima uticaja saobraćajne buke na uznemiravanje ljudi. Tako standard preporučuje da se pri oceni stanja izmerena vrednost uvećava za 5 dB u slučaju “obične” impulsivnosti (*regular impulsive*) i čak 12 dB ako je buka visoke impulsivnosti (*highly impulsive*). Ovakva korekcija je u standardu data posebnim aneksom i predstavlja samo preporuku, i bez preciznijih naznaka kako da se izvrši klasifikacija.

Nesumnjivo je da impulsne zvučne pojave postoje i kada je u pitanju buka u domaćinstvima. Pojedini pojavni oblici zvukova u stanovima, poput udaraca kuhinjskim posuđem, kašlja, kijanja, vike dece, sviranja muzičkih instrumenata, udaranja alatom tokom kućnih popravki i slično, imaju sve odlike impulsne buke. Zbog toga impulsivnost buke u stanovima mora na neki način imati posledice i u oceni stanja zvučne izolacije kojom se postiže zahtevani akustički komfor. Početni korak u tome je da se sagleda i kvantifikuje impulsivnost različitih bučnih aktivnosti u domaćinstvima i takav rezultat nekako uključi u procedure ocene stanja zvučne izolacije.

Povod za razmatranje impulsivnosti buke u domaćinstvima je postojanje opisanog modela za korekciju izmerenog ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska

komunalne buke kada ona ispoljava impulsni karakter. U slučaju buke u zgradama, a to znači i buke od komšija, do sada nije predlagana neka standardizovana korekcija za ocenu stanja zvučne izolacije u stambenim zgradama zbog impulsne prirode zvukova koji se pojavljuju. Posebno značajna posledica toga je i da su kriterijumi za izolaciju unutrašnjih pregrada od vazdušnog zvuka zasnovani isključivo na pretpostavljenim ekvivalentnim nivoima buke u susednim prostorijama, a to znači dugovremenim usrednjavanjem zvučne energije. Detaljnije poznavanje impulsivnosti buke u stanovima treba, između ostalog, da pokaže eventualnu potrebu da se minimalni kriterijumi zvučne izolacije za pregradne konstrukcije u zgradama redefinišu imajući u vidu postojanje impulsnih pojava čiji nivo u trenucima značajno premašuje vrednost ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska.

Iako nesumnjivo mora imati uticaja na subjektivni doživljaj buke od suseda, posebno tokom perioda noći, impulsni karakter vazdušne buke u domaćinstvima nije razmatran u literaturi. Zbog toga je izvršena eksperimentalna analiza impulsivnosti buke u stanovima pri uobičajenim kućnim aktivnostima i određeni su svi raspoloživi indikatori impulsivnosti.

4.3.1. Analiza kućnih aktivnosti i dominantni izvori impulsne buke

Osnovna ideja ove analize je kvantifikovanje impulsivnosti vazdušne buke u domaćinstvima generisane tokom uobičajenih aktivnosti i ocena njihovog značaja u kontekstu zvučne izolacije između stanova. Za takvu analizu korišćena je ista baza snimaka svakodnevnih aktivnosti u domaćinstvima kao za spektralnu analizu opisanu u prethodnom poglavlju. Za te potrebe baza je proširena sa još četiri snimka napravljena u istim domaćinstvima i pod istim uslovima snimanja. Tako se baza zapisa buke u domaćinstvima sastojala od ukupno 42 audio snimka raznih kućnih aktivnosti. Oni predstavljaju zvučnu sliku manje ili više bučnih događaja u stanovima tokom kojih se generišu nivoi buke koji mogu biti potencijalno ometajući za okruženje. Svi ti snimci navedeni su u Tabeli 4.4. Za svaki od njih u tabeli je naveden skraćeni nazivi (šifra) koji je radi jednostavnijeg i kraćeg označavanja korišćen u prikazu rezultata, ukupno trajanje snimka u sekundama, kao i specifikacija uočenih dominantnih generatora zvuka koji su postojali u stanu.

Tabela 4.4. Snimci aktivnosti i dominantni generatori buke

br.	oznaka	trajanje (s)	dominantni generatori
1.	HG1	7157	govor
2.	HG2	4393	akustična gitara, pevanje, govor
3.	HG3	6363	govor, muzika
4.	HG4	1017	govor, muzika
5.	HG5	1471	deca, govor
6.	HP1	13777	žamor, govor
7.	HP2	3952	žamor, govor
8.	HP3	249	žamor, govor
9.	HP4	8608	žamor, govor, muzika
10.	HP5	4975	žamor, govor
11.	HW1	810	usisivač (sa vodenim filtrom)
12.	HW2	2199	TV
13.	HW3	1744	usisivač
14.	HW4	4091	mašina za veš
15.	HW5	807	usisivač
16.	HW6	137	pumpa za dušek
17.	HW7	294	usisivač
18.	HW8	652	usisivač, govor
19.	LM1	2299	radio, TV
20.	LM2	888	muzika, usisivač
21.	LM3	7832	muzika
22.	ML1	1575	posuđe, govor, TV, mašina za pranje sudova
23.	ML2	1928	posuđe, govor
24.	ML3	811	posuđe
25.	ML4	2278	posuđe, govor
26.	PM1	2368	sviranje violine
27.	PM2	3366	sviranje elektronske klavijature
28.	PM3	1608	pevanje, sviranje akustične gitare
29.	PM4	2544	pevanje, sviranje klavira, govor
30.	PM5	8905	električna gitara, akustična gitara, muzika
31.	PM6	2641	električna gitara
32.	PM7	791	violina
33.	PT1	53	papagaj, muzika
34.	RA1	1649	govor, TV, posuđe, kijanje
35.	RA2	653	govor
36.	RA3	491	TV, zvono telefona
37.	RA4	2572	govor
38.	TV1	1824	TV (fudbal, reklame, muzika), govor
39.	TV2	1252	TV
40.	TV3	2698	TV (film)
41.	TV4	8232	TV (film)
42.	TV5	5698	TV (opera), govor

Pored dominantnih izvora buke, pažljivim proučavanjem snimaka uočeno je da značajan broj snimaka aktivnosti sadrži i dodatne, nedominantne izvore buke pretežno impulsnog karaktera. Njihovo prisustvo svakako doprinosi sveukupnoj impulsivnosti generisane buke i može uticati na vrednosti analiziranih deskriptora date u nastavku u slučaju vremenski stacionarnijih dominantnih izvora. Posledično, njihova eventualna prisutnost u opštem slučaju otežava karakterisanje aktivnosti u pogledu impulsivnosti buke isključivo prema njenom tipu. U Tabeli 4.5 su navedeni prepoznati sporadični generatori impulsnih zvukova i tipovi kućnih aktivnosti u kojima su oni registrovani. U poslednjoj koloni tabele navedene su oznake snimaka iz baze u kojima su uočeni.

Tabela 4.5. Dodatni izvori potencijalno impulsne buke

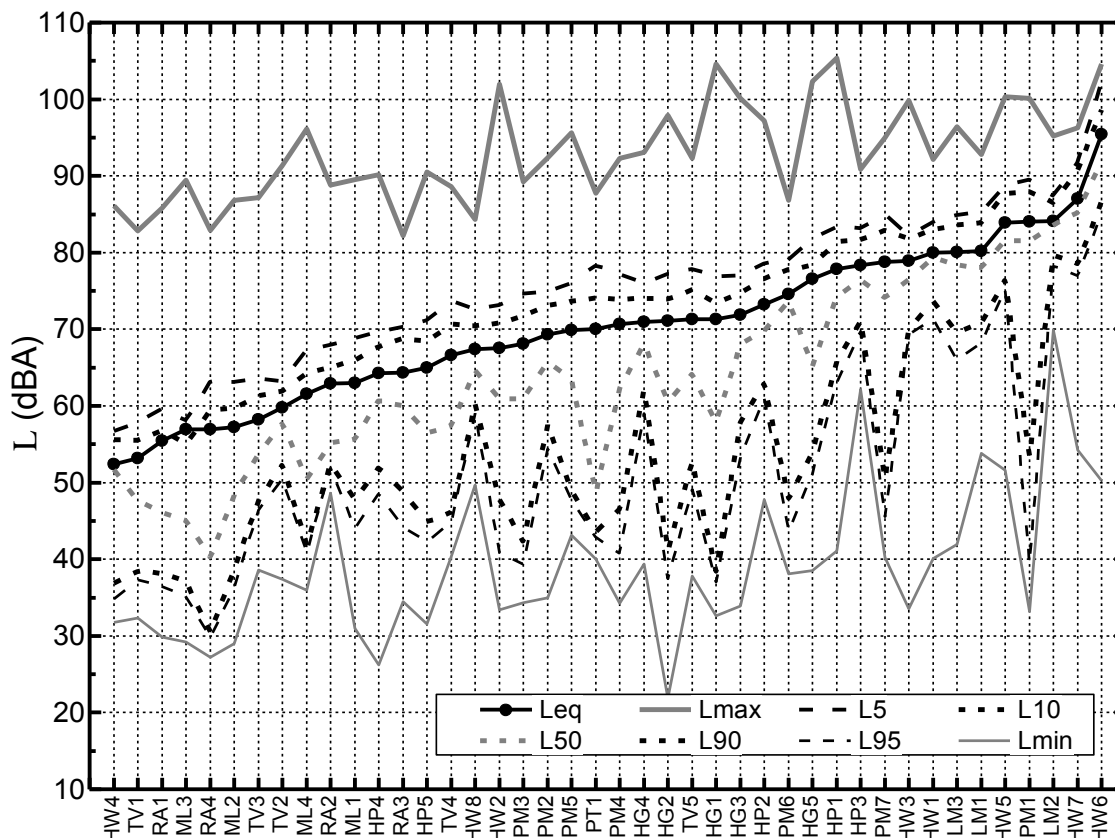
aktivnosti	tipični izvori impulsnog zvuka	šifra snimaka
kućni poslovi (HW)	nameštaj (vrata, fioke, stolice), predmeti (posuđe), sitne kućne popravke (alat)	HW2, HW3, HW4
kućno okupljanje (HG), kućna zabava (HP)	glasani smeh, vika, tapšanje, nameštaj, posuđe	HG1, HG3, HG4, HP2
redovne aktivnosti (RA), obrok (ML), gledanje TV programa (TV)	nameštaj (vrata, fioke, stolice), razni predmeti	RA2, ML1, ML2, TV1, TV2, TV3

4.3.2. Rezultati analize standardnih deskriptora buke

Kako bi se detektovale kratkotrajne impulsne zvučne pojave, u snimcima su analizirane kratkovremene promene A-ponderisanog nivoa zvuka. Pri tome je korišćena kratka vremenska ponderacija sa periodom integracije 10 ms. Nad svakim snimkom je izvršena statistička obrada dobijenih vremenski promenljivih vrednosti nivoa tokom celokupnog trajanja signala. Tako je izvršeno izračunavanje svih standardnih deskriptora buke: L_{eq} , L_{max} , L_5 , L_{10} , L_{50} , L_{90} , L_{95} , i L_{min} .

Dobijene vrednosti ovih deskriptora buke za sve snimljene aktivnosti u stanovima prikazane su grafički na Slici 4.4. Aktivnosti su označene šiframa navedenim u drugoj koloni Tabele 4.4. Duž apscisne ose snimci su poredani prema rastućem redosledu vrednosti ekvivalentnog nivoa zvuka L_{eq} izračunatom tokom čitavog trajanja

aktivnosti, to jest snimka. Pojedinačne vrednosti svakog od deskriptora spojene su linijom da bi se olakšala vizuelna percepcija. Tako su dobijene krive prikazane na slici.



Slika 4.4. Vrednosti standardnih deskriptora buke analiziranih aktivnosti; aktivnosti su poredane prema rastućem redosledu vrednosti ekvivalentnog nivoa zvuka L_{eq}

Najviši izmereni nivoi buke, za koje je vrednost L_{eq} preko 80 dB i koje se nalaze na desnom kraju dijagrama sa Slike 4.4, generisani su tokom aktivnosti u kojima su korišćeni usisivač (HW5, HW7), električna pumpa za dušek (HW6), u kojima je slušana glasna muzika (LM1, LM2, LM3) ili je svirano na nekom muzičkom instrumentu (PM1). Na drugom kraju skale izmerenih vrednosti, to jest na levom kraju dijagrama sa Slike 4.4, nalaze se uglavnom aktivnosti za koje je L_{eq} u proseku manje od 60 dBA. To su tihi razgovori (RA1, RA4), gledanje televizije (TV1, TV2, TV3) i porodični obroci (ML2, ML3).

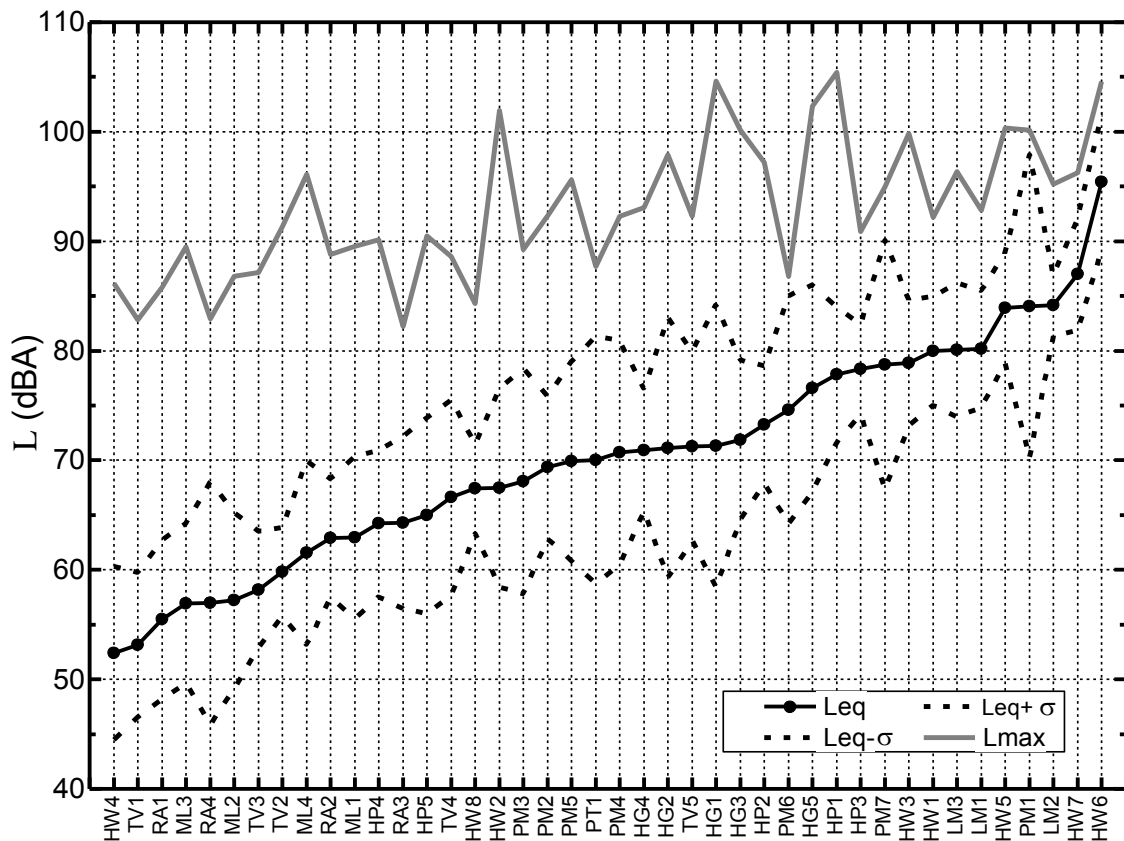
Sa dijagrama se vidi da je u 7 od 42 snimljene aktivnosti ekvivalentni nivo buke za čitav interval njenog trajanja premašuje vrednost 80 dBA. To čini oko 17% ukupnog

broja analiziranih aktivnosti. Činjenica je da se neke od tih okolnosti, poput glasnog slušanja muzike mogu svrstati u ekstremno ponašanje stanara, međutim, granica “normalno” bučnih aktivnosti od 80 dB premašena je i u slučaju npr. usisavanja. U okolnostima kada je granica očekivanog ekvivalentnog nivoa buke u stanovima pri normalnom koršćenju postavljena na 70 dB, rezultati sa Slike 4.4 pokazuju da je jedna velika grupa uobičajenih aktivnosti u stanovima (22 snimka, što je oko 52%) stavljena u kategoriju „ekscenog” ponašanja. To implicira ili pitanje redefinisanja usvojenih graničnih vrednosti buke za koje su utvrđeni kriterijumi zvučne izolacije u zgradama, ili prihvatanje činjenice da život u tako dimenzionisanim zgradama neizbežno podrazumeva pojavu čujnosti suseda.

Za sve analizirane aktivnosti određena je i vrednost standardne devijacije (σ) izmerenih kratkovremenskih vrednosti nivoa zvučnog pritiska oko vrednosti L_{eq} . Na Slici 4.5 prikazane su krive $L_{eq} + \sigma$ i $L_{eq} - \sigma$. Na dijagramu su takođe ucrtane vrednosti L_{max} . Srednja vrednost standardne devijacije za sve analizirane signale iznosi približno 7,5 dB. Premda standardna devijacija pruža uvid u prosečne vremenske oscilacije trenutnog nivoa u odnosu na njegovu srednju vrednost, ona ipak ne prikazuje učestanost pojave impulsa i realne vršne vrednosti nivoa koje oni dostižu.

4.3.3. Analiza deskriptora impulsivnosti buke

Jedan mogući pristup kvantifikovanju impulsivnosti buke je oduzimanjem vrednosti L_{eq} od vrednosti standardnih deskriptora, kako bi se anulirao uticaj prosečnog apsolutnog nivoa i tako kvantifikovale samo vremenske varijacije nivoa zvuka. Vrednosti kvantila L_5 i L_{10} sa Slike 4.4 dobro su korelisane (vrednosti Pirsonovih koeficijenata korelacije iznose preko 0.95) i u velikoj meri prate vrednosti ekvivalentnog nivoa zvuka. U proseku, vrednost L_5 je 5,3 dB, a L_{10} 3 dB iznad L_{eq} . Izračunata standardna devijacija vrednosti ovih razlika je svega oko 1 dB i ta uska povezanost sa srednjim nivoom ih očigledno čini nepodobnim za karakterizaciju kratkotrajnih vremenskih varijacija, odnosno impulsivnosti. U isto vreme, vrednosti L_{90} i L_{95} variraju u relativno širokim granicama i njihova razlika u odnosu na vrednost L_{eq} značajno varira u zavisnosti od događaja. Ovi kvantili u velikoj meri odslikavaju nivo pozadinske ambijentalne buke.



Slika 4.5. Standardna devijacija vrednosti nivoa buke ucrtana oko krive L_{eq}

Sa dijagrama se takođe vidi da postoji značajna razlika između vrednosti L_{max} i L_5 . Pojedinačne maksimalne registrovane vrednosti nivoa, dobijenog usrednjavanjem u intervalu 10 ms, značajno premašuju vrednosti L_5 , što ukazuje da u praktično svim analiziranim signalima buke postoje kratkotrajne impulsne pojave. L_{max} vrednosti za većinu snimaka variraju između 90 dB i 100 dB, praktično nezavisno od srednjeg nivoa, što potencijalno ukazuje da se i tokom generalno tiših aktivnosti pojavjuju ekscenani impulsni događaji koji lako dostižu vrednosti preko 80 dB, pa čak i 100 dB. Oni potencijalno mogu biti uznemirujući za susede nezavisno od opšteg nivoa buke iskazanog sa L_{eq} . Ipak, L_{max} ne može samo po sebi biti odgovarajuć deskriptor impulsivnosti jer se bazira na samo jednom najbučnijem događaju. Kako, kao što je rečeno, L_5 i L_{10} takođe ne odlikavaju dobro impulsivnost zbog visoke korelisanosti sa L_{eq} , potrebno je tražiti drugačije deskriptore impulsivnosti.

Dalja potraga za kvalitetnom numeričkom karakterizacijom impulsivnosti buke u domaćinstvima neizbežno vodi ka korišćenju nestandardnih deskriptora, koji bi pojavu kratkih zvučnih impulsa u generisanoj buci približili ljudskoj percepciji. Uticaj kratkotrajnih zvučnih pojava na akustički komfor zavisi kako od njihovog apsolutnog nivoa zvuka kojim “odskaču” iznad opšteg nivoa buke, tako i od učestanosti njihovog pojavljivanja i trajanja. Zbog toga je poželjno da numerički pokazatelji na neki način uključe i ove vremenske aspekte signala buke, koji nisu pokriveni standardnim deskriptorima.

Mogući alternativni pristup kvantifikovanju impulsivnosti bučnih aktivnosti je primena *emergence* deskriptora. U literaturi je opisana njihova primena za karakterizaciju vremenski promenljive buke saobraćaja [Can et al., 2008]. Njihova uloga je da kvantifikuju pojavu (eng. *emergence*) ekscenih bučnih događaja koji nivoom znatno premašuju dugovremenski ekvivalentni nivo. Ukupnim trajanjem bučnog događaja smatra se vremenski interval tokom kojeg kratkovremenski nivo zvučnog pritiska u svakom trenutku premašuje određeni usvojeni prag L_a . U *emergence* deskriptore spadaju:

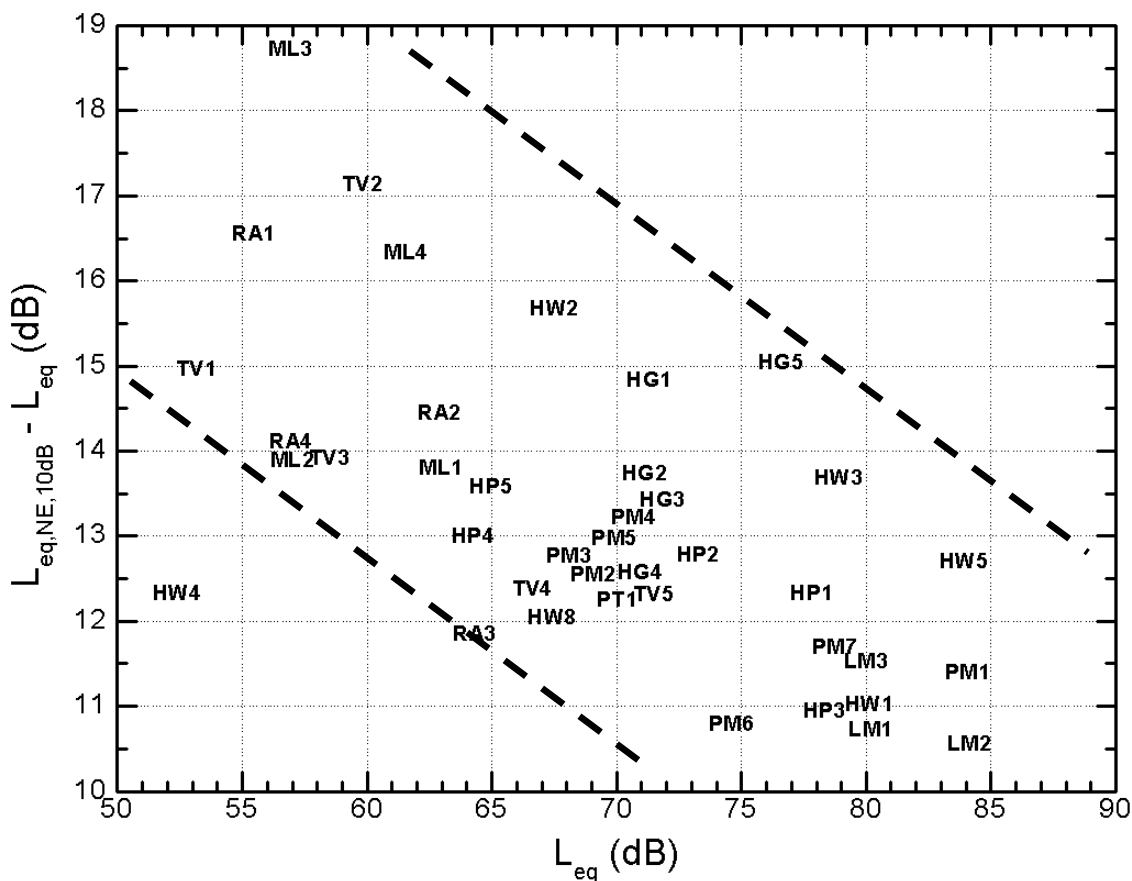
- broj bučnih događaja NNE kada nivo premašuje unapred postavljeni prag,
- indeks maskiranja MI , (ukupno trajanje svih bučnih događaja),
- srednje trajanje bučnih događaja t_{avg} i
- ekvivalentni nivo bučnih događaja $L_{eq,NE}$,

a njihove definicije date su u poglavlju 2.1.

Postavljanjem praga bučnih događaja relativno u odnosu na ekvivalentni nivo, obezbeđuje se da izračunati deskriptori impulsivnosti ne zavise od ukupnog nivoa buke, već da budu relativna mera impulsne fluktuacije njenog nivoa. Naravno, svaki od definisanih *emergence* deskriptora odlikava pojedinu komponentu signala buke (učestanost bučnih događaja, njihovo trajanje ili intenzitet), pa se za efikasnu karakterizaciju buke mogu koristiti samo u kombinaciji i/ili dopunjeni standardnim deskriptorima.

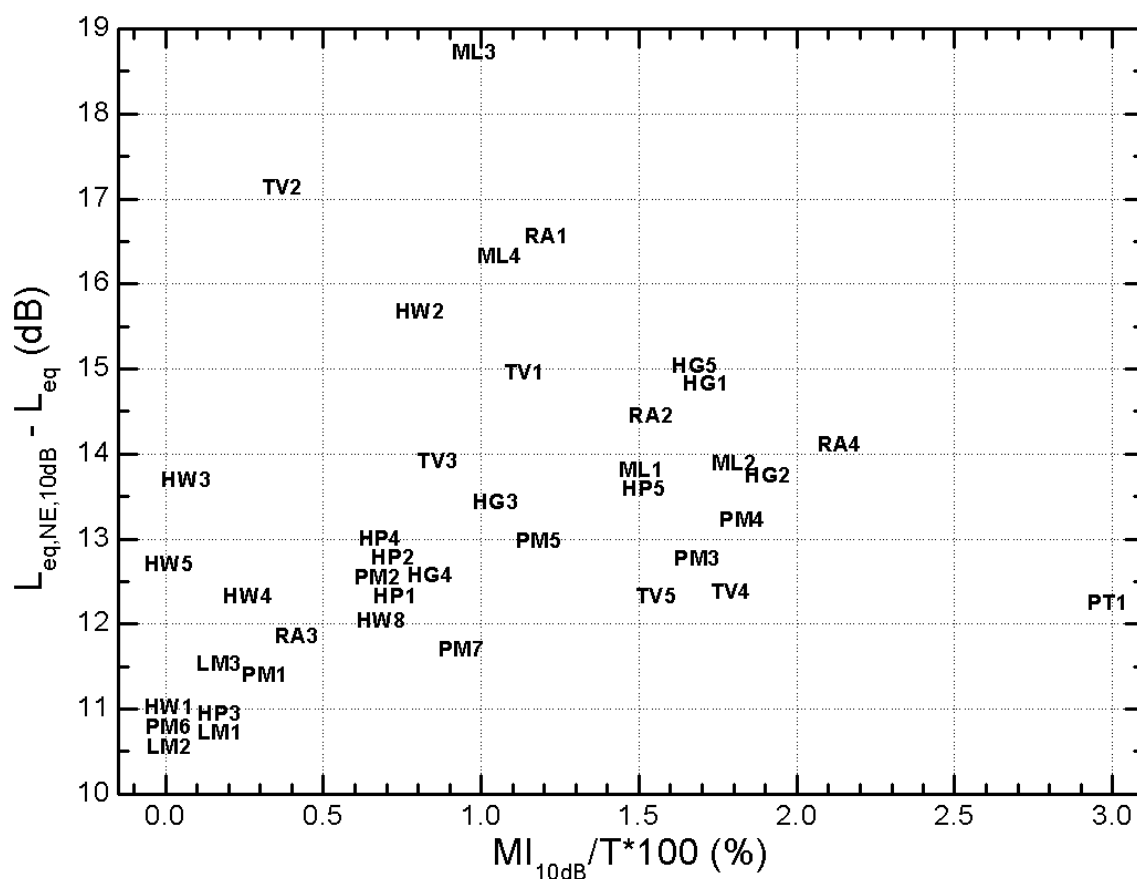
Za sve snimke buke u stanovima izračunata su četiri *emergence* deskriptora. Da bi se impulsivnost buke u domaćinstvima prikazala pomoću *emergence* deskriptora, za sve posmatrane događaje izračunata je razlika između srednjeg ekvivalentnog nivoa bučnih događaja, sa pragom postavljenim na vrednost $L_a = L_{eq} + 10 \text{ dB}$ ($L_{eq,NE,10dB}$) i

ekvivalentnog nivoa L_{eq} tokom čitavog trajanja snimljenog signala aktivnosti T . Ova razlika je na Slici 4.6 prikazana u funkciji ekvivalentnog nivoa buke (L_{eq}), ranije prikazanog na Slikama 4.4 i 4.5. Dijagram pokazuje da u kućnim aktivnostima postoji obrnuta srazmera između ekvivalentnog nivoa buke L_{eq} i impulsivnosti, to jest da su pri tišim aktivnostima veća impulsna premašenja. Dve linije povučene u dijagramu definišu ograničenje polja u kome se pojavljuju svi pojedinačni rezultati (izuzev HW4). Ovakav raspored rezultata u dijagramu može se razumeti da u ambijentu stanova postoje neki impulsni zvučni izvori čije je delovanje karakteristično i konstantno, nezavisno od opšteg stanja buke. Zbog toga je na dijagramu premašenje pri nižim vrednostima L_{eq} veće nego pri višim nivoima.



Slika 4.6. Razlika između A-ponderisanog ekvivalentnog nivoa bučnih događaja i ekvivalentnog nivoa tokom čitavog trajanja aktivnosti u funkciji ekvivalentnog nivoa tokom čitavog trajanja aktivnosti (oznake događaja su preuzete iz Tabele 4.4)

Za subjektivni osećaj buke je osim nivoa pojedinačnih impulsa bitno i njihovo trajanje (ukupna generisana energija). Na Slici 4.7 prikazana je razlika između ekvivalentnog nivoa detektovanih bučnih događaja sa pragom postavljenim na vrednost $L_{\alpha} = L_{eq} + 10 \text{ dB}$ ($L_{eq,NE,10dB}$) i ekvivalentnog nivoa L_{eq} tokom čitavog trajanja signala aktivnosti. Ova razlika je na slici nacrtana u funkciji procentualnog ukupnog trajanja bučnih događaja u odnosu na celokupno trajanje aktivnosti ($MI_{10dB}/T \cdot 100\%$). Sa dijagrama se vidi da se impulsne pojave pojavljuju u trajanju do 2% ukupnog trajanja analiziranih događaja (osim PT1). U jednom broju događaja njihova pojava je veoma kratka, manja od 0.5% ukupnog trajanja, pa se takve impulsne pojave mogu smatrati sporadičnim.

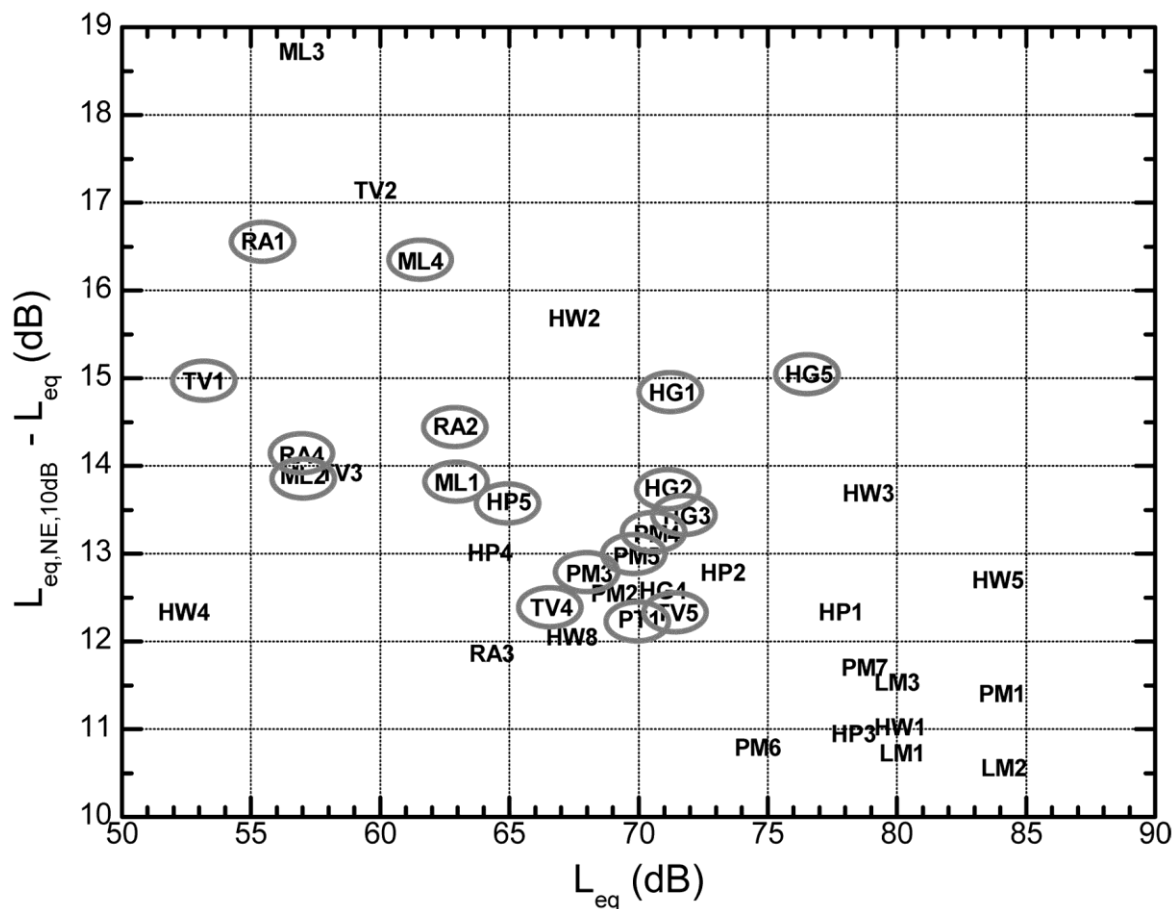


Slika 4.7. Razlika između A-ponderisanih ekvivalentnih nivoa bučnih događaja i tokom celokupnog trajanja aktivnosti u funkciji procentualnog trajanja bučnih događaja (oznake događaja su preuzete iz Tabele 4.4)

Sa Slika 4.6 i 4.7 moguće je sagledati karakteristike impulsivnosti buke koja nastaje pri pojedinim životnim aktivnostima u domaćinstvima. Prikazane vrednosti u dijagramima odslikavanju stanje sa aspekta intenziteta impulsnih događaja i procenta vremena njihove pojave u ukupnom trajanju aktivnosti u stanu. Vidi se da aktivnosti koje obuhvataju udarce kuhinjskim posuđem (ML3, ML4, RA1) imaju visok nivo premašenja impulsnih događaja u odnosu na njihov dugovremeni ekvivalentni nivo (preko 15 dB), kao i relativno visok procenat njihovog trajanja (iznad 1%) u okviru čitavog trajanja aktivnosti u stanu. Slično važi i za gledanje TV programa uz povremene udarce nameštajem (TV1, TV2, HW2). Istovremeno, sve ove aktivnosti karakteriše umerena vrednost A-ponderisanog dugovremenog ekvivalentnog nivoa zvuka, ispod 70 dB.

S druge strane, izvori buke najvećeg intenziteta, kao što je slušanje glasne muzike i sviranje muzičkih instrumenata u stanu (LM1, LM2, LM3, PM1, PM6) i usisavanje (HW1, HW4, HW5), u manje od 0,5% vremena proizvode impulsne događaje, sa premašenjem L_{eq} do 11-13 dB. Takve impulsne pojave se mogu smatrati sporadičnim. Između ove dve krajnosti nalaze se izvori buke kao što su govor (HG1, RA4) i vika dece tokom igre (HG5). U njima se javljaju impulsne pojave sa premašenjima od oko 15 dB u odnosu na ekvivalentni nivo za čitavu aktivnosti. Ovakvi događaji imaju nešto niže vrednosti L_{eq} od prethodno navedenih (slušanje muzike, usisavanje), ali veći procenat vremena zastupljenosti impulsa (do 2%).

Za subjektivni efekat impulsne buke od značaja je trajanje impulsnih pojava. Da bi se to sagledalo na Slici 4.8 prikazan je dijagram sa Slike 4.6 u kome su okvirima označeni svi događaji u kojima impulsne pojave traju duže od 1% vremena. Ova vrednost je usvojena kao granična iznad koje se impulsne pojave u buci ne mogu smatrati sporadičnim, nego pravilom. Vidi se da su to sve aktivnosti u kojima je ekvivalentni nivo buke oko 70 dB ili manje. Ovo je značajno zbog toga što je 70 dB u mnogim zemljama usvojeno kao granica za normalne aktivnosti u stanovima, pa su zahtevi minimalne zvučne izolacije između stanova dimenzionisani prema toj vrednosti. Prikazani rezultati pokazuju da postoje aktivnosti u stanovima čiji je nivo buke ispod te granice, ali da u preko 1% vremena taj je nivo impulsnim pojavama premašen za 10-15 dB, pa i više. To je pojava koja se mora uzeti u obzir pri oceni akustičkog komfora.



Slika 4.8. Dijagram sa Slike 4.4 na kome su označeni događaji u kojima su impulsne pojave trajale više od 1% ukupnog vremena trajanja događaja

Ovde treba napomenuti da vremenska svojstva impulsnih zvučnih pojava u prostorijama stanova, osim od samih izvora takvih zvukova, u izvesnoj meri zavise i od reverberacije, to jest ukupne apsorpcije u prostoriji. Reverberacioni „rep“ koji se u prostorijama neminovno javlja utiče na trajanje svake pojedinačne impulsne zvučne pojave. Kao posledica toga, podaci o trajanjima registrovanih impulsa implicitno uvek sadrže i uticaj reverberacije stambenih prostorija. To znači da vrednost indeksa maskiranja MI i t_{avg} u sebi sadrže i uticaj prostorije u kojoj se nalazi izvor. U realnosti su moguće izvesne varijacije trajanja istih impulsa u različitim prostorijama, u zavisnosti od opremljenosti prostorije nameštajem.

U daljem prikazu rezultata, za svaki snimak izračunati su *emergence* deskriptori i standardni parametri kojim se opisuje stanje buke. Ovi prvi po definiciji predstavljaju impulsivnost buke, ali je i iz standardnih podataka moguće odrediti određene numeričke podatke, bazirane na razlikama deskriptora, koji na neki način odslikavaju dinamiku, a

to znači i impulsivost zvučne pojave. Da bi se zbirno sagledali svi takvi podaci, svi raspoloživi parametri su prikazani u Tabeli 4.6. Za sve aktivnosti koje su kodovane oznakama iz Tabele 4.4 prikazane su vrednosti L_{eq} i dve grupe od po 8 parametara izvedenih iz standardnih pokazatelja nivoa zvuka i *emergence* deskriptora, respektivno. Deskriptori dinamike (L_N , $L_{eq,NE}$ i slično) bazirani su na razlikama, kako bi se anulirao uticaj apsolutnih nivoa na vrednosti deskriptora, dok su *emergence* deskriptori bazirani na vremenu (*NNE* i *MI*) skalirani ukupnim trajanjem signala T . U indeksima oznaka *emergence* deskriptora navedene su razlike između usvojenih vrednosti praga bučnih događaja i ekvivalentnog nivoa zvuka (5 dB ili 10 dB).

Svaki od prikazanih parametara iz tabele pojedinačno na neki način kvantifikuje impulsivnost signala analizirane buke. Za primenu u analizi stanja akustičkog komfora u zgradama poželjno je među njima prepoznati one koji najbolje odslikavaju impulsivnost buke. Za to je neophodno na neki način ustanoviti efikasnost svakog od prikazanih parametara da karakteriše impulsivnost buke i na osnovu toga među njima izdvojiti najpogodnije. U tom smislu neophodno je na neki način preliminarno izvršiti sortiranje svih analiziranih signala buke prema njihovoj impulsivnosti i napraviti “rang listu”, a zatim uspostaviti korelaciju između vrednosti svakog od deskriptora i impulsivnosti buke. Problem u tome je kako pre nego što je utvrđen pouzdani pokazatelj sortirati analizirane signale po njihovoj impulsivnosti. Jedan mogući pristup je jednostavna numerička procedura u kojoj se za sortiranje ravnopravno koriste izračunate vrednosti svih parametara iz Tabele 4.6. Procedura se zasniva na polaznoj pretpostavci da su svi deskriptori iz tabele na neki način relevantni za ocenu impulsivnosti, iako sa različitim aspektima. Najefikasniji među njima je onaj koji najbolje reprezentuje sve njih zajedno, odnosno impulsivnost generalno.

Tabela 4.6. Vrednosti deskriptora impulsivnosti bučnih aktivnosti u domaćinstvima

Br.	Oznaka	L_{eq}	σ	$L_{max} - L_{eq}$	$L_5 - L_{eq}$	$L_{10} - L_{eq}$	$L_{eq} - L_{50}$	$L_{10} - L_{90}$	$L_5 - L_{95}$	$L_{max} - L_{min}$	NNE_{5dB} / T	$MI_{5dB} / T \cdot 100\%$	$t_{avg,5dB}$	$L_{eq,NE,5dB} - L_{eq}$	NNE_{10dB} / T	$MI_{10dB} / T \cdot 100\%$	$t_{avg,10dB}$	$L_{eq,NE,10dB} - L_{eq}$	I
1	HG2	71.1	11,9	26,8	6,1	2,8	10,6	32,7	39,8	76	1	6,4	0,06	10,4	0,4	1,9	0,05	13,7	0,78
2	HG1	71.3	12,9	33,3	5,6	2,1	13,5	35,1	40	72	1,1	5,7	0,05	11,1	0,4	1,7	0,04	14,8	0,77
3	RA4	57.0	11,1	26	6,3	2,4	16,7	28,9	33,5	55,7	1,1	6,4	0,06	10,8	0,5	2,1	0,05	14	0,76
4	PT1	70.0	11,3	17,7	8,3	4,1	21,4	30,5	35,5	47,7	1,4	8,8	0,06	9,9	1,3	3	0,02	12,3	0,74
5	PM4	70.7	10,2	21,6	6,5	3,2	8,4	27,4	36,5	58	1,4	6,9	0,05	9,7	0,4	1,8	0,04	13,1	0,73
6	PM3	68.1	10,3	21,1	6,6	3,6	7,2	29,4	35,4	54,9	0,9	7,4	0,08	9,2	0,3	1,7	0,05	12,5	0,72
7	TV4	66.6	8,9	22	7,1	4,1	9,2	24,5	28,8	48,2	1,2	8,3	0,07	9	0,5	1,8	0,03	12,4	0,69
8	HP5	65.0	8,9	25,5	6,2	3,4	8,5	23,5	28,9	58,9	1,4	6,9	0,05	9,6	0,4	1,5	0,04	13,6	0,69
9	HG5	76.6	9,4	25,8	5,3	1,8	11,4	24,4	30,7	63,8	0,8	5,3	0,07	11,4	0,3	1,7	0,05	15	0,68
10	ML4	61.6	8,4	34,6	5,8	2,7	11,1	22,4	26,5	60,1	0,8	6,2	0,08	10,7	0,3	1,1	0,04	16,3	0,68
11	ML2	57.0	8,1	29,6	5,9	2,5	8,8	21,1	26,8	57,8	1,2	6,1	0,05	10,5	0,4	1,8	0,04	13,9	0,67
12	HW2	67.5	9,1	34,4	5,7	3,3	6,6	23	32,3	68,5	1,3	6,2	0,05	9,6	0,2	0,8	0,04	15,7	0,67
13	PM5	69.9	9,1	25,7	6,1	3,8	6,5	24,7	28,3	52,5	1,3	7,1	0,06	8,9	0,3	1,2	0,04	13	0,66
14	TV5	71.5	8,6	21	6,6	3,8	7,1	22,4	28,7	54,4	1,8	7,6	0,04	8,9	0,6	1,6	0,02	12,4	0,65
15	PM7	78.7	11,4	16,2	6,2	4,2	4,6	32,4	39,4	54,7	0,7	7,7	0,11	7,9	0,1	0,9	0,08	11,6	0,64
16	ML1	63.0	7,4	26,6	5,9	3	7,3	18,2	24,7	58,6	1,3	6,2	0,05	9,9	0,4	1,5	0,04	13,7	0,62
17	PM1	84.1	13,9	16,1	5,5	3,9	2,6	34,4	50	66,9	1,1	6,2	0,06	7,2	0,1	0,3	0,05	11,4	0,58
18	RA1	55.5	7,3	30,3	4,1	1,3	9,4	18,6	23,2	56	0,8	4	0,05	12,4	0,2	1,2	0,06	16,5	0,56
19	ML3	56.9	7,3	32,5	1,2	-2	11,9	17,9	23	60,3	0,5	2,4	0,05	15,2	0,2	1	0,05	18,7	0,54
20	HG3	71.8	7,3	28,3	5,2	2,9	3,8	16,8	23,7	66,2	1,2	5,3	0,04	9,3	0,3	1	0,04	13,4	0,53
21	HP1	77.8	6,2	27,6	5,5	3,6	3,5	15,5	20,3	64,3	1,6	6,1	0,04	8,2	0,3	0,7	0,03	12,5	0,51
22	HP4	64.2	6,7	25,9	5,4	3,5	3,5	15,8	21,1	63,9	1,6	5,9	0,04	8,2	0,2	0,7	0,03	12,9	0,5
23	TV1	53.2	6,6	29,7	4,7	2,4	5,6	17,1	20,6	50,5	1	4,6	0,05	10,7	0,3	1,1	0,04	14,9	0,5
24	PM2	69.1	6,5	23	5,5	3,7	3,6	15,5	20,4	57,4	1,4	6,2	0,04	8	0,2	0,7	0,04	12,5	0,5
25	RA3	64.3	7,9	17,9	6	4,5	4,3	20	26,1	47,7	2,6	8,1	0,03	7,2	0,2	0,4	0,02	11,8	0,49
26	RA2	62.9	5,4	25,9	5	2,1	7,8	12,5	16	40,2	0,9	5	0,06	10,9	0,4	1,5	0,04	14,4	0,48
27	TV3	58.5	5,3	28,9	5,4	3,1	4,4	13,6	17,1	48,5	1,5	5,7	0,04	9,1	0,3	0,9	0,03	13,9	0,47
28	HP2	73.3	5,4	24	5,4	3,4	3,4	13,7	17,7	49,5	1,7	5,8	0,03	8,3	0,3	0,7	0,03	12,7	0,43
29	HG4	70.9	5,6	22,1	5,1	3	2,8	11,9	16,9	53,7	1,3	5,1	0,04	8,4	0,2	0,8	0,03	12,5	0,38
30	HW4	52.4	7,9	33,7	4,3	3,2	0,7	18,7	21,9	54,4	0,7	3,6	0,05	7,8	0,2	0,3	0,01	12,3	0,36
31	PM6	74.6	10,4	12,2	4,5	3,2	0,9	29,9	35,4	48,7	0,8	3,7	0,05	6,7	0	0,1	0,04	10,8	0,35
32	HW6	95.4	6,2	9,2	6,9	3,3	3,5	12	17,2	54,3	0,1	7,1	0,57	7,7	0	0	0	*)	0,33
33	TV2	59.8	4	31,5	3,4	2,1	2,1	9,6	12,7	54	0,7	2,1	0,03	11,1	0,1	0,4	0,04	17,1	0,32
34	HW8	67.4	4,1	16,9	5,2	3,1	2,8	10,2	13,6	34,6	1,5	5,5	0,04	8,1	0,3	0,7	0,02	12	0,32
35	LM3	80.0	6,1	16,3	4,8	3,6	1,8	14	19	54,4	1,6	4,5	0,03	6,7	0	0,1	0,02	11,5	0,3
36	HW5	83.9	5	16,4	4,9	3,8	2,3	11,3	13,6	48,7	0,7	4,6	0,06	6,3	0	0	0,02	12,7	0,28
37	LM1	80.2	5,3	12,6	5,1	3,7	2,1	13,1	17	39	1,9	5,3	0,03	6,7	0	0,1	0,02	10,7	0,27
38	HW3	78.9	5,7	20,9	3,4	2,9	2,4	11,8	12,9	66,2	0,1	0,4	0,03	8,9	0	0,1	0,03	13,7	0,27
39	HP3	78.3	4,1	12,6	4,9	3,4	1,9	10,6	13,4	28,8	1,7	4,6	0,03	6,8	0,1	0,1	0,02	10,9	0,22
40	HW7	87.0	5,1	9,2	4,8	3,7	1,8	12,1	14,8	42	0,5	4	0,07	6,4	0	0	0	*)	0,19
41	HW1	80.1	4,9	12,2	4,1	2,9	0,7	9,3	12,7	52,1	0,8	2,5	0,03	5,9	0	0	0,01	10,9	0,12
42	LM2	84.1	2,8	11,1	3,2	2,4	0,5	6,9	9,1	25,3	0,5	1	0,02	6	0	0	0,01	10,7	0,03

*) bez detektovanih bučnih događaja iznad definisanog praga

Procedura se sastoji od tri koraka. U prvom koraku je za svaki od 16 deskriptora iz Tabele 4.6 izvršeno rangiranje aktivnosti prema njegovoj vrednosti. Tako su aktivnosti prema vrednosti svakog od deskriptora dobile svoj rang od 1 do 42 (što je ukupan broj analiziranih signala, to jest aktivnosti). U drugom koraku je za svaku aktivnost izvršeno usrednjavanje vrednosti njenog ranga dobijenog prema svih 16 deskriptora iz tabele. Najzad, u trećem koraku su tako dobijene srednje vrednosti normalizovane deljenjem sa ukupnim brojem aktivnosti (42), čime je dobijeni broj sveden na interval između 0 i 1. Dobijeni rezultat se pod navedenom polaznom pretpostavkom može smatrati objektivnom ocenom impulsivnosti i označiti kao indeks impulsivnosti I . Veća vrednost ovog indeksa ukazuje na izraženiji impulsni karakter aktivnosti, i obrnuto. Vrednosti indeksa I prikazane su u poslednjoj koloni Tabele 4.6, a redosled svih aktivnosti u tabeli formiran je prema njegovoj opadajućoj vrednosti.

Redosled aktivnosti u Tabeli 4.6 još jednom pokazuje da se impulsivnost aktivnosti ne može utvrditi samo na osnovu njenog tipa. Tako, na primer, buka generisana tokom kućnih okupljanja ili obavljanja kućnih poslova može biti manje ili više impulsna, zavisno od impulsivnosti dominantnih izvora buke, kao što su opšti žamor ili vika dece u prvom, ili udarci nameštajem ili usisivač u drugom slučaju. Prisustvo dodatnih sporednih izvora buke, navedenih u Tabeli 4.5, takođe može značajno varirati impulsivnost buke istog tipa. Ipak, generalno govoreći, kućna okupljanja, porodični obroci i vežbanje muzičkih instrumenata mogu se smatrati bukom pretežno impulsnog karaktera, dok se tokom slušanja muzike i kućnih poslova generiše vremenski ujednačeniji nivo buke. Između navedenih tipova aktivnosti nalaze se redovne kućne aktivnosti, govor, gledanje televizije i kućne zabave. Potencijalan izvor buke impulsnog tipa su i oglašavanje kućnih ljubimaca. Dobijena klasifikacija aktivnosti preko indeksa impulsivnosti dodatno potvrđuje da aktivnosti pri kojima se generišu visoki dugovremeni ekvivalentni nivoi buke uglavnom karakteriše manja impulsivnost. Tipični primeri su aktivnosti LM2, HW1 i HW7, tokom kojih usisivač i glasna muzika uzrokuju visoke vrednosti L_{eq} , ali se u Tabeli 4.6 nalaze na samom dnu liste.

4.3.4. Diskusija rezultata

Da bi se izvršilo poređenje analiziranih parametara prema njihovoj upotrebljivosti za objektivnu ocenu impulsivnosti buke u domaćinstvima izračunati su koeficijenti korelacije između vrednosti analiziranih parametara za svaki od snimljenih signala aktivnosti (datim u odgovarajućim kolonama Tabele 4.6), i ukupne ocene njihove impulsivnosti, odnosno njihovih (invertovanih) pozicija datih u prvoj koloni Tabele 4.6. Vrednosti izračunatih koeficijenata korelacije svih parametara navedene su u opadajućem redosledu u drugoj koloni Tabele 4.7. Treća kolona, radi poređenja, daje vrednosti koeficijenata korelacije sa ekvivalentnim nivoom zvuka za ceo signal.

Tabela 4.7. Koeficijent korelacije između parametara i preliminarno ustanovljene impulsivnosti analiziranih aktivnosti

Deskriptor	Koeficijent korelacije sa impulsivnošću	Koeficijent korelacije sa L_{eq}
$MI_{10dB} / T \cdot 100\%$	0,88	-0.48
$L_{10} - L_{90}$	0,83	-0.14
σ	0,82	-0.11
$L_{eq} - L_{50}$	0,81	-0.10
$L_5 - L_{95}$	0,81	-0.39
$MI_{5dB} / T \cdot 100\%$	0,69	-0.40
NNE_{10dB} / T	0,66	-0.06
$t_{avg,10dB}$	0,61	-0.39
$L_{eq,NE,5dB} - L_{eq}$	0,60	-0.65
$L_{max} - L_{min}$	0,58	0.08
$L_5 - L_{eq}$	0,58	-0.15
$L_{max} - L_{eq}$	0,52	-0.78
$L_{eq,NE,10dB} - L_{eq}$	0,36	-0.62
NNE_{5dB} / T	0,14	-0.18
$L_{10} - L_{eq}$	-0,06	0.39
$t_{avg,5dB}$	-0,02	0.38

Na osnovu Tabele 4.7 može se zaključiti da je vrednost praga bučnih događaja $L_{eq} + 10$ dB koja se koristi za evaluaciju *emergence* deskriptora pogodnija za karakterizaciju impulsivnosti bučnih aktivnosti u domaćinstvima od vrednosti $L_{eq} + 5$ dB. Procenat vremena tokom kog se javljaju bučni događaji A-ponderisanog nivoa 10 dB i više iznad ukupnog ekvivalentnog nivoa ima najveću korelaciju sa utvrđenom impulsivnošću izraženom indeksom I . Međutim, ovaj parametar ne sadrži

informacije o broju bučnih događaja, njihovoj učestanosti ili pojedinačnom trajanju, kao ni nivou zvuka koji dostižu. Kao dodatni *emergence* deskriptori, mogu se koristiti vrednosti količnika broja bučnih događaja i ukupnog trajanja aktivnosti (NNE/T), prosečno trajanje bučnih događaja (t_{avg}) ili ekvivalentni nivo ekscenih zvučnih događaja ($L_{eq,NE}$). Od kombinacija standardnih deskriptora, za kvantifikovanje impulsivnosti pogodni su razlika L_{eq} i L_{50} , standardna devijacija vremenske promene nivoa zvučnog pritiska, kao i dinamika signala izražena razlikom nivoa L_{10} i L_{90} ili L_5 i L_{95} . Očekivano, kombinacije $L_5 - L_{eq}$ i $L_{10} - L_{eq}$ našle su se u donjem delu tabele zbog korelisanosti L_5 i L_{10} sa L_{eq} , a $L_{max} - L_{eq}$ zbog ograničenosti L_{max} na pojedinačan bučni događaj umesto opšte impulsivnosti.

Prema izvršenom rangiranju deskriptora, učestanost impulsa generalno slabije reprezentuje impulsivnost od njihovog trajanja i ekvivalentnog nivoa. To može biti i posledica činjenice da među analiziranim deskriptorima dominiraju oni bazirani na nivou zvuka i/ili trajanju bučnih događaja (L_{eq} , kvantili, $L_{eq,NE}$, MI), dok je učestanost zastupljena samo kroz odnos NNE/T .

4.3.5. Zaključak

Rezultati analize prikazane u ovom radu pokazali su dve bitne osobine buke u stanovima. Prvo, aktivnosti u domaćinstvima generišu buku koja u mnogim okolnostima ima izražen impulsni karakter. Neki uobičajeni izvori zvuka u domaćinstvima mogu se okarakterisati kao izvori pretežno impulsnog karaktera. To su razni udarci (kuhinjsko posuđe, tapšanje, pomični delovi nameštaja), glasan govor (dovikivanje, smeh, vika dece, kašalj, kijanje, pevanje), TV program (zvučni efekti u filmovima, reklame), kućni ljubimci, sviranje muzičkih instrumenata. Ovi generatori mogu u kratkim vremenskim intervalima proizvesti relativno visoke nivoe zvuka u odnosu na ukupan opšti ekvivalentni nivo buke u stanu.

Drugo, postoje normalne aktivnosti u domaćinstvima, koje po sebi ne spadaju u ekscenno ponašanje stanara, tokom kojih nastaje buka čiji je ekvivalentni nivo iznad 70 dB, što je često pretpostavljena granica normalnog za ocenu potrebne zvučne izolacije. Takođe postoje aktivnosti pri kojima u stanovima nastaje buka nivoa i preko 80 dB (na primer korišćenje usisavača, slušanje muzike).

Najbučniji događaji uglavnom su dobro okarakterisani njihovim ekvivalentnim nivoom. Međutim, događaji koji stvaraju niže vrednosti dugovremenog ekvivalentnog nivoa buke i spadaju u normalno ponašanje stanara sadrže impulsne pojave koje svojim nivoom prelazi 80 dBA, pa čak 90 dBA. Njihov impulsni karakter i nivoi koje dostižu zasigurno ima uticaja na subjektivni doživljaj ugroženosti bukom. Zbog toga uticaj normalnih aktivnosti ljudi u stanu na akustički komfor u okruženju nije dovoljno okarakterisan samo vrednošću ekvivalentnog nivoa buke, kako se to primenjuje u normativima, već je potrebno uzeti u obzir i parametre kojim se odslikava impulsivnost zvuka. Za preciznije određivanje značaja toga na akustički komfor, ipak, svakako su potrebni odgovarajući psihoakustički testovi.

Za kvantifikovanje impulsivnosti buke u domaćinstvima standardno merenim deskriptorima buke (ISO 1996-1), preporučuje se korišćenje razlike kvantila L_{10} i L_{90} ili L_5 i L_{95} , kao mera dinamičkih varijacija nivoa zvuka, što je najpribližnije oceni uticaja bučnih impulsnih zvučnih događaja. Veća vrednost navedenih razlika deskriptora ukazuje na izraženiju impulsivnost buke. Alternativno, može se koristiti i standardna devijacija kratkovremenskih (vremenska ponderacija 10ms) nivoa zvučnog pritiska. Ipak, impulsivnost buke se generalno može samo delimično okarakterisati korišćenjem jednog, ili kombinacijom više standardnih deskriptora buke. Za potpuniju karakterizaciju impulsivnosti posebno efektan dodatak standardnim deskriptorima mogu biti *emergence* deskriptori, sa usvojenim pragom bučnih događaja relativno, 10dB iznad dugovremenskog ekvivalentnog nivoa zvuka. Za kvantifikovanje vremenskog trajanja bučnih ekscesnih događaja pogodno je izračunavanje odnosa ukupnog trajanja bučnih događaja i vremenskog trajanja čitavog signala buke (MI_{10dB}/T), a za učestanost impulsa odnos ukupnog broja bučnih događaja i trajanja signala buke (NNE_{10dB}/T). Time se opštim dinamičkim deskriptorima buke pridodaje i vremenska karakterizacija.

Rezultati analize impulsivnosti buke u stanovima mogu se takođe potencijalno koristiti za adekvatniju ocenu potrebnog kvaliteta zvučne izolacije između stanova sa aspekta akustičkog komfora. Primetnost bučnih aktivnosti u susednim stanovima zavisice od nivoa i učestanosti pojavljivanja impulsnih pojava. Zbog toga u odlučivanju o potrebnim vrednostima izolacije između stanova treba uzeti u obzir i predložene pokazatelje impulsivnosti, a ne samo dugovremeni ekvivalentni nivo buke.

Na kraju, treba napomenuti da prikazani rezultati u određenoj meri odslikavaju navike lokalnog stanovništva i stil života u Srbiji. Očekivano je da nivo buke koja nastaje u domaćinstvima i ostale njene karakteristike variraju između različitih geografskih regiona ili zemalja. Ipak, za veliku većinu analiziranih izvora buke i bučnih aktivnosti može se konstatovati da su široko zastupljeni u svim urbanim sredinama i tipični za savremeni život u multi-dwelling houses. Ta činjenica prikazanim rezultatima daje jedan opštiji karakter.

5. Monitoring saobraćajne buke u urbanoj sredini

Definisanje potrebnih vrednosti zvučne izolacije fasadnih pregrada, a to znači i ocena te izolacije jednobrojnim parametrima, trebalo bi da bude korelisano sa subjektivnim doživljajem buke koja iz spoljašnje sredine dospeva u prostorije. Kao u slučaju zvučne izolacije unutrašnjih pregrada koje štite od buke u zgradama, za to je potrebno poznavanje fizičkih karakteristika očekivane buke koja deluje na fasade zgrada u različitim okolnostima. U tom domenu nesumnjivo je da su urbane sredine najkritičniji prostori zbog potencijalno visokih vrednosti nivoa buke čiji je glavni izvor saobraćaj na ulicama.

Za adekvatno kvantifikovanje stanja buke u spoljašnjoj sredini, pored energetske deskriptora poput dugovremenskog ekvivalentnog nivoa buke, potrebno je poznavati i njen spektralni sadržaj. Referentni spektri spoljašnje buke pomoću kojih se izračunavaju jednobrojne vrednosti izolacione moći moraju u što većoj meri odgovarati realnoj buci. Kako je saobraćaj dominantan izvor spoljašnje buke u ugroženim urbanim sredinama, za analizu fizičkih karakteristika buke koja deluje na fasade je najznačajnije je sprovesti analizu spektra saobraćajne.

5.1. Analiza spektra saobraćajne buke u urbanoj sredini

Analiza spoljašnje buke na fasadama zgrada u urbanoj sredini izvršena je monitoringom na izvesnom broju karakterističnih lokacija u centralnoj zoni Beograda. Pri tome, istraživanje je imalo dva osnovna cilja:

- da se realni, izmereni spektri buke na fasadama zgrada u urbanoj sredini uporede sa referentnim spektrima definisanim u međunarodnim standardima pomoću kojih se izračunavaju jednobrojni pokazatelji zvučne izolacije,
- da se stekne uvid u varijacije spektra buke pod različitim okolnostima koje mogu postojati u naseljima s obzirom na razlike u intenzitetu saobraćaja i geometriju ulica.

Poznavanje varijacija spektra saobraćajne buke i njegove razlike u odnosu na standardizovani Spektar br. 2 iz standarda ISO717 ili u odnosu na referentni spektar $L_{traffic}$ iz predloga standarda ISO16717, omogućiće eventualnu modifikaciju metoda

proračuna jednobrojnih vrednosti zvučne izolacije fasada u konkretnim okolnostima u kojima se nalaze zgrade u naseljima i bolji uvid u relevantnost dobijenih vrednosti spektralnog korekcionog faktora C_{tr} ili vrednosti izolacije $R_{traffic}$. Značaj takvog rezultata je i u tome što potencijalno može pomoći u poboljšanju korelisanosti izračunatih pokazatelja zvučne izolacije fasada sa subjektivnim doživljajem buke saobraćaja u zgradama.

5.1.1. Snimanje i merenje buke drumskog saobraćaja

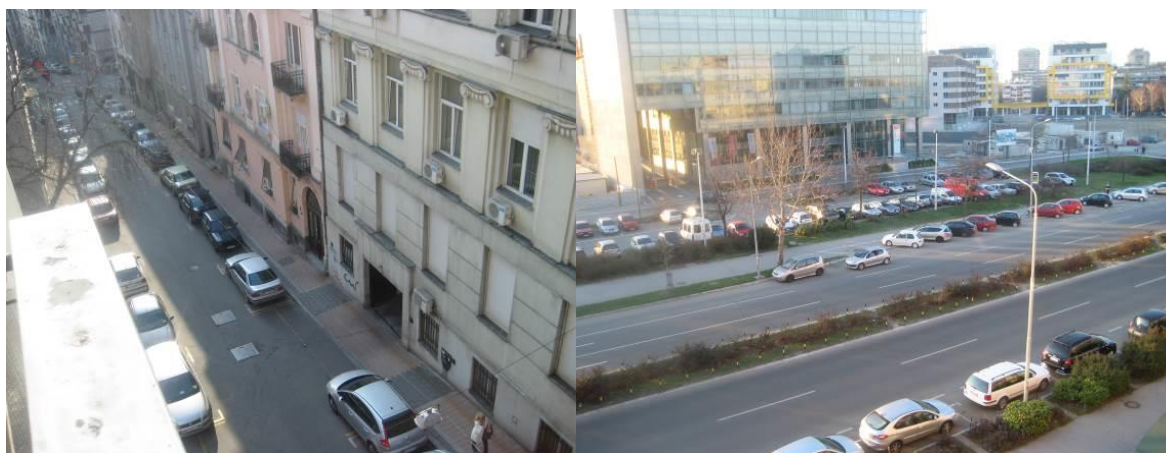
Monitoring za utvrđivanje spektralnih osobina buke saobraćaja realizovano je dvadesetčetvoročasovnim merenjem. Merenja su vršena na 6 lokacija u centralnoj gradskoj zoni Beograda; odabrana merna mesta su se nalazila u ulicama različitih širina, broja kolovoznih traka, protoka i brzine vozila. Spisak ulica u kojima je izvršeno merenje prikazan je u Tabeli 5.1. Pozicije na kojima se nalazio merni mikrofoni tokom merenja nalazile su se na fasadi okrenutoj ka ulici, osim jednog merenja koje je izvršeno na fasadi okrenutoj ka dvorištu unutar bloka zgrada. Merna mesta su se nalazila na visinama od drugog do petog sprata. U svim slučajevima korišćeni su balkoni za postavljanje merne opreme. Na Slici 5.1 prikazane su fotografije napravljene na dve merne lokacije (Dobrinjska ulica i ulica Trešnjinog cveta). One prikazuju pogled sa mesta gde se nalazio merni mikrofoni.

Tabela 5.1. Ulice u Beogradu u kojima su vršena merenja buke saobraćaja

	Ulica	broj kolovoznih traka
1.	Dobrinjska	1
2.	Dunavska	2
3.	Ilije Garašanina	2
4.	Nušićeve	2
5.	Trešnjinog cveta	4
6.	Vojislava Ilića	4

U svim analiziranim ulicama postoji samo automobilski saobraćaj. Zbog toga buka tramvajskog i železničkog saobraćaja nisu predmet razmatranja ovog istraživanja. Laka i teška drumska vozila zastupljena su u ulicama u različitoj meri, a motocikli su prisutni na svim mernim lokacijama. Vozna podloga u svim ulicama je asfalt u relativno

očuvanom stanju. Sva merenja vršena su u proleće, po suvom vremenu, blago vetrovitom ili u odsustvu vetra, i na prosečnoj temperaturi oko 20°C. Minimalno rastojanje između mernog mikrofona i površine fasade iznosilo je 1 m. Za snimanje buke korišćena je frekvencija odmeravanja 48 kHz i rezolucija 24 bita.



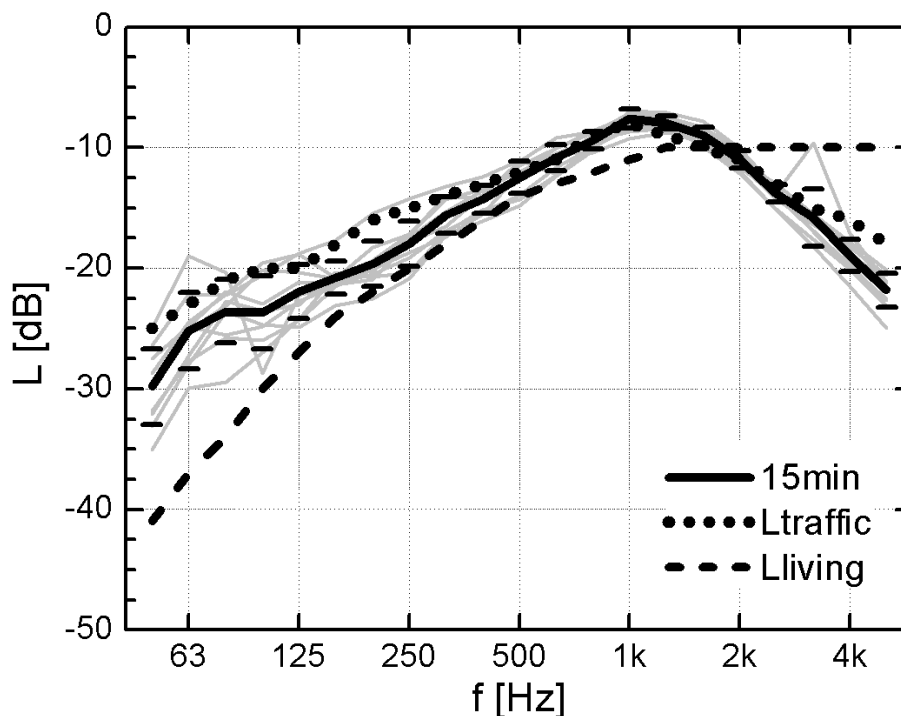
Slika 5.1. Primer mernih lokacija u Dobrinjskoj ulici (levo) i ulici Trešnjinog cveta (desno)

5.1.2. Rezultati spektralne analize buke

Na svim analiziranim lokacijama vršeno je snimanje buke u trajanju od 24 časa. Iz takvih snimaka izdvojeni su samo vremenski intervali u kojima je saobraćaj bio posebno intenzivan. Takvi intervali su najčešće tokom jutarnje i popodnevne saobraćajne gužve („špic“). Da bi se mogli direktno porediti sa referentnim spektrima propisanim standardima, svi spektri buke izmereni u tercnim frekvencijskim podopsezima su A-ponderisani i normalizovani, tako da im ukupna energija bude 0 dB.

Napočetku analize posmatrano je 10 petnaestominutnih intervala koji su izdvojeni iz svih dvadesetčetvoročasovnih snimaka. Pri tome su odabrani intervali tokom kojih je zabeležen najviši nivo buke saobraćaja. Rezultat ovakve analize prikazan je na Slici 5.2. Srednji izmereni ekvivalentni nivo tokom ovih intervala iznosi 66,9 dB(A) sa standardnom devijacijom 4,6 dB(A). Pojedinačni izmereni spektri prikazani su tankim sivim linijama, dok je usrednjeni spektar prikazan debljom crnom linijom, takođe sa dodatom/oduzetom vrednošću standardne devijacije (kratke horizontalne crtice). Kako se prema ISO 717-1 i Spektar br. 1 i Spektar br. 2 mogu

koristiti za predstavu buke motornih vozila u zavisnosti od njihove prosečne brzine, izmereni spektri su po obliku upoređeni sa oba ova referentna spektra.



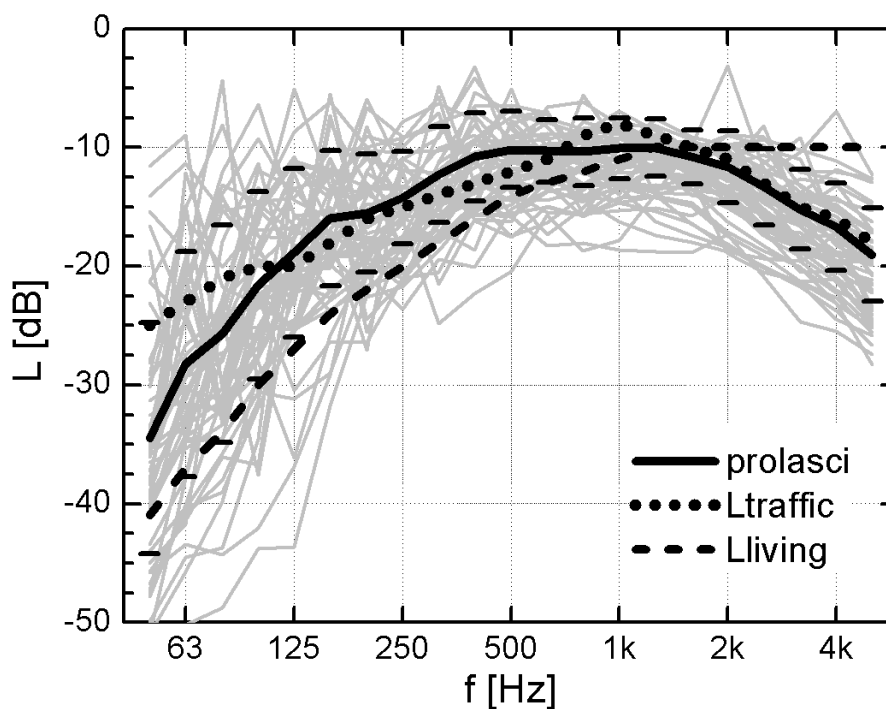
Slika 5.2. Spektri buke saobraćaja u 10 petnaestominutnih vremenskih intervala (sive linije predstavljaju pojedinačne spektre, a deblja linija srednju vrednost)

Iako je uzorak od 10 snimaka bučnih petnaestominutnih vremenskih intervala relativno mali, indikativno je da se svi izmereni spektri približavaju krivoj $L_{traffic}$ sa donje strane. Krive uglavnom pokazuju maksimalne vrednosti u terci na 1000 Hz, a zatim opadanje ka višim i nižim frekvencijama, nešto brže od referentnog spektra. Propisani Spektar br. 2 može se, dakle, shvatiti kao nešto nepovoljniji slučaj od prosečne saobraćajne buke. Kada se izračunavanje jednobrojne vrednosti izolacione moći vrši primenom Spektra 2 dobijaju nešto niže jednobrojne vrednosti zvučne izolacije fasadnih pregrada. Na to ukazuje i raspored vrednosti usrednjenog spektra sa dodatom vrednošću standardne devijacije koji se u velikoj meri poklapa sa spektrom $L_{traffic}$.

Ipak, usrednjavanje buke u petnaestominutnim vremenskim intervalima može biti neprimereno u slučaju nestacionarne buke sa većim fluktuacijama nivoa tokom vremena. U praksi, to je na primer slučaj sa ulicama malog prometa saobraćaja, kada se

pojedinačni prolasci vozila izdvajaju iz opšteg nivoa ambijentalne buke, noseći glavninu zvučne energije u relativno kratkom vremenskom intervalu. U takvim okolnostima, buka može imati znatno viši nivo i drugačije frekvencijske karakteristike tokom kratkog vremenskog intervala, u odnosu na ostatak vremena. Takve okolnostim imaju izrazito uznemiravajući karakter sa stanovišta akustičkog komfora stanovništva, posebno tokom sna [Öhrström et al., 1982; Eberhardt et al., 1987], a koji neće biti evidentan iz vrednosti usrednjenih na petnaestominutnim ili dužim referentnim vremenskim intervalima.

Da bi se analizirale i takve okolnosti, u nastavku analize je iz snimaka saobraćajne buke sa svih lokacija izdvojeno 54 pojedinačna prolaska motornih vozila. Oni su prikazani na Slici 5.3. Oblici njihovih spektara upoređeni su sa referentnim spektrima koji su takođe ucrtani u dijagramu. Prosečni izmereni nivo buke u ovom slučaju je oko 10 dB viši u odnosu na srednji nivo unutar petnaestominutnih intervala i iznosi 77 dB(A), sa standardnom devijacijom 6,9 dB(A).

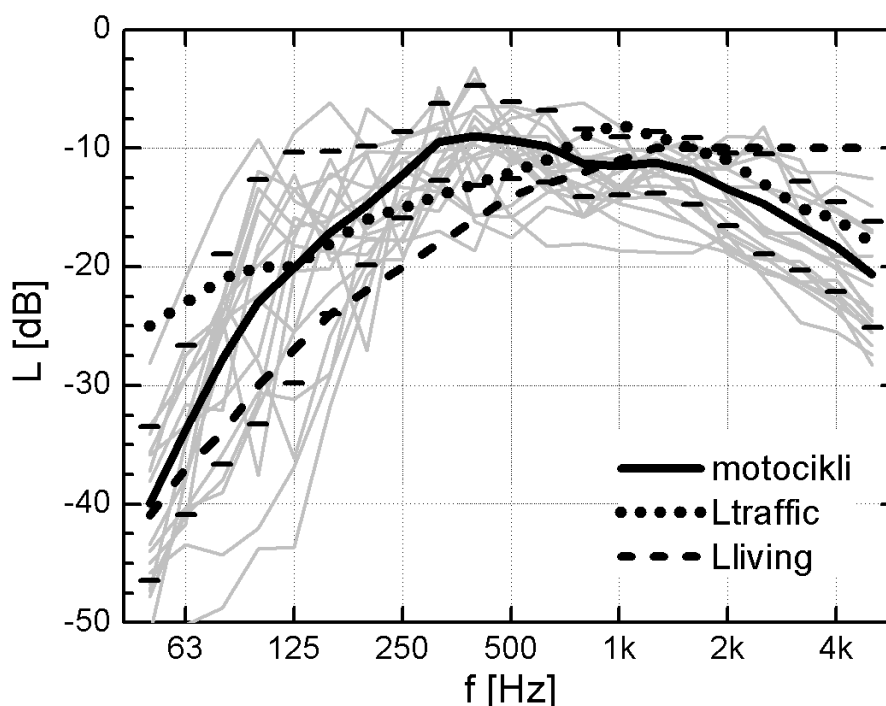


Slika 5.3. Izmereni spektri buke za vreme pojedinačnih prolaska 54 motorna vozila uzeti sa svih lokacija

Usrednjeni spektar ovakvih signala ima znatno ravniji oblik i blaži pad ka niskim frekvencijama. Zvučna energija je ravnomernije raspodeljena između 250 Hz i

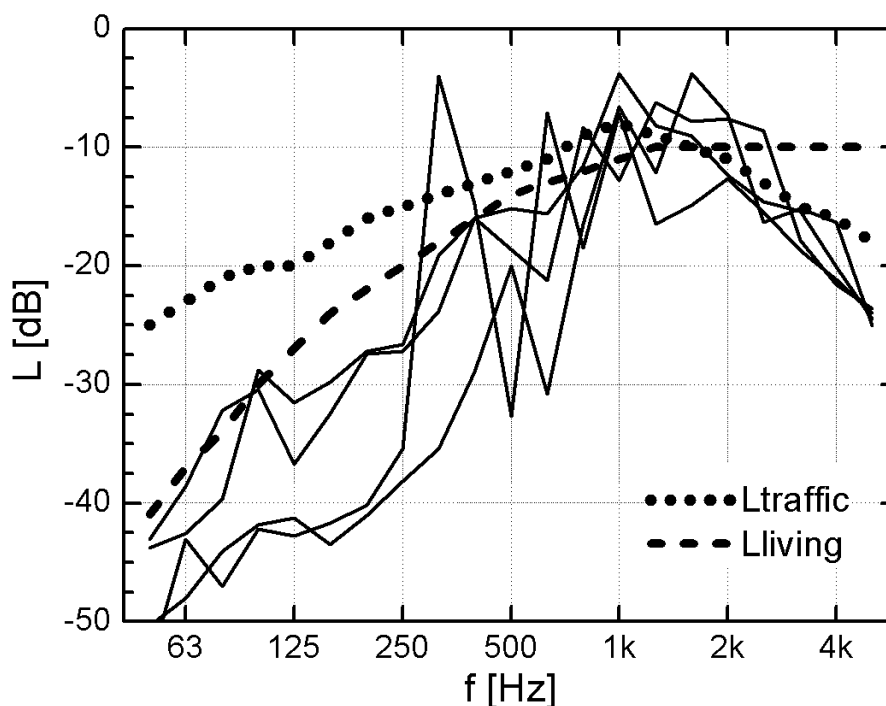
2000 Hz, posebno ukoliko se na srednje vrednosti u tercnim frekvencijskim podopsezima dodaju vrednosti standardnih devijacija. Međutim, pad vrednosti spektara ispod 100 Hz je i dalje znatno brži od pada referentnog spektra $L_{traffic}$, što, kao i u slučaju buke u domaćinstvima i referentnog spektra L_{living} , ukazuje na moguće prenaplašavanje uticaja buke na najnižim frekvencijama pri oceni zvučne izolacije.

Najviši A-ponderisani nivoi saobraćajne buke izmereni su tokom pojedinačnih brzih prolazaka motocikala, kao i pri aktiviranju automobilskih sirena. Stoga su analizirani oblici njihovih spektara i upoređeni su sa referentnim spektrima koji služe za izračunavanje jednobrojnih vrednosti izolacije. U daljoj analizi snimaka saobraćajne buke izdvojeni su signali snimljeni pri usamljenim prolascima motocikala. Oni su prikazani na Slici 5.4. Rezultati su prikazani za 18 izdvojenih prolazaka motocikala, sa prosečnim generisanim nivoom zvuka 81,9 dB(A) i standardnom devijacijom 6 dB(A). Sa maksimumom spektra uglavnom između 250 Hz i 500 Hz i oštrim padom ka niskim frekvencijama, u najnižem delu spektra doprinos buke u slučaju brzih prolazaka motocikala je praktično zanemarljiv.



Slika 5.4. Izmereni spektri buke saobraćaja pri pojedinačnim prolascima motocikala

Iako se automobilske sirene po svojoj tonalnoj prirodi razlikuju od uobičajene buke motornih vozila, radi sveobuhvatnosti analize i zbog posebno visokih nivoa koji proizvode, izdvojena su 4 ovakva signala. Njihovi spektri su prikazani na Slici 5.5. Nivoi zvuka koji se pri tome postižu su između 83 dBA i 92 dBA. Sasvim je očekivano da ni $L_{traffic}$ ni L_{living} ne predstavljaju dobre reprezentacije zvuka sirene, koji je znatno užeg i nepravilnog oblika i sa istaknutim uskopojasnim komponentama iznad 250 Hz.

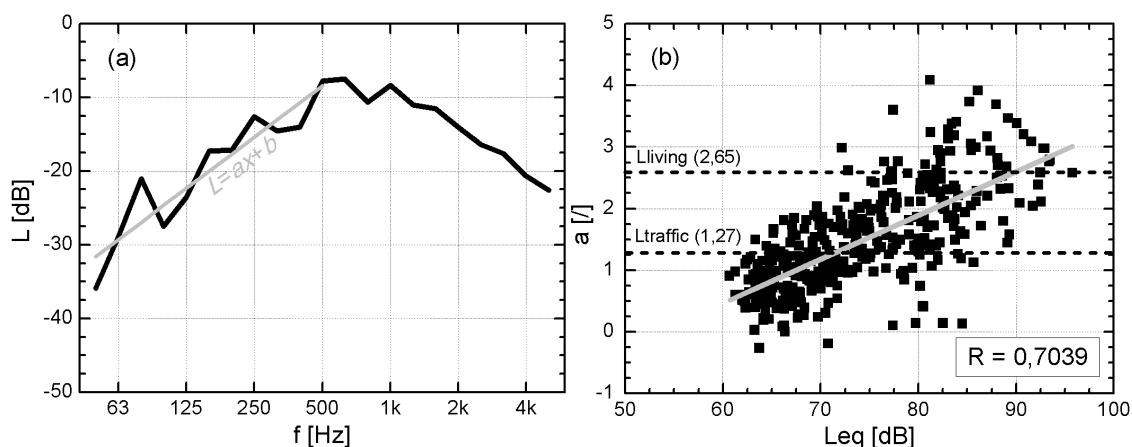


Slika 5.5. Izmereni spektri buke automobilskih sirena

5.1.3. Diskusija i zaključci

Iz sprovedene analize proizilazi da izvori saobraćajne buke viših nivoa teže da produkuju uže A-ponderisane spektre. Posebno važan u tom smislu je strmiji pad ovih spektara prema najnižim frekvencijama, jer je opadanje nivoa zvuka na visokim frekvencijama, kao posledica disipacije zvučne energije u vazduhu, karakterističan za spektre buke praktično svih izvora spoljašnje buke. Jedan od načina da se numerički predstavi oblik spektra na niskim frekvencijama je preko nagiba njegove linearne aproksimacije u logaritamskoj razmeri: $L = ax + b$, gde je L nivo zvuka u tercnom podopsegu f u dB, a x promenljiva proporcionalna $\log(f)$. Oblici spektara većine

snimljenih signala buke opravdavaju uvođenje linearne aproksimacije u opsegu od 50 Hz do 500 Hz, a primer jednog od spektara prikazan je na Slici 5.6 (a). Koeficijent a u tom slučaju predstavlja tangens ugla nagiba linearne aproksimacije spektra u zadanom opsegu frekvencija i stoji u obrnutoj srazmeri sa širinom spektra. Njegove vrednosti teorijski stoje u rasponu između 0 (ravan spektar) i $+\infty$ (nagli pad spektra ispod 500 Hz). Koeficijent a izračunat je za sve izmerene terčne spektre i njegove vrednosti date su na Slici 5.6 (b).



Slika 5.6. Korelacija između širine spektra i ekvivalentnog nivoa buke saobraćaja: (a) primer određivanja vrednosti koeficijenta a (b) korelacija između vrednosti koeficijenta a i ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke

Analizom su obuhvaćeni samo delovi snimljenih signala u onim vremenskim intervalima u kojima A-ponderisani nivo zvučnog pritiska prelazi 60 dB(A). Ukupno 376 takva bučna događaja izdvojena su celokupne baze snimaka. Slika 5.6 (b) prikazuje koeficijent a u funkciji ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke izdvojenih događaja, izračunatog korišćenjem „fast“ vremenske konstante. Na grafiku je prikazana i linearna aproksimacija ove zavisnosti metodom najmanjih kvadratnih odstupanja. Koeficijent korelacije dva parametra (R) iznosi oko 0,7, što ukazuje na visoku korelisanost širine spektra i ekvivalentnog nivoa buke. Radi poređenja, vrednosti koeficijenta a prikazane su i za dva referentna spektra: (širi) $L_{traffic}$ ($a = 1,27$) i (uži) L_{living} ($a = 2,65$), izračunati istom metodom. Sa grafika je evidentno da nagib spektra $L_{traffic}$ na niskim frekvencijama odgovara buci drumskog saobraćaja ekvivalentnog nivoa oko 70 dB(A), dok je intenzivnijoj buci (preko 80 dB(A)) primerenije korišćenje užeg spektra L_{living} .

Zaključak svega navedenog je da referentni spektar $L_{traffic}$ po obliku u najvećoj meri odgovara spektru buke u centralnoj gradskoj zoni Beograda, merenoj u dužim vremenskim intervalima, uz eventualno nešto više vrednosti u najnižim tercama. To znači da analiza realnog stanja buke pokazuje da ne postoji potreba za nekim korekcijama postojećeg sistema izračunavanja jednobrojnih vrednosti izolacione moći fasada.

Ipak, u slučaju nestacionarne buke i kratkotrajnih bučnih događaja, kao što su pojedinačni prolasci motocikala očekuje se znatno uži spektar. Viši ekvivalentni nivoi buke najčešće su prisutni kod uskih spektara. Samim tim, uži referentni spektar buke dao bi bolju ocenjenu vrednost zvučne izolacije fasadnih pregrada u slučaju ovakvih izvora buke. Činejnica je da su moticikli jedan specifičan, vrlo često prisutan izvor buke u gradskim ulicama, posebno u letnjem periodu. Otuda su ova prevozna sredstva često najznačajniji uzročnici uznemiravanja stanara bukom koja dospeva spolja.

6. Realizacija softvera za proračun zvučne izolacije

Predikcija zvučne izolacije u zgradama primenom nekog pogodnog matematičkog modela važan je istraživački postupak u oblasti građevinske akustike, a unapređenje tih postupaka predstavlja i temu ovog rada. Međutim, proračuni zvučne izolacije takođe su deo svakodnevne inženjerske prakse pri projektovanju zgrada. U tom procesu od akustičkog konsultanta se zahteva dovoljno tačna predikcija stanja izolacije koja će biti nakon izgradnje objekta da bi se u njemu zadovoljili uslovi akustičkog komfora. Zbog toga se može reći da za proračune zvučne izolacije u zgradama postoji širi krug zainteresovanih.

Pristup proračunu koji se primenjuje za predikciju zvučne izolacije menjao se tokom vremena u skladu sa razvojem matematičkih modela kojim se opisuje provođenja zvuka kroz sklopove pregradnih konstrukcija. U jednom dugom vremenskom periodu korišćene su metode proračuna zvučne izolacije koje se danas mogu označiti kao „pojnostavljene“. One su se zasnivale na matematičkom modelu provođenja zvuka kroz jednu izolovanu pregradu. To je kao rezultat dalo u teoriji poznat „zakon mase“, ranije opisan u poglavlju 3 ovog rada. Rezultati koji se dobijaju ovakvim jednostavnim teorijskim modelima upoređivani su sa rezultatima merenja pregrada u realnim uslovima, pa su na osnovu toga podešavane formule za proračun da bi se rezultat približio vrednostima koje se postižu u realnosti. U prethodnim decenijama pojavili su se računarski programi koji su služili projektantima za proračun zvučne izolacije prema ovakvom jednostavnom modelu.

U formiranju tih matematičkih modela polazilo se od pretpostavke da u pobudnoj i prijemnoj prostoriji vlada homogeno difuzno zvučno polje, sa poznatom statistikom incidencije zvuka na površinama pregrada kakvu definiše takozvani statistički model zvučnog polja. U realnosti takvi uslovi su u dovoljnoj meri zadovoljeni u prostorijama laboratorija za merenje zvučne izolacije i u običnim praznim prostorijama kada su potpuno prazne. U novije vreme postoje i rezultati istraživanja zvučne izolacije u okolnostima kada uslovi za homogeno i difuzno zvučno polje u prostorijama nisu ispunjeni.

Vremenom su razvijane unapređene metode proračuna zvučne izolacije koje se zasnivaju na kompleksnoj analizi putanja prolaska zvuka između susednih prostorija u

zgradama, što je detaljnije opisano u poglavlju 3. To uključuje ne samo uticaj provođenja direktne pregrade koja razdvaja prostorije između kojih se posmatra izolacija, što je bio slučaj u ranijem, pojednostavljenom pristupu, već se uračunava i indirektan prenos zvuka između tih prostorija bočnim provođenjem, kao i promene u izolacionim svojstvima pojedinačnih pregrada koje nastaju uticajem okruženja. Matematički modeli kojim se opisuju takvi procesi moraju biti složeni jer uključuju veliki broj parametara kako bi se obuhvatili svi relevantni akustički fenomeni povezani sa prostiranjem zvuka u zgradama. Takav proračun prolaska zvuka iz predajne prostorije svim postojećim putanjama i sabiranje rezultantnog polja u prijemnoj prostoriji uvodi numeričke procedure koje se ne mogu u praksi lako implementirati bez korišćenja nekih složenijih softverskih alata. Ako se tome doda činjenica da se proračun izolacije za svaku poziciju vrši po frekvencijama, po pravilu u tercama, jer su svi parametri frekvencijski zavisni, jasno je da se postupak proračuna ne može sprovesti bez primene nekog specijalizovanog softvera [Mašović et al., 2013 i; Mašović et al., 2013 j].

Tokom 2000. godine pojavili su se i međunarodni standardi u kojima su definisani algoritmi za proračun zvučne izolacije u zgradama koji na tako kompleksan način modeluju problem izolacije. To je serija standarda koji su dobili zajedničku oznaku EN 12354, sa delovima koji pokrivaju pojedine slučajeve proračuna izolacije koji se mogu javiti u zgradama. Ulazni podaci u ovim proračunima su zvučne izolacije pojedinačnih pregrada, dobijene laboratorijskim merenjima, od kojih je sastavljen sklop konstrukcije zgrade. Otuda i zajednički opšti naziv čitave serije standarda EN12354. „Ocena zvučne zaštite zgrada na osnovu akustičkih performansi građevinskih elemenata“. Ovde se pod elementima podrazumevaju pojedinačne građevinske pregrade (zidovi, tavanice), obloge, vrata, prozori i drugi građevinski elementi.

Uvođenje ovakvih normativa bilo je veoma značajno i za inženjersku praksu, jer su time stvoreni uslovi da se u procesu projektvanju zgrada na jedinstven način sprovodi predikcija izolacije. Ovi standardi su brzo prihvatani u nacionalnu standardizaciju mnogih zemalja, pri čemu je u nekima takav postupak u građevinskom projektovanju usvojen kao obavezan. Zbog toga se danas proračun zvučne izolacije postupkom definisanim u normama EN12354 može smatrati standardnom procedurom. Naporedo sa pojavom ovakve regulative na tržištu se pojavilo više softvera za proračun zvučne

izolacije zasnovanih na algoritmima iz ovih normativa [Insul, 2014; SONarchitect ISO, 2014; AcouBAT, 2014; Bastian, 2014].

Da bi se u okviru ovoga rada omogućilo detaljnije istraživanje u oblasti zvučne izolacije u zgradama napravljena je jedna verzija softvera za proračun na bazi algoritama prikazanih u dokumentima EN12354. Softver je realizovan u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu [URSA, 2014]. Izgled njegovog grafičkog interfejsa predstavljen je u Prilogu A. Izrada takvog softvera zahtevala je rešavanje nekih specifičnih zadataka. U nastavku su prikazani najvažniji među njima.

6.1. Osnovni koraci pri realizaciji softvera za proračun zvučne izolacije

Pri izradi softvera za proračun zvučne izolacije prema matematičkim modelima definisanim u EN12354 postoje neki opšti zahtevi, ali i problemi koje treba na odgovarajući način rešiti. U tom smislu, na startu se za svaki pojedinačni proračun zvučne izolacije definiše scenario tog postupka. To obuhvata sledeće korake:

- zadavanje međusobnog položaja predajne i prijemne prostorije (jedna iznad druge ili jedna pored druge),
- zadavanje dimenzija predajne i prijemne prostorije (ili samo prijemne prostorije u slučaju izolacije fasadnih pregrada) i
- zadavanje fizičkih svojstava svih relevantnih pregrada i dodatih elemenata na njima, ako oni postoje (obloge zidova i tavanice, prozori, vrata i slično).

Operacionalizacija ovih postupaka mora se realizovati adekvatnim korisničkim interfejsom koji je prilagođen potencijalnim korisnicima softvera. Na Slikama A.1-A.3 u prilogu vidi se način na koji je u realizovanom programu napravljeno grafičko rešenje ovog segmenta softvera.

Kompleksnost postupka proračuna najvećim delom proizilazi iz složenosti matematičkih modela. Pri tome, modeli definisani u dokumentima iz serije EN12354 razmatraju samo slučaj paralelopipednih prostorija i pravougaonih pregrada između njih. Svi ostali eventualni slučajevi koji se mogu ponekad javiti u praksi, poput spregnutih delova prostorija ili lučnih zidova, moraju se na neki način aproksimirati jednostavnim paralelopipednim geometrijskim modelom. Lučni zidovi se po pravilu aproksimiraju ravnim pravougaonim segmentima jednake ukupne površine. Međutim,

ukoliko je ugao prevoja veliki, kao na primer u uglu od 90 stepeni, to se smatra potpunim diskontinuitetom i za efektivnu površinu pregrade uzima se samo deo do prevoja. Ukoliko u pregradama postoje diskontinuiteti, poput dodatnih spojeva ili elemenata koji smanjuju njihovu efektivnu površinu (prozori, vrata), to se takođe mora uzeti u obzir i kroz korisnički interfejs uneti u softver.

Pri proračunu zvučne izolacije potreban je izvestan broj ulaznih parametara. To su u opštem slučaju:

- izolaciona svojstva zidova (R) i tavanica (R i L_n),
- doprinos izolacionoj moći pregrada zidnih obloga (ΔR), spuštenih plafona (ΔL), podnih obloga i plivajućih podova (ΔR i ΔL),
- izolaciona svojstva malih elemenata koji se mogu naći na pregradama (D_n),
- izolaciona svojstva dodatnih elemenata . prozora, vrata (R).

Relevantni podaci moraju biti poznati za sve pregrade koje pojavljuju u analiziranom sklopu unutar zgrade. U opštem slučaju izolacije između dve prostorije to su jedna zajednička i osam bočnih pregrada. Algoritmi definisani u EN12354 napravljeni su tako da kao ulazne podatke zahtevaju laboratorijski izmerene vrednosti izolacionih svojstava pregrada koje se nalaze u sklopu konstrukcija.

Jedan od praktičnih problema proizilazi iz činjenice da su nastali okolnosti u kojima za neke od pregrada nisu poznate stvarne vrednosti, bolje rečeno nisu lako dostupne u praksi s obzirom na veliki broj različitih materijala i konstrukcija koje se danas koriste u građevinarstvu. Da bi se takav problem prevazilazio u praksi, softver za proračun izolacije mora sadržati što veću prateću bazu podataka o opštim fizičkim i izolacionim svojstvima svih relevantnih građevinskih elemenata. Može se reći da veličina baze sa ovakvim podacima direktno određuje upotrebnu vrednost softvera u istraživačkom i projektantskom domenu. Primer izgleda baze podataka o izolacionim svojstvima elemenata u realizovanom softveru dat je u Prilogu A – Slika A.3.

Problem nastaje zbog toga što takve informacije nisu lako dostupne za sve vrste pregrada koje se mogu javiti u praksi. One si uglavnom vlasništvo brojnih proizvođača materijala koji finansiraju laboratorijska merenja svojih proizvoda, pa je njihovo prikupljanje dugotrajan posao. Ukoliko ih oni ne stavljaju na raspolaganje u vidu neke prospektne dokumentacije, pristup ovakvim podacima zavisi od direktnih kontakata sa proizvođačima građevinskih materijala kojih ima mnogo. Čak i tada, često su zbog

nerazumevanja dostupne samo jednobrojne, merodavne vrednosti izolacije umesto u ternim frekvencijskim podopsezima, što je neophodno za detaljni proračun prema standardu. S druge strane, postoje i nove vrste građevinskih materijala, kao što su na primer razni blokovi i drugi opekarski proizvodi čija su zvučna izolaciona svojstva retko merena u laboratoriji.

U gornjem spisku parametara kojim se iskazuju izolaciona svojstva pregrada, osim podataka o osnovnim pregradama i bazičnim materijalima od kojih su napravljene baza mora sadržati i podatke o izolacionim svojstvima ostalih relevantnih građevinskih elemenata koji figurišu u sklopovima konstrukcija, kao što su dodatne obloge (zidne i podne), spuštene tavanice, plivajući podovi, prozori i vrata (na fasadnim pregradama) i mali elementi (ventilacioni otvori i slično). Pri tome, doprinos dodatnih obloga povećanju izolacione moći zavisi od materijala osnovne pregrade na koju su postavljeni, kao i da li se radi o zajedničkoj ili bočnoj pregradi, pa i podaci mogu varirati od slučaja do slučaja na terenu. Ovi podaci su još teže nalaze u literaturi, ali i kod proizvođača. Najšeeće se mogu dobiti podaci za složene pregrade sa već uključenom oblogom (to jest jedinstvene vrednosti izolacione moći umesto odvojenih vrednosti izolacione moći osnovne pregrade R i doprinosa obloge ΔR , odnosno kao L_n i ΔL). To nije u skladu sa zahtevima matematičkih modela za proračun koji traže razdvojene vrednosti i . Jedino su podaci o vrednostima ΔL za razne plivajuće podove relativno dostupni, o čemu se staraju proizvođači materijala za mekane slojeve u njima. Doprinos spuštenih plafona povećanju izolacione moći tavanice i smanjenju nivoa zvuka udara takođe je veoma retko merena veličina.

Prikupljanje svih navedenih podataka radi formiranja baze u okviru programa predstavlja zahtevan zadatak od koga direktno zavisi njegova primenljivost u praksi. To je zadatak koji se ne završava sa finalizacijom softvera, već mora da bude permanentan kroz stalno dopunjavanje baze novim podacima. Nezavno od dopune podataka, zbog stalnih inovacija u građevinskim konstrukcijama i drugim relevantnim elementima korisniku se mora ostaviti mogućnost da sam dopunjuje bazu podacima o elementima koji u njoj nisu zastupljeni, kao što je i u sklopu redovnog održavanja softvera potrebno periodično osvežavati integrisanu bazu.

Uračunavanje bočnog prenosa i gubitaka unutar masivnih pregrada u realnim okolnostima na terenu podrazumeva poznavanje vrednosti izvesnog broja fizičkih

parametara kojim se detaljnije definiše ponašanje pregrada. Na primer, laboratorijske i *in situ* vrednosti strukturnog vremena reverberacije u pregradama još uvek su veoma retko merene veličine. Zbog toga se praktično u svim slučajevima moraju proračunavati na osnovu matematičkih formula (J3.4) i (J3.5). Međutim, one važe samo za pregrade pravougaonih oblika, pa se pregrade ostalih oblika moraju aproksimirati pravougaonim. Osim lučnih zidova i tavanica neparalelopipednih prostorija, bočne pregrade nepravilnog oblika mogu se javiti i u slučaju spregnutih prostorija. Čak i u najjednostavnijem slučaju pravougaonih pregrada, izračunavanje strukturnih vremena reverberacije iziskuje poznavanje vrednosti više retko merenih fizičkih parametara pregrada, kao što su brzine longitudinalnih talasa, faktora unutrašnjih gubitaka u njima i frekvencije ko incidencije. Kako prosečni korisnik softvera najčešće ne raspolaže svim ovim podacima, njihove vrednosti (ili procedure za njihovo izračunavanje) mora biti integrisan u sam softver na neki korisniku prilagođen način. Za manje dostupne parametre najčešće se moraju koristiti empirijske vrednosti koje se nužno razlikuju od realnih. Uticaj nepreciznosti ovih podataka na rezultat proračun zvučne izolacije još uvek je nedovoljno analiziran u postojećoj literaturi.

Uticaj bočnog prenosa zvuka između susednih prostorija zavisi od efikasnosti prenosa vibracija kroz spojeve sučeljenih pregrada, pre svega zajedničke pregrade sa bočnim, ali i svih ostalih spojeva pregrada prisutnih u sklopu. Taj proces se kvantifikuje vrednošću parametra koji je označen kao indeks prenosa. Ni ovoj veličini se do pojave međunarodnih standarda iz serije EN 12354 u literaturi nije pridavala velika pažnja. Za njegovo izračunavanje koriste se empirijske formule, slično kao i u slučaju ostalih manje dostupnih fizičkih parametara. U Aneksu E dokumenta EN 12354-1 predložena je jedna metoda za izračunavanje indeksa prenosa zvuka kroz spoj pregrada. Oblik formule koja se primenjuje zavisi od dva faktora:

- tipa spoja (kruti ili elastični, krstasti, T-spoj ili L-spoj) i
- vrste pregrada koje čine spoj (masivne homogene ili lake).

Pri proračunu je u softveru uvedena opcija da odabere tip svakog od relevantnih spojeva na ivicama prostorija, kojih ima ukupno 12. U prilogu su na Slici A.4 predstavljeni simbolički prikazi mogućih varijanti spojeva koji su uneti i u realizovani softver. To su simboli koji su preuzeti iz dokumenata EN12354. U empiriskom pristupu modelovanja prenosa zvuka na spojevima pregrada smatra se da su svi spojevi pravougaoni, kao i da

su pregrade u nastavku spoja (krstastog ili T-spoja) istog tipa. Jasno je da to ne odgovara uvek praktičnim okolnostima. Varijetet mogućih realizacija spojeva u praksi i spojenih pregrada uslovljava dalje aproksimacije modela. Za tip spoja treba usvojiti jedan od ponuđenih oblika koji ima najviše fizičkih sličnosti sa realno postojećim u zgradi.

Vrednost indeksa prenosa vibracija kroz spoj dve pregrade zavisi od odnosa njihovih površinskih masa. Ukoliko spoj čine tri ili četiri pregrade različitog tipa (to jest nejednake pregrade u nastavku spoja), za proračun se mora pristupiti pojednostavljenju scenarija. Pošto u literaturi ne postoji definisano neko optimalno rešenje za takve slučajeve, za površinske mase se mogu uzeti vrednosti od pregrada koje se nalaze neposredno na analiziranoj putanji prolaska zvuka. Drugo moguće rešenje je da se koristi srednja vrednost površinskih masa dve pregrade koje se nalaze u nastavku.

6.2. Prilagođenje softvera nacionalnoj regulativi i njegovoj primeni u projektovanju

Evropske norme pružaju standardizovan postupak predikcije zvučne izolacije i njegovo generalno tumačenje. Međutim, u svakoj državi oblast zvučne zaštite regulisana je nacionalnim normativima kroz koje se postavljaju lokalni zahtevi, kao što su minimalno dozvoljene vrednosti izolacije od vazdušnog i udarnog zvuka, margine sigurnosti u predikciji vrednosti izolacije, pa nekada čak i vizuelni izgled izveštaja o proračunu. Oni mogu biti posledica istorijskog nasleđa, lokalnih uslova i navika, pravnog sistema i slično. Softver koji je napravljen u okviru ovoga rada dobio je još jednu specifičnost – prilagođen je nacionalnoj regulativi za oblast zvučne zaštite u zgradama. To znači da se uz predikciju numeričkih vrednosti zvučne izolacije može dobiti i procena da li će analizirane zgrade zadovoljavati nacionalnu regulativu, to jest minimalne propisane kriterijume zvučne izolacije.

Prilagođavanje lokalnom tržištu i nacionalnim regulativama, kako bi služio kao alatka lokalnim projektantima, predstavlja dodatni izazov pri realizaciji softvera za proračun zvučne izolacije. Softver razvijen u okviru ovoga rada upravo je koncipiran da bude prilagođen nacionalnoj regulativi. U tom smislu su napravljene dve verzije softvera. Jedna verzija je prilagođena uslovima u Sloveniji i njenoj regulativi, jer je u njoj od 1. januara 2013. godine u fazi projektovanja obavezna izrada elaborata sa

proračunima zvučne izolacije u zgradama prema metodama definisanim u EN12354. Zahtevi regulative u Sloveniji navedeni su u nacionalnom dokumentu „*Tehnična smernica TSG-1-005:2012*“ [TSG-1-005:2012, 2012]. Stoga je verzija napravljenog softvera prilagođena ovom tržištu i regulativi u Sloveniji, gde postoji potreba za tim, a zatim i u Srbiji [URSA, 2014].

Korisnici za koje se prave takvi softveri, poput arhitekata i građevinskih inženjera, najčešće ne raspolažu temeljnim znanjima iz akustike koja bi im omogućila lakše snalaženje kroz matematičke procedure i dobijanje verodostojnijih rezultata. O tome se mora voditi računa pri kreiranju koncepta korisničkog interfejsa. Unos neophodnih ulaznih parametara i realizacija njegovog grafičkog okruženja moraju se prilagoditi planiranim korisnicima. Na autorima softvera je da sve nedorečenosti ili neodređenosti modela i specifične situacije koje se mogu javiti u praksi pojednostave i omoguće primenu matematičkih modela uz takva ograničenja uz što manje gubitke na tačnosti predikcije.

Uticaj lokalnih uslova na primenu proračuna zvučne izolacije može prepoznati na četiri nivoa, od kojih svaki postavlja nove izazove pri realizaciji softvera namenjenog datom lokalnom tržištu.

1. Prvi nivo predstavlja izbor deskriptora zvučne izolacije koji se koristi za definisanje minimalnih kriterijuma, pošto ni na nivou Evrope još uvek ne postoji jedinstven stav o najrelevantnijim jednobrojnim deskriptorima zvučne izolacije. Za vazdušni zvuk to, na primer, mogu biti: R'_w , $R'_w + C$ i $R'_w + C_{tr}$, a za zvuk udara L'_n .
2. Drugi nivo predstavlja izbor lokacija unutar zgrada za koje su propisani minimalni kriterijumi zvučne izolacije. Nacionalne regulative u principu sadrže jedan poseban dokument kojim se propisuju
 - relevantne lokacije (pregrade) u različitim tipovima građevinskih objekata za koje se postavljaju neki uslovi zvučne zaštite,
 - minimalni kriterijumi i
 - eventualna klasifikacija za svaku vrstu pregrade prema ostvarenoj zvučnoj izolaciji [TSG-1-005:2012, 2012; SRPS U.J6.201, 1990].

Pojedine evropske zemlje omogućavaju i kategorizaciju zgrada prema ostvarenom akustičkom komforu, zavisno od vrednosti usvojenih deskriptora izolacije.

3. Treći nivo čini odnos prema spoljašnjoj buci u proračunima izolacije fasadnih pregrada. Naime, minimalni kriterijumi zvučne izolacije fasadnih pregrada najčešće se definišu preko očekivanog nivoa spoljašnje buke i maksimalno dozvoljenog nivoa buke unutar zgrade. Prvi je najčešće utvrđen pripadnošću zgrade određenoj akustičkoj zoni, takođe definisanoj lokalnom regulativom, mada, u mnogim zemljama poput Republike Srbije, proces zoniranja još nije kompletiran ili je još u začetku. Kulturološke nacionalne razlike mogu usloviti i da se maksimalno dozvoljeni nivoi buke unutar zgrada mogu razlikovati među državama.
4. Četvrti nivo povezan je sa zastupljenošću određenih građevinskih materijala i konstrukcija u određenoj zemlji ili regionu. Na primer, poznato je da drvene konstrukcije u novije vreme dominiraju tržištem u nekim zemljama zapadne Evrope, dok je u drugim iz razloga seizmičke zaštite obavezna upotreba armiranog betona. Radi prilagođenja baze elemenata softvera lokalnoj građevinskoj praksi, atesti najčešće korišćenih pregrada i konstrukcija moraju biti uključeni u bazu. Ovi podaci dobijaju se od lokalnih proizvođača građevinskih elemenata. Takođe, u bazi moraju biti zastupljeni najčešće korišćeni građevinski materijali, poput betona, cigle, blokova i slično, kao i tipične konstrukcije, poput dvostrukih i trostrukih lakih pregrada. Slično, i tipične konstrukcije prozora, balkonskih vrata i okana moraju biti uvrštene u bazu elemenata.

Sve što je navedeno u okviru ovih tačaka, uz prilagođenje forme izveštaja lokalnim zahtevima, omogućava da se realizuje „nacionalno“ orijentisan softver za proračun zvučne izolacije. U njemu se osnov koriste opšteprihvaćeni matematički modeli, ali uz sve specifičnosti lokalnog tržišta i regulative.

6.3. Procedure primene softvera

Upotreba softvera se zasniva na njegovom grafičkom interfejsu. Dizajn interfejsa je organizovan da bi se lakše prošlo kroz ceo postupak od unosa neophodnih parametara do izrade finalnog izveštaja sa dobijenim rezultatima proračuna. Projektantska primena softvera zahtevala je da se takav korisnik oslobodi uvida u matematičke procedure proračuna. Tako je na kraju usvojena realizacija korisničkog interfejsa za unos osnovnih podataka o projektu zasnovana na seriji sukcesivnih prozora

koji su prikazani u Prilogu A (Slike A.5 i A.6). Za projektantsko korišćenje i izradu elaborata zvučne zaštite predviđeno je unošenje osnovnih podataka o zgradi kao što su naziv objekta za koji se vrši proračun, njegova lokacija, akustička zona kojoj pripada, odabrani podaci o investitoru i projektantu itd. (Slika A.5 u prilogu). U uvodnoj fazi takođe se definišu svi tipovi prostorija, odnosno pregrada koji se moraju analizirati proračunom i uneti u elaborat (Slika A.6).

Ulazne podatke za svaki od pojedinačnih proračuna (scenarija) unosi korisnik. Kao što je navedeno, oni obuhvataju dimenzije prostorija, osnovne materijale (strukturu) svih pregrada, dodatnih obloga, malih i ostalih elemenata iz baze elemenata, tipove svih spojeva itd. Nakon unošenja svih neophodnih parametara i izvršavanja proračuna, potrebno je prikazati rezultate u vidu jednobrojnih merodavnih vrednosti izolacije. Ovi rezultate zatim treba uporediti sa zakonski propisanim minimalnim kriterijumima iz nacionalne regulative, kako bi se eksplicitno pokazalo da li prediktovane vrednosti zvučne izolacije zadovoljavaju propisane zahteve ili ne (Slika A.7). Na proračunate vrednosti moguće je dodati prethodno definisanu marginu sigurnosti kako bi se povećala pouzdanost procene stanja.

Na kraju, korisniku softvera se omogućava da rezultate proračuna predstavi u odgovarajućoj grafičkoj formi. Pri tome, u projektantskoj primeni ovog softvera može se naići na zahtev da se rezultati proračuna prikazuju u nekoj zadatoj formi koja je propisana nacionalnom regulativom. U takvim okolnostima u softveru je usvojeno rešenje za predstavljanje rezultata proračuna koje je prikazano u Prilogu A na Slici A.8. Ono što se predstavlja kao izlaz iz proračuna je:

- dimenzije predajne i prijemne prostorije,
- podaci o svim relevantnim pregradama koje čine sklop susednih prostorija između kojih se izračunava zvučna izolacija,
- izračunate vrednosti odgovarajućeg parametra zvučne izolacije (R , D ili L) u 1/3 oktavnim frekvencijskim opsezima (tabelarno i grafički)
- merodavna vrednost izračunatog parametra zvučne izolacije
- ocena stanja prema nacionalnoj regulativi,
- usvojena margina sigurnosti s kojom je izvršena ocena stanja.

Da bi se olakšala njegova primena u projektovanju, softver ima opciju da se na kraju napravi zbirni tabelarni prikaz merodavnih vrednosti svih izračunatih parametara

zvučne izolacije za pozicije koje su analizirane u projektu na kome se radi. Primer jednog takvog prikaza predstavljen je na desnom delu Slike A.8 u Prilogu A. To olakšava poređenje izračunatih merodavnih vrednosti sa zakonski propisanim kriterijumima za sve proračunom obuhvaćene pozicije u zgradi i izvođenje zaključka o postignutoj zvučnoj zaštiti u projektovanom objektu.

7. Analiza uticaja pojedinih parametara na rezultate proračuna zvučne izolacije

Proračun zvučne izolacije zasniva se na kvantifikovanju toka zvučne energije između prostorija u zgradama. Da bi se to postiglo, potrebno je modelovati fizičke procese koje se dešavaju na tom putu, kao što su strukturni prenos zvučne energije kroz pojedinačne građevinske elemente prostorija (zajedničke i bočne pregrade), vazdušni prenos kroz otvore na pregradama, slabljenje zvučne energije u čvrstim materijalima od kojih su pregrade napravljene, slabljenje na spojevima pregrada i slično. Zbog toga proračuni zvučne izolacije u zgradama, poput SEA ili standardizovanog EN 12354, imaju izvestan broj ulaznih fizičkih parametara kojim se karakterišu građevinski materijali i akustičkih parametara kojim se modeluju procesi.

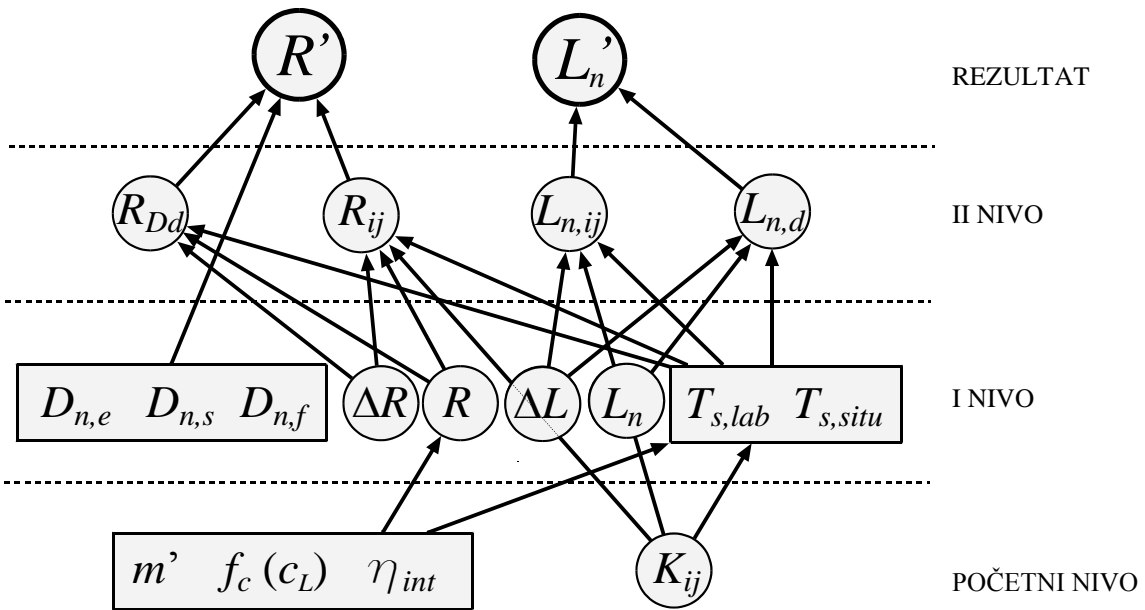
Slika 7.1 napravljena za potrebe ovog rada šematski prikazuje parametre koji se pojavljuju u postupku proračuna zvučne izolacije, sve do konačnog rezultata. Predstava polazi od osnovnih fizičkih deskriptora pregrada i spojeva koji se nalaze u najnižem, početnom nivou dijagrama, prema višim nivoima parametara u međurezultatima, sve do konačnog rezultata proračuna R' i L'_n prikazanih na najvišem nivou šeme. Strelice na slici ukazuju na međusobne zavisnosti parametara.

Najniži nivo podataka sadrži parametre kojim se opisuju fizičke osobine materijala i spojeva. To su poršinska masa pregrada m' , frekvencija koincidencije pregrada f_c , faktor unutrašnjih gubitaka u materijalu pregrada η_{int} i indeks prenosa vibracija na spojevima pregrada K_{ij} .

Na I nivou šeme nalaze se ulazni podaci proračuna zvučne izolacije prema klasičnom modelu. To su standardno (laboratorijski ili terenski) merene vrednosti izolacionih moći (R) zajedničke i bočnih pregrada, normalizovanih nivoa zvuka udara (L_n) pada predajne prostorije i eventualnog doprinosa dodatnih slojeva (zidnih i podnih obloga, plivajućih podova i spuštenih tavanica – ΔR i ΔL). Na II nivou nalaze se izračunate vrednosti koje definišu stanje izolacije na pojedinim putanjama prolaska zvučne energije između prostorija.

Strelice ukazuju na uticaje parametara sa donjih nivoa dijagrama na one koji su na višim nivoima. Na primer, bočni prenosi, izraženi vrednostima R_{ij} i $L_{n,ij}$, u opštem slučaju zavise od laboratorijskih vrednosti izolacionih moći pojedinačnih pregrada, ali i

indeksa prenosa vibracija (K_{ij}) spojeva svih pregrada koje učestvuju u bočnom prenosu, i to na dva načina – zbog slabljenja energije vibracija prolaskom kroz spoj zajedničke i bočne pregrade i posredno preko vrednosti strukturnog vremena reverberacije u dve pregrade koje prave spoj. Strelice takođe pokazuju od kojih parametara zavise konačni rezultati proračuna prikazani na najvišem nivou dijagrama.



Slika 7.1. Šematski prikaz parametara koji figurišu u klasičnom proračunu zvučne izolacije

Tačnost predikcije izolacije proračunom na prvom mestu zavisi od tačnosti pojedinačnih parametara prikazanih na slici. Svaki ulazni parametar unosi u proračun nesigurnost sopstvene vrednosti, usvojene, empirijske ili izmerene [Gerretsen, 1979]. Otežavajuću okolnost predstavlja i činjenica da vrednosti pojedinih parametara neophodnih za proračun često nisu dostupne u praksi, posebno njihove realne, terenske vrednosti. Tome treba dodati da za neke veličine nema pouzdanih procedura merenja, kao na primer za indeks prenosa vibracija ili za faktor unutrašnjih gubitaka. U takvim slučajevima mora se pribеći teorijskim modelima ili empirijski ustanovljenim vrednostima. Te vrednosti mogu značajno odstupati od realnih, što nesumnjivo utiče na tačnost rezultata proračuna. Iz tog razloga se u standardima EN 12354 daje i preporuka da se vrednosti ulaznih parametara pri svakom proračunu variraju, kako bi se stekao

uvid u eventualne varijacije izračunatih vrednosti zvučne izolacije i tako procenila njihova pouzdanost.

Cilj analiza koje su opisane u ovom poglavlju je kvantifikovanje uticaja vrednosti pojedinih ulaznih fizičkih parametara na rezultat proračuna zvučne izolacije prema klasičnom modelu. Dobijeni rezultati treba da pomognu pri proceni greške predikcije koja nastaje kao posledica nesigurnosti ulaznih parametara. Takođe, date su i neke preporuke kojima se može postići veća pouzdanost proračuna i koje mogu služiti kao korisna smernica pri predikciji zvučne izolacije u zgradama.

7.1. Uticaj osnovnih fizičkih parametara pregrada

U ovom delu rada analiziran je uticaj pojedinih osnovnih fizičkih parametara kojima se karakterišu materijali pregrada na rezultate proračuna zvučne izolacije.

7.1.1. Analizirani parametri i postavke proračuna

Najpre je analiziran uticaj osnovnih fizičkih parametara materijala građevinskih pregrada i spojeva između njih, čije terenske vrednosti (osim u slučaju gustine materijala pregrade) najčešće nisu dostupne u praksi [Mašović et al., 2013 c, Mašović et al., 2013 d, Mašović et al., 2013 e]. To su:

- gustina materijala pregrada (ρ),
- brzina longitudinalnih talasa (c_L),
- faktor unutrašnjih gubitaka (η_{int}) i
- indeks prenosa vibracija (K_{ij}).

Indeks prenosa vibracija još uvek je retko merena veličina. Bazirana je na razlici nivoa energija vibracija pregrade koja čine spoj. Ova veličina dominantno određuje slabljenje zvučne energije usled prolaska kroz spojeve pregrada i time može da ima dvostruku ulogu u proračunu – pri određivanju bočnog prenosa između zajedničke i njoj susednih pregrada, kao i *in-situ* vrednosti strukturnog vremena reverberacije masivnih elemenata.

Za potrebe analize, usvojen je referentni scenario dve susedne (predajne i prijemne) paralelopipedne prostorije. Dimenzije obe prostorije su jednake – $5 \times 4 \times 2,7 \text{ m}^3$, a razmatrana su oba slučaja susednih prostorija – jedna pored druge (zajednički

zid) i jedna iznad druge (zajednička tavanica). Prostorije nisu smaknute, tako da se svi bočni elementi predajne prostorije nastavljaju na bočne elemente prijemne prostorije. Sve pregrade – zajednička i osam bočnih – su betonske (masivne i homogene), debljine 16 cm. Glavni razlog za to je što masivne pregrade ujedno čine i dominantnu većinu građevinskih elemenata u zgradama u Republici Srbiji [Mijić et al., 2012]. Vrata i prozori i ostali dodatni građevinski elementi poput dodatnih obloga i ventilacionih otvora nisu obuhvaćeni proračunima. U realnim slučajevima, vrata i prozori često su sastavni deo bočnih pregrada, ali je njihov uticaj na rezultate proračuna zanemarljiv, budući da se ogleda samo kroz smanjenje efektivne površine bočnih pregrada. Svi spojevi između elemenata su kruti i krstasti.

Za početne vrednosti fizičkih parametara korišćene su vrednosti iz Tabele 3.2 za betonske pregrade: $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ (odavde, za debljinu pregrade od 16 cm, $m' = 368 \text{ kg/m}^2$), $c_L = 3500 \text{ m/s}$ (frekvencija koincidencije prema formuli (J3.3) iznosi $f_c = 114,7 \text{ Hz}$) i $\eta_{int} = 0.006$. Ipak, ove vrednosti svakako mogu varirati u realnim okolnostima, zavisno od unutrašnje strukture materijala i izvedbe građevinskih elemenata na terenu. Vrednosti parametra K_{ij} prema Aneksu E norme EN 12354 iznose 8,7 dB za sve putanje kroz krute krstaste spojeve elemenata jednakih površinskih masa, u svim frekvencijskim podopsezima.

Rezultati proračuna dati su u vidu merodavnih vrednosti deskriptora zvučne izolacije od vazdušnog zvuka – građevinske izolacione moći (R'_w) i zvuka udara – normalizovanog nivoa zvuka udara ($L'_{n,w}$). Vrednosti su najpre izračunate za referentni scenario prostorija jedna pored druge i jedna iznad druge, a zatim i sa variranim vrednostima ulaznih parametara. Poređenjem tako dobijenih vrednosti zvučne izolacije sa referentnim slučajem, procenjena su odstupanja koja se javljaju u rezultatima proračuna kao posledica varijacije ulaznih parametara.

Vrednosti svakog od ulaznih parametara varirane su nezavisno, kako bi se njihov uticaj izolovao od uticaja ostalih parametara. U realnosti, veličine kao što su gustina materijala i brzina longitudinalnih talasa ili faktor unutrašnjih gubitaka međusobno su zavisne. Nezavisno variranje analiziranih parametara, međutim, treba da ukaže na to koji parametri imaju najveći uticaj na rezultate i čije se vrednosti moraju pažljivije tretirati pri proračunima, kao i koliko bi eventualno devijacija njihovih vrednosti uticala na izračunate merodavne vrednosti zvučne izolacije.

Vrednosti ulaznih parametara varirane su na dva načina. Najpre su parametri posmatrani kao slučajne promenljive sa Gausovom raspodelom, sa srednjim vrednostima jednakim navedenim vrednostima usvojenim za referentni scenario i promenljivim vrednostima standardnih devijacija. Na ovaj način je ispitan uticaj eventualnih nesigurnosti merenja ulaznih parametara na rezultate proračuna izolacije. Izolacione moći svih pregrada i normalizovani nivoi zvuka udara tavanica izračunati su korišćenjem jednačina (J3.2b) i (J3.6), respektivno, tako da je uticaj analiziranih parametara gustine materijala (ρ), brzine longitudinalnih talasa (c_L) i faktora unutrašnjih gubitaka (η_{int}) dvostruk – na izolaciona svojstva pregrada (R , L_n) i strukturna vremena reverberacije ($T_{s,lab}$ i $T_{s,situ}$) svih homogenih pregrada. Treba napomenuti da su u praksi, laboratorijske vrednosti zvučne izolacije elemenata po pravilu dostupne iz zvaničnih atesta proizvođača građevinskih elemenata, pa se i uticaj analiziranih parametara uglavnom manifestuje samo kroz vrednosti strukturnih vremena reverberacije masivnih pregrada. Primenom *Monte Carlo* simulacija uz 1000 ponavljanja, dobijen je skup isto toliko izračunatih vrednosti izolacije. U Tabeli 7.1 date su vrednosti standardnih devijacija (*std1* do *std5*) ulaznih parametara. Za svaki parametar usvojeno je pet različitih vrednosti standardne devijacije u ekvidistantnim razmacima.

Nasuprot mernoj nesigurnosti, pri korišćenju empirijskih formula i vrednosti pojedinih parametara, svakako je moguća pojava sistematskog odstupanja ovih vrednosti od stvarnih. To posebno važi za retko dostupne parametre, kao što su brzina longitudinalnih talasa, faktor unutrašnjih gubitaka i indeks prenosa vibracija. Odstupanja u fizičkim karakteristikama realnih materijala u odnosu na teorijske modele, način izrade građevinskih elemenata i spojeva na terenu, kao i tačnost empirijskih vrednosti i formula uzrokuju pojavu sistematskog odstupanja korišćenih vrednosti parametara u odnosu na stvarne. U skladu sa tim, vrednosti posmatranih ulaznih parametara varirane su, osim prema Gausovoj raspodeli, i konstantnim pomerajima u određenom opsegu za sve pregrade (odnosno spojeve u slučaju K_{ij}) i posmatrana je promena izračunatih vrednosti R'_w i $L'_{n,w}$. U ovom slučaju, parametri izolacije elemenata (R i L_n) izračunati su samo jednom, prema jednačinama (J3.2b) i (J3.6), i nakon toga tretirani kao konstante, tako da vrednosti analiziranih parametara utiču samo na laboratorijska i terenska strukturna vremena reverberacije masivnih elemenata. Zatim su izračunate razlike između vrednosti zvučne izolacije dobijenih nakon promene

vrednosti svakog od posmatranih parametara i referentnog slučaja. Usvojeni ekvidistantni pomeraji vrednosti analiziranih parametara dati su u Tabeli 7.2. Tabela daje opseg pomeraja od najnižeg negativnog (ΔI) do najvišeg pozitivnog (ΔII) i korak između dva sukcesivna pomeraja (Δ) za svaki od parametara (X). Ukupno je posmatrano 11 vrednosti pomeraja za svaki od parametara, pri čemu $\Delta 6$ odgovara nultom pomeraju, odnosno referentnom slučaju.

Tabela 7.1. Usvojene vrednosti standardnih devijacija analiziranih parametara

X	$std1$	$std2$	$std3$	$std4$	$std5$
ρ [kg/m ³]	25	50	75	100	125
c_L [m/s]	100	200	300	400	500
η_{int} [/]	0.00100	0.00125	0.00150	0.00175	0.00200
K_{ij} [dB]	1	2	3	4	5

Tabela 7.2. Usvojene vrednosti sistematskih odstupanja analiziranih parametara

X	ΔI	ΔII	Δ
ρ [kg/m ³]	-375	375	75
c_L [m/s]	-1000	1000	200
η_{int} [/]	-0.005	0.005	0.001
K_{ij} [dB]	-10	10	2

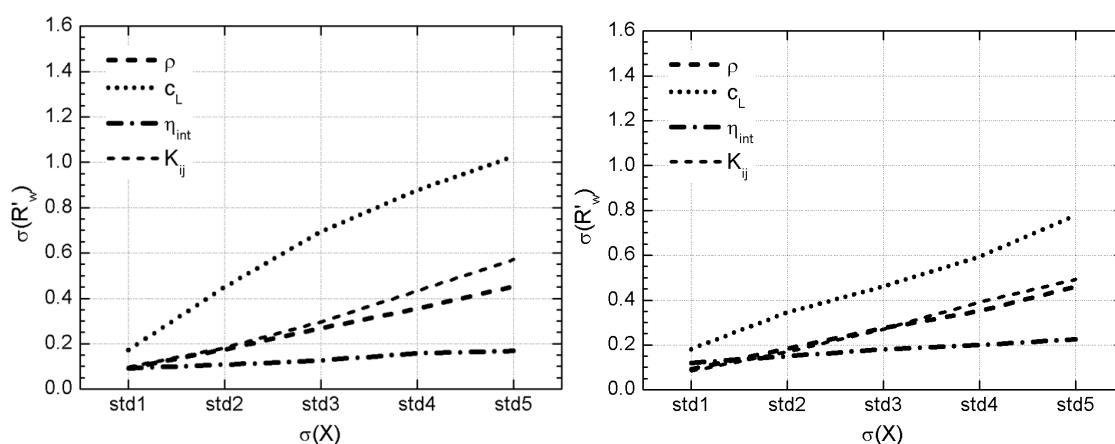
7.1.2. Rezultati i diskusija

Na Slikama 7.2 i 7.3 date su vrednosti standardne devijacije deskriptora R'_w i $L'_{n,w}$, respektivno, za slučaj prostorija sa zajedničkim zidom i zajedničkom tavanicom, kao posledica varijacija ulaznih parametara, slučajnih promenljivih sa usvojenim vrednostima standardnih devijacija. Radi sažetijeg prikaza, grafici prikazuju rezultate za sve analizirane ulazne parametre istovremeno, a na apscisama su date vrednosti standardnih devijacija definisane u Tabeli 7.1. Kako su vrednosti standardnih devijacija izabrane proizvoljno, sa grafika se parametri ne mogu međusobno porediti prema uticaju na rezultate proračuna zvučne izolacije, ali prikazani rezultati pružaju uvid u očekivane fluktuacije izračunatih vrednosti R'_w i $L'_{n,w}$. Posebno veliki uticaj na promene vrednosti izlaznih parametara imaju varijacije indeksa prenosa vibracija u slučaju

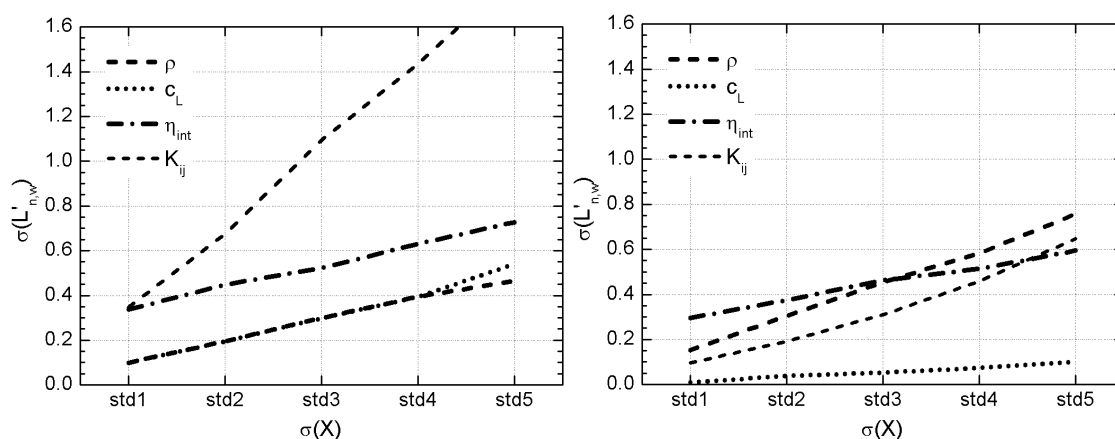
horizontalno postavljenih prostorija, jedna pored druge (Slika 7.3 levo). Uzrok za to je u činjenici da u takvim okolnostima ne postoji direktan prenos udarnog zvuka kroz zajedničku pregradu, već samo bočnim putanjama, od kojih su dve dominante – od poda u predajnoj prostoriji prema zajedničkom zidu i od poda u predajnoj prema podu u prijemnoj prostoriji. Obe navedene putanje prolaze kroz isti spoj zajedničke pregrade, pa vrednosti K_{ij} na tim putanjama imaju odlučujući uticaj na proračunate vrednosti $L'_{n,w}$. U svim ostalim slučajevima standardna devijacija vrednosti R'_w i $L'_{n,w}$ ne prelazi 1 dB. Radi poređenja, 2 dB se navodi u normama EN 12354 kao očekivana standardna devijacija odstupanja proračunatih vrednosti od realnih, koja je posledica nepreciznosti klasičnog modela. Iz navedenog sledi da razumne varijacije vrednosti analiziranih ulaznih parametara, koje mogu nastati, na primer, usled nesigurnosti merenja (pod pretpostavkom Gausove raspodele), ne utiču u velikoj meri na rezultate proračuna izolacije prema klasičnom modelu, u poređenju sa očekivanom tačnošću samog matematičkog modela proračuna.

U nastavku su analizirane promene rezultata proračuna kao posledica sistematskih odstupanja vrednosti ulaznih parametara. Slika 7.4 prikazuje razlike izračunatih jednobrojnih vrednosti izolacije od vazdušnog i udarnog zvuka za susedne prostorije sa zajedničkim zidom ili tavanicom, koje nastaju promenom vrednosti gustine materijala svih pregrada prema Tabeli 7.2 u odnosu na referentni scenario. Kako su ulazne izolacione karakteristike svih elemenata (R i L_n) konstantne, gustina materijala utiče na rezultate proračuna samo preko procenjenih laboratorijskih vrednosti strukturnih vremena reverberacije elemenata. Gustina materijala, odnosno površinska masa, neophodna je za proračun energetskih gubitaka duž spojeva elemenata (jednačina (J3.4)), koji su obrnuto proporcionalni strukturnom vremenu reverberacije (jednačina (J3.5)). *In situ* strukturno vreme reverberacije takođe zavisi od gustine materijala, ali samo preko odnosa površinskih masa elemenata, koji figurišu u formulama za indeks prenosa vibracija navedenim u Aneksu E norme EN 12354-1. Ovaj odnos je jednak jedinici u svim analiziranim scenarijima, jer svi elementi, prema postavkama proračuna, imaju isti osnovni materijal i debljinu, a time i površinsku masu. Usled takvog ograničenog udela gustine materijala u proračunu, izračunate devijacije merodavnih vrednosti izolacije od vazdušnog (R'_w) i udarnog zvuka ($L'_{n,w}$) su male, ispod 0,5 dB čak i za

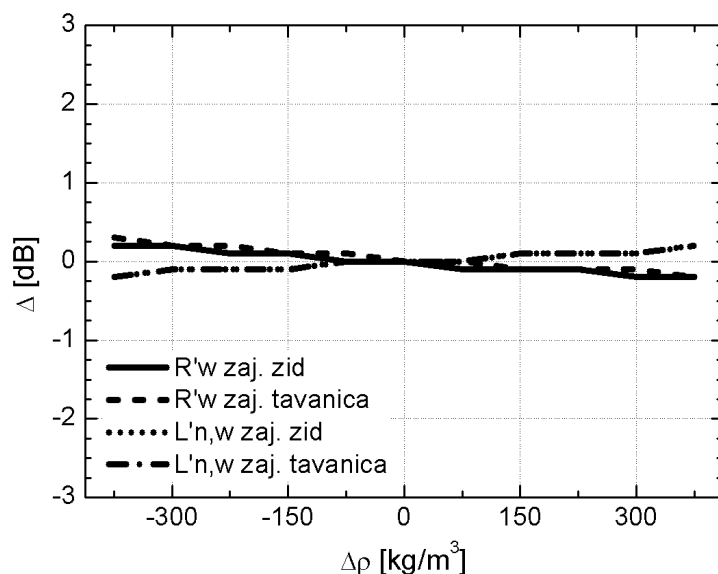
znatne promene gustine materijala od $\pm 375 \text{ kg/m}^3$, što u analiziranim slučajevima predstavlja oko 16% vrednosti ρ . Ne postoji evidentna razlika u rezultatima između slučajeva prostorija jedna do druge i jedna iznad druge. Kako pozitivna odstupanja gustine daju nešto niže vrednosti izolacije (niže vrednosti R'_w , odnosno više vrednosti $L'_{n,w}$), ukoliko postoji izvesna nesigurnost u proceni vrednosti gustine građevinskih elemenata, mogu se usvojiti njihove nešto više vrednosti u odnosu na očekivane, kako bi se u proračun uvela dodatna margina sigurnosti dobijenih vrednosti.



Slika 7.2. Uticaj standardne devijacije vrednosti ulaznih parametara na izračunatu vrednost zvučne izolacije od vazdušnog zvuka, levo – zajednički zid, desno – zajednička tavanica



Slika 7.3. Uticaj standardne devijacije vrednosti ulaznih parametara na izračunatu vrednost zvučne izolacije od zvuka udara, levo – zajednički zid, desno – zajednička tavanica

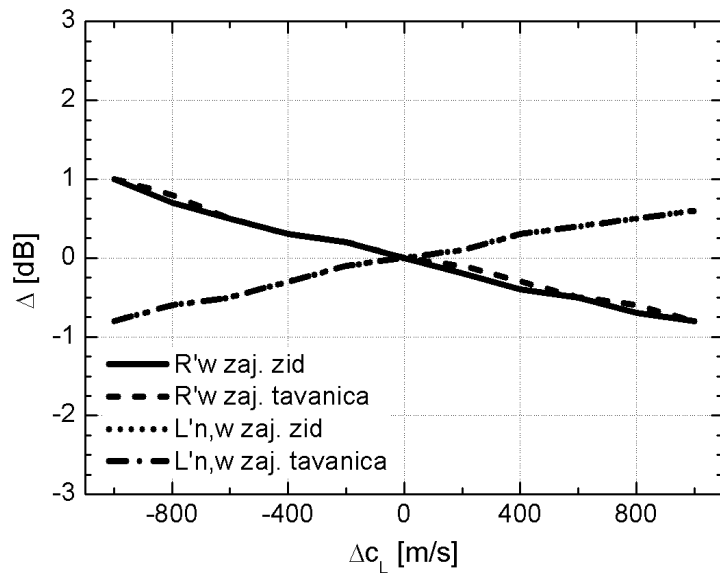


Slika 7.4. Uticaj promene vrednosti gustine materijala na izračunatu vrednost zvučne izolacije

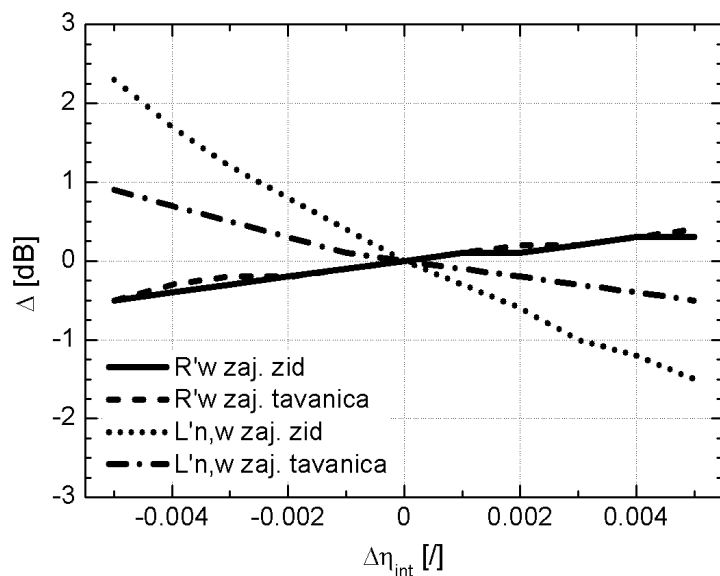
Kao i u slučaju gustine materijala, brzina longitudinalnih talasa utiče na izračunate vrednosti zvučne izolacije preko strukturnog vremena reverberacije. Kako se njena vrednost najčešće koristi za procenu frekvencije ko incidencije pregrada prema jednačini (J3.3), i gubici usled zračenja elemenata i gubici na graničnim ivicama elemenata zavise od brzine longitudinalnih talasa (jednačina (J3.4)). Izračunata odstupanja vrednosti R'_w i $L'_{n,w}$ u odnosu na referentni slučaj data su na Slici 7.5 i naizgled su nešto veća nego u slučaju gustine materijala. Ipak, promene vrednosti brzine longitudinalnih talasa od čak 1000 m/s (28,5% u analiziranim slučajevima) potrebne su da bi krajnje vrednosti izolacije bile promenjene za ± 1 dB. Ni u ovom slučaju ne postoji značajna razlika između scenarija sa prostorijama jedna pored druge i jedna iznad druge. Radi dodatne margine sigurnosti u proračunima, mogu se koristiti nešto više vrednosti u odnosu na očekivane.

Slika 7.6 prikazuje promene vrednosti R'_w i $L'_{n,w}$ usled sistematskih odstupanja vrednosti faktora unutrašnjih gubitaka u materijalima građevinskih elemenata. Čak i promene u vrednosti η_{int} od $\pm 0,003$ (čak 50% početne vrednosti) uzrokuju varijacije jednobrojnih vrednosti izolacije od svega oko ± 1 dB. Odstupanja su nešto veća u slučaju izolacije od zvuka udara, posebno između prostorija jedna pored druge, mada se u opštem slučaju ne očekuje značajan uticaj

vrednosti faktora na rezultate proračuna. Kako više vrednosti η_{int} daju niže vrednosti zvučne izolacije, radi uvođenja dodatne margine sigurnosti, očekivane vrednosti faktora unutrašnjih gubitaka mogu se umanjiti pri proračunu.



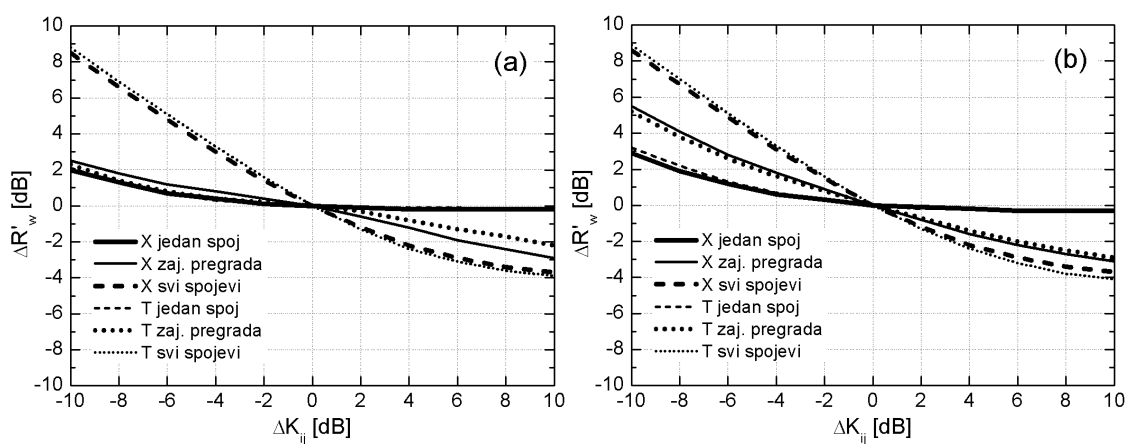
Slika 7.5. Uticaj promene vrednosti brzine longitudinalnih talasa na izračunatu vrednost zvučne izolacije



Slika 7.6. Uticaj promene vrednosti faktora unutrašnjih gubitaka na izračunatu vrednost zvučne izolacije

Vrednosti indeksa prenosa vibracija zavise od tipa spoja. U ovoj analizi

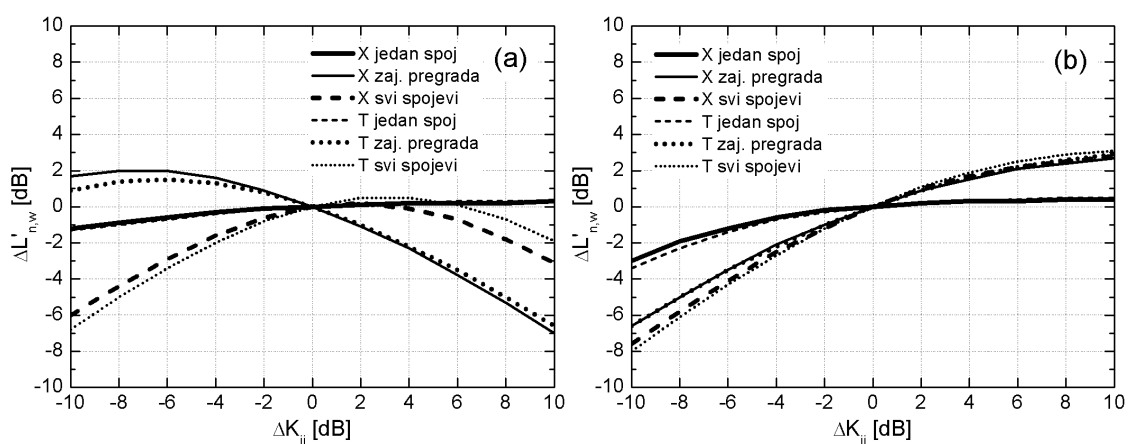
posmatrani su kruti krstasti (ovde skraćeno označen kao X-spoj) i kruti T-spoj. Prema Aneksu E standarda EN 12354-1, u slučaju susednih elemenata jednakih površinskih masa, vrednost indeksa prenosa vibracija svih putanja kroz spoj koji oni čine iznosi 8,7 dB za krstasti spoj, odnosno 5,7 dB za T-spoj u svim frekvencijskim podopsezima i ove vrednosti odgovaraju usvojenim referentnim slučajevima za dva tipa spoja. Takođe, za razliku od ostalih spojeva, četiri spoja zajedničke pregrade utiču kako na strukturno vreme reverberacije same zajedničke pregrade, tako i na bočni strukturni prenos. Iz tog razloga, vrednosti parametra K_{ij} varirane su najpre na jednom spoju zajedničke pregrade (na njenoj kraćoj strani), zatim na sva četiri spoja zajedničke pregrade istovremeno i na kraju na svim spojevima svih elemenata koji učestvuju u proračunu. Kako su analizirana dva tipa spoja (krstasti i T-spoj), to ukupno čini šest početnih, referentnih scenarija. Svi ostali spojevi koji nisu obuhvaćeni varijacijama su kruti krstasti spojevi. Rezultirajuće promene vrednosti parametara izolacije date su na Slici 7.7 za vazdušni zvuk i Slici 7.8 za udarni zvuk.



Slika 7.7. Uticaj promene vrednosti indeksa prenosa vibracija na izračunatu vrednost izolacije od vazdušnog zvuka između prostorija sa (a) zajedničkim zidom, (b) zajedničkom tavanicom

Indeks prenosa vibracija ima znatno veći uticaj na izračunate vrednosti zvučne izolacije u poređenju sa ostalim analiziranim ulaznim fizičkim parametrima proračuna. U slučaju izolacije od vazdušnog zvuka nema veće razlike između scenarija sa prostorijama jedna pored druge i prostorijama jedna iznad druge. Povećanje početnih

vrednosti K_{ij} uzrokuje niže vrednosti R'_w , pa je za uvođenje dodatne margine sigurnosti poželjno usvojiti nešto više vrednosti indeksa prenosa vibracija svih relevantnih spojeva. Ovo je takođe u saglasnosti sa podacima u literaturi [Schiavi et al., 2010; Crispin et al., 2004], prema kojima standardizovane empirijske formule za proračun vrednosti indeksa (EN 12354-1, Aneks E) daju nekoliko decibela niže vrednosti od realnih. Sa druge strane, rezultati proračuna izolacije od udarnog zvuka znatno više zavise od vrednosti indeksa prenosa vibracija spojeva kada prostorije imaju zajednički zid nego kada imaju zajedničku tavanicu.



Slika 7.8. Uticaj promene vrednosti indeksa prenosa vibracija na izračunatu vrednost izolacije od udarnog zvuka između prostorija sa (a) zajedničkim zidom, (b) zajedničkom tavanicom

U slučaju prostorija jedna iznad druge (zajednička tavanica), više vrednosti K_{ij} zajedničkih spojeva znače i manje rasipanje zvučne energije na putanjama od tavanice prema bočnim zidovima prostorija, a time i povećani direktan prenos i više konačne vrednosti $L'_{n,w}$. Ovo ne važi za prostorije sa zajedničkim zidom, kada su predajna i prijemna prostorija jedna pored druge i ne postoji direktan prenos zvuka udara kroz zajedničku pregradu. Tada izolacija zavisi isključivo od strukturnog prenosa kroz bočne pregrade – od poda predajne prostorije ka zajedničkom zidu i podu prijemne prostorije i samo jednog spoja – donjeg spoja zajedničkog zida. Više vrednosti K_{ij} ponovo ukazuju na slabiji bočni prenos, ali, usled nedostatka direktnog prenosa, to istovremeno znači i da će ukupan prenos energije od predajne ka prijemnoj prostoriji biti slabiji i vrednost

$L'_{n,w}$ niža. Zavisnost $L'_{n,w}$ od K_{ij} u ovom slučaju nije monotona, kao što se vidi na Slici 7.8. (a).

Prema podacima iz literature (videti poglavlje 3.2.1), prosečna razlika između stvarnih i empirijskih vrednosti indeksa prenosa vibracija iznosi oko 5 dB. Prema ovde prikazanim rezultatima, smanjenje vrednosti K_{ij} za 5 dB može uzrokovati povećanje izračunate vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka (R'_w) do 4 dB, ukoliko se promena vrednosti izvrši na svim spojevima svih pregrada. U suprotnom, ukoliko se sve vrednosti K_{ij} povećaju za 5 dB, očekivane su oko 3 dB niže vrednosti R'_w . U slučaju zvuka udara, promene indeksa prenosa vibracija od ± 5 dB uzrokuju promene vrednosti $L'_{n,w}$ od ± 3 dB. U principu, ne postoji veća razlika između krutih krstastih i T-spojeva u smislu uticaja promene vrednosti K_{ij} na rezultate proračuna. To se može objasniti sličnošću dva tipa spoja i činjenicom da vrednosti indeksa prenosa vibracija za oba tipa ne zavise od frekvencije.

7.1.3. Zaključci

Iz svega navedenog sledi da je uticaj vrednosti gustine materijala, brzine longitudinalnih talasa i faktora unutrašnjih gubitaka na proračun zvučne izolacije prema klasičnom modelu znatno manji (ispod 1 dB) u poređenju sa vrednostima indeksa prenosa vibracija (do nekoliko decibela), u razumnim opsezima varijacija vrednosti parametara. Stoga se, radi uvođenja dodatne margine sigurnosti proračunom dobijenih vrednosti izolacije (kako realne vrednosti ne bi bile premašene), preporučuje usvajanje oko 5 dB viših vrednosti indeksa prenosa vibracija u odnosu na očekivane, odnosno proračunate prema formulama datim u Aneksu E norme EN 12354. Izuzetak može biti proračun izolacije od udarnog zvuka između prostorija jedna pored druge, mada se i u tom slučaju povećanjem vrednosti K_{ij} može obezbediti dodatna margina sigurnosti. Ovo je posebno važno kada se ima u vidu da su analizirani parametri retko merene veličine u praksi i da tačnost empirijskih formula za proračun indeksa prenosa vibracija još uvek nije potpuno potvrđena. Ipak, do sveobuhvatnijih zaključaka može se doći proširivanjem analiza i na slučajeve prostorija različitih dimenzija, različitih osnovnih materijala pregrada (kao na primer lakih, dvostrukih pregrada) i tipova spojeva.

7.2. Uticaj izolacije bočnih pregrada

U najvećem broju slučajeva proračuna zvučne izolacije u zgradama, direktan prenos ima dominantan uticaj u odnosu na bočni prenos i presudno određuje ukupnu izolaciju između prostorija [Gerretsen, 1979]. Cilj sledećeg istraživanja je da proceni udeo izolacionih moći (R) bočnih pregrada u vrednostima izolacije od vazdušnog i udarnog zvuka, proračunatim prema klasičnom modelu [Mašović et al., 2013 f; Mašović et al., 2013 g].

7.2.1. Analizirane pregrade i postavke proračuna

Predajna i prijemna prostorija su jednakih dimenzija $5 \times 4 \times 2,7 \text{ m}^3$, pri čemu su za slučaj izolacije od vazdušnog zvuka tretirana oba scenarija – prostorija jedna pored druge i jedna iznad druge. Za proračune izolacije od udarnog zvuka analiziran je samo scenario prostorija jedna iznad druge, koji je daleko češće prisutan u regulativi kojom se definišu minimalni kriterijumi zvučne izolacije u zgradama [SRPS U.J6.201, 1990] od slučaja prostorija jedna pored druge.

Najpre su analizirane samo masivne zajedničke i bočne pregrade i to osam tipova betonskih pregrada (zidova i tavanica) različitih površinskih masa i debljina, a njihove osnovne fizičke i izolacione karakteristike date su u Tabeli 7.3. U Prilogu B (Tabele B.1 do B.8) date su frekvencijske karakteristike izolacije i ostali relevantni parametri pregrada. Sve bočne pregrade načinjene su od istog osnovnog materijala, jednake debljine, a svi spojevi pregrada su kruti krstasti spojevi. Dodatni elementi poput zidnih i podnih obloga, plivajućih podova, malih elemenata, vrata i prozora nisu razmatrani. Svaki pojedinačni proračun obuhvata jednu kombinaciju tipova zajedničke i svih ostalih, bočnih pregrada.

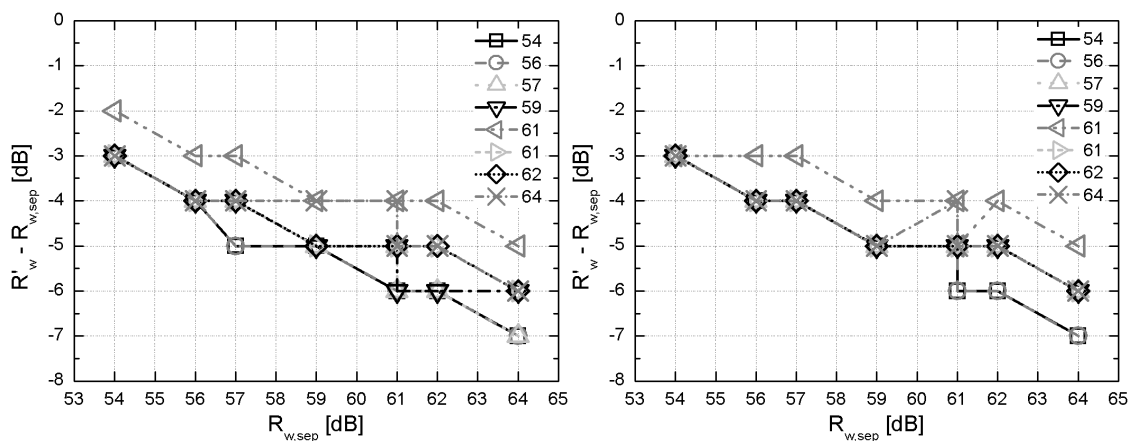
7.2.2. Rezultati i diskusija

Slike 7.9 i 7.10 prikazuju izračunata smanjenja zvučne izolacije usled bočnog prenosa, kao razlike merodavnih vrednosti građevinske izolacione moći (R'_w) i izolacione moći zajedničke pregrade ($R_{w,sep}$) za vazdušni zvuk, odnosno merodavnih

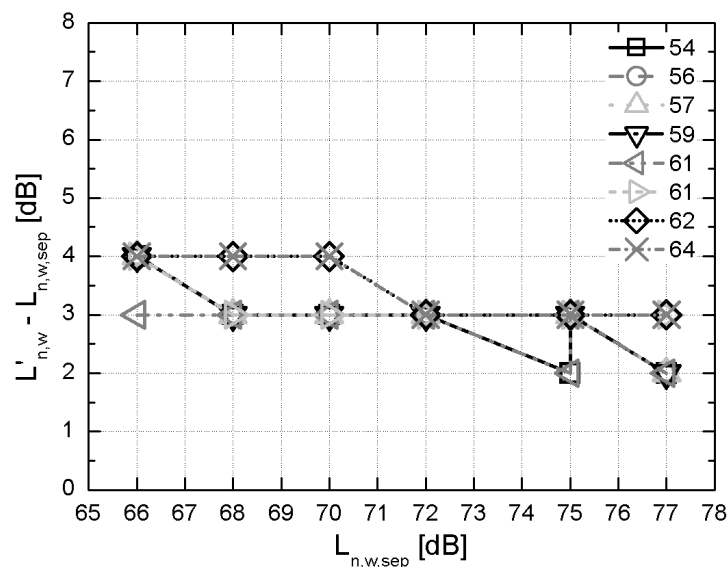
vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara ($L'_{n,w}$ i $L_{n,w,sep}$ zajedničke tavanice). Razlike su date u funkciji merodavne izolacione moći zajedničkog zida ili tavanice za vazdušni zvuk, odnosno normalizovanog nivoa zvuka udara zajedničke tavanice za udarni zvuk. Krive na graficima date su za različite vrednosti merodavnih izolacionih moći bočnih pregrada iz Tabele 7.3. Na primer, „54“ predstavlja betonski zid ili tavanicu debljine 14 cm i površinske mase 325 kg/m², sa vrednošću $R_w = 54$ dB. Dva analizirana elementa imaju jednaku merodavnu vrednost izolacione moći ($R = 61$ dB), pri čemu, kao i u Tabeli 7.3, prvi naveden ima površinsku masu $m' = 400$ kg/m², a drugi $m' = 470$ kg/m².

Tabela 7.3. Debljina, površinska masa, merodavne vrednosti izolacione moći i normalizovanog nivoa zvuka udara (za tavanice) analiziranih masivnih elemenata

t	m'	R_w	$L_{n,w}$
14 cm	325 kg/m ²	54 dB	77 dB
14 cm	400 kg/m ²	56 dB	77 dB
16 cm	375 kg/m ²	57 dB	75 dB
18 cm	425 kg/m ²	59 dB	72 dB
16 cm	400 kg/m ²	61 dB	75 dB
20 cm	470 kg/m ²	61 dB	70 dB
22 cm	515 kg/m ²	62 dB	68 dB
24 cm	565 kg/m ²	64 dB	66 dB



Slika 7.9. Smanjenje izolacije od vazdušnog zvuka usled bočnog prenosa u zavisnosti od izolacionih karakteristika zajedničke i bočnih pregrada, za prostorije jedna do druge (levo) i jedna iznad druge (desno)



Slika 7.10. Smanjenje izolacije od zvuka udara usled bočnog prenosa u zavisnosti od izolacionih karakteristika zajedničke tavanice i bočnih zidova, za prostorije jedna iznad druge

U slučaju izolacije od vazdušnog zvuka, ne postoji značajnija razlika u rezultatima između prostorija sa zajedničkim zidom i prostorija sa zajedničkom tavanicom. Maksimalno dobijene razlike (± 1 dB) koje se javljaju za pojedine kombinacije tipova pregrada mogu se objasniti razlikama u dimenzijama i površinama zajedničke i bočnih pregrada, u zavisnosti od položaja predajne i prijemne prostorije, kao i činjenicom da su izračunate vrednosti pritom zaokružene na najbližu celobrojnu vrednost. Slične razlike javljaju se i između rezultata za dva analizirana tipa masivnih elemenata jednakih merodavnih vrednosti izolacione moći ($R_w = 61$ dB), usled razlike u njihovim površinskim masama. Rezultati pokazuju da kada su zajednička i bočne pregrade istog tipa, proračunata razlika između merodavnih vrednosti izolacione moći zajedničke pregrade i građevinske izolacione moći, kao posledica bočnog prenosa, iznosi oko 4-5 dB. Za lakše homogene elemente ($R_w = 54$ dB), razlika iznosi 3 dB, dok za masivne ($R_w = 64$ dB) iznosi i do 6 dB. Kada su bočni elementi značajno masivniji od zajedničkog, smanjenje izolacije je svega 2 dB, dok u suprotnom slučaju, kada bočni elementi imaju manju površinsku masu od zajedničkog, razlika može iznositi i do 7 dB.

U slučaju izolacije od zvuka udara, varijacije razlike između građevinske ($L'_{n,w}$) i laboratorijske vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara zajedničke tavanice ($L_{n,w,sep}$) znatno su manje. U proseku ova razlika iznosi 3 dB. Nešto veće vrednosti

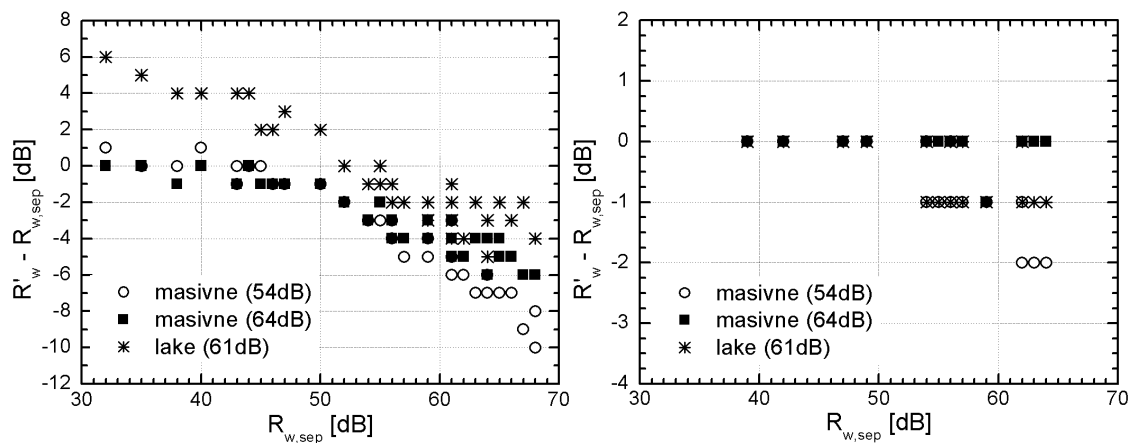
dobijene su za visoko izolacione tavanice (niskih vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara), usled povećanog uticaja bočnog prenosa. Takođe, više vrednosti razlike $L'_{n,w} - L_{n,w,sep}$ dobijene su za više vrednosti R_w bočnih elemenata. Objašnjenje za to nalazi se u samom matematičkom modelu proračuna izolacije od zvuka udara i jednačini (J3.20). Povećana vrednost izolacione moći homogenih bočnih pregrada najčešće implicira i njihovu veću površinsku masu, što dalje uzrokuje veću vrednost indeksa prenosa vibracija sa zajedničke na bočne pregrade i smanjuje ukupan bočni prenos. Istovremeno to znači da više energije zvuka udara ostaje u zajedničkoj tavanici i biva izračeno u prijemnu prostoriju kroz direktan prenos, što povećava vrednost nivoa zvuka udara.

Kao dopuna prethodnim rezultatima, u sledećoj analizi uticaja bočnog provođenja na jednobrojnu vrednost izolacije od vazdušnog zvuka između prostorija razmatrano je 38 različitih masivnih (homogenih), kao i 16 lakih (gipsanih) zajedničkih pregrada. Merodavne vrednosti izolacionih moći homogenih zajedničkih pregrada variraju između 32 dB i 68 dB, a gipsanih između 39 dB i 64 dB. Za bočne pregrade izabrana su tri tipa elemenata:

- masivne betonske pregrade merodavne izolacione moći $R_w = 54$ dB,
- masivne betonske pregrade merodavne izolacione moći $R_w = 64$ dB i
- lake gipsane pregrade merodavne izolacione moći $R_w = 61$ dB.

Kao i u prethodnoj analizi, u svakom pojedinačnom proračunu svim bočnim pregradama dodeljen je isti materijal. Svi spojevi između pregrada su kruti krstasti spojevi, a dodatne obloge na pregradama, prozori, vrata i mali elementi, poput ventilacionih otvora, nisu uključeni u proračune. Predajna i prijemna prostorija su jednakih dimenzija ($5 \times 4 \times 2,7$ m³) i bez smicanja, pri čemu je razmatran samo slučaj prostorija jedna pored druge, to jest, prostorija sa zajedničkim zidom.

Izračunate razlike merodavnih vrednosti građevinske izolacione moći (R'_w) i izolacionih moći zajedničkih pregrada ($R_{w,sep}$) prikazane su na Slici 7.11. Na oba grafika razlika je data u funkciji merodavne izolacione moći zajedničke pregrade, za sve tri razmatrane vrste bočnih pregrada odvojeno – masivne (54 dB), masivne (64 dB) i lake (61 dB).



Slika 7.11. Smanjenje izolacije od vazdušnog zvuka između prostorija jedna do druge usled bočnog prenosa u zavisnosti od izolacionih karakteristika zajedničkog zida i bočnih elemenata: levo – masivne zajedničke pregrade, desno – lake zajedničke pregrade

Što je vrednost izolacione moći bočnih pregrada niža (u poređenju sa zajedničkim zidom), njihov doprinos bočnom provođenju, odnosno smanjenju ukupne građevinske izolacione moći je veći. Velike razlike u površinskim masama i izolacijama zajedničkog i bočnih elemenata mogu usloviti i do čak 10 dB niže merodavne vrednosti građevinske izolacione moći u odnosu na merodavnu vrednost izolacione moći zajedničke pregrade (Slika 7.11 levo). Ovakav trend je takođe u skladu sa rezultatima prethodne analize, prikazanim na Slici 7.9. Sa Slike 7.11 desno evidentno je da je uticaj bočnog prenosa manji u slučaju lake zajedničke pregrade. Samo za izolacione moći lakih zajedničkih pregrada iznad 60 dB, i homogene bočne pregrade niže izolacione moći od 54 dB dobijene su razlike od 2 dB između merodavnih laboratorijskih i građevinskih vrednosti izolacione moći. U najvećem broju slučajeva, spojevi sa zajedničkom lakom pregradom ne utiču na bočni prenos, posebno prema masivnim bočnim pregradama. Velika razlika u površinskim masama između susednih elemenata onemogućava efikasan prenos zvučne energije kroz spoj. Sa druge strane, za visoke vrednosti izolacione moći lakih bočnih pregrada i niske vrednosti izolacione moći zajedničke homogene pregrade (na primer razlike veće od 10 dB na levoj strani grafika na Slici 7.11 levo), proračuni čak pokazuju povećanje građevinske vrednosti izolacije u odnosu na laboratorijsku vrednost. Ovo može biti posledica neprilagođenosti empirijskih formula za izračunavanje indeksa prenosa vibracija u ekstremnim

slučajevima veoma lakih homogenih elemenata, kada bočne gipsane pregrade mogu imati čak i veću površinsku masu od tanke homogene zajedničke pregrade. U realnim okolnostima po pravilu se očekuje niža vrednost građevinske izolacione moći od laboratorijski izmerene izolacione moći zajedničke pregrade. Prema graphicima na Slici 7.11, za analizirane masivne zajedničke i lake bočne pregrade ova razlika iznosi do 4 dB, a za sve masivne bočne pregrade ona iznosi do između 6 dB (bočne masivne pregrade sa $R_w = 64$ dB) i 10 dB (bočne masivne pregrade sa $R_w = 54$ dB).

7.2.3. Zaključci

Rezultati sprovedenih analiza nesumnjivo pokazuju da je uticaj izolacionih svojstava bočnih pregrada na proračunatu merodavnu vrednost zvučne izolacije veći kada zajednički element (zid ili tavanica) ima visoko izolaciona svojstva. Smanjenje građevinskih vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka u odnosu na laboratorijske vrednosti zajedničkog elementa varira između 2 dB i 7 dB. U slučaju izolacije od zvuka udara ove razlike su manje – oko 3 dB. Sa porastom razlike između izolacionih moći zajedničke i bočnih pregrada raste i uticaj bočnog provođenja na ostvarenu zvučnu izolaciju između prostorija. Odatle sledi da povećanjem izolacije zajedničke pregrade dobici u ukupnoj izolaciji između predajne i prijemne prostorije postaju srazmerno manji, ukoliko ono nije istovremeno praćeno povećanjem izolacione moći bočnih pregrada. Međutim, čak i u slučaju svih elemenata visokih izolacionih performansi, dalje povećanje njihovih izolacionih moći uzrokuje i povećanje bočnog prenosa, što će ograničiti ukupno poboljšanje izolacije. Na primer, za sve elemente izolacionih moći iznad 60 dB, očekivane su oko 5 dB niže terenske vrednosti građevinske izolacione moći. Za niže vrednosti izolacionih moći pregrada, očekuje se manja razlika između terenske i laboratorijske vrednosti, ali i niža apsolutna vrednost ostvarene izolacije.

7.3. Uticaj spojeva zajedničke pregrade sa bočnim pregradama

Aneks E norme EN 12354-1 definiše empirijske formule za proračun indeksa prenosa vibracija za nekoliko tipova spojeva – krute i elastične krstaste, T i L-spojeve. To znači da tipovi spojeva koje zajednička pregrada gradi sa bočnim imaju, preko

indeksa prenosa vibracija, dvojak uticaj na rezultate proračuna zvučne izolacije prema klasičnom modelu. Oni najpre određuju udeo zvučne energije koji će biti prenet bočnim putem ka prijemnoj prostoriji, a time i doprinos bočnog prenosa smanjenju izolacije. Sa druge strane, vrednosti indeksa prenosa vibracija spojeva zajedničke homogene pregrade takođe utiču na proračun *in situ* vrednosti njenog strukturnog vremena reverberacije, jer kvantifikuju gubitke koji nastaju kao posledica širenja energije ka ostalim pregradama. Cilj ovog dela rada je da, nakon uticaja izolacionih karakteristika bočnih elemenata, ispita uticaj tipova spojeva između zajedničke i bočnih pregrada na izračunate vrednosti zvučne izolacije u zgradama [Mašović et al., 2013 h].

7.3.1. Analizirani tipovi spojeva i postavke proračuna

Postavke proračuna već su date u poglavlju 7.2.1. Analizirano je osam tipova homogenih zajedničkih i bočnih pregrada, sa osnovnim karakteristikama datim u Tabeli 7.3 i izolacionim karakteristikama datim u Prilogu B (Tabele B.1 do B.8). Za razliku od prethodne analize, sve pregrade u svim proračunima načinjene su od istog osnovnog materijala (merodavne izolacione moći $R_{w,sep}$), a varirani su tipovi spojeva na zajedničkoj pregradi, pri čemu su sva četiri spoja istog tipa. Analizirana su četiri tipa spojeva:

- kruti krstasti spoj – *krut X*
- elastični krstasti spoj – *elast. X (s)* i *elast. X (f)*
- kruti T-spoj – *krut T* i
- elastični T-spoj – *elast. T (s)* i *elast T (f)*,

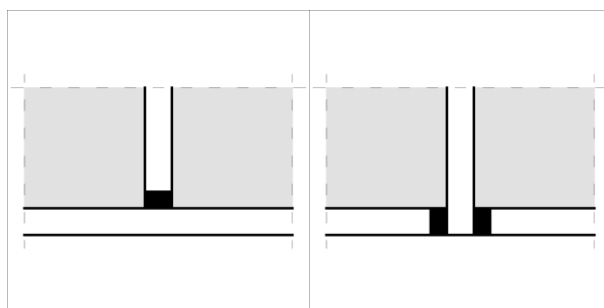
gde (s) i (f) označavaju poziciju elastičnog elementa spoja – na zajedničkoj ili bočnoj pregradi, respektivno.

Primer T-spojeva prikazan je na Slici 7.12. Svi ostali spojevi bočnih pregrada su kruti krstasti spojevi. Dodatne zidne i podne obloge, plivajući podovi, mali elementi, prozori i vrata nisu obuhvaćeni analizom.

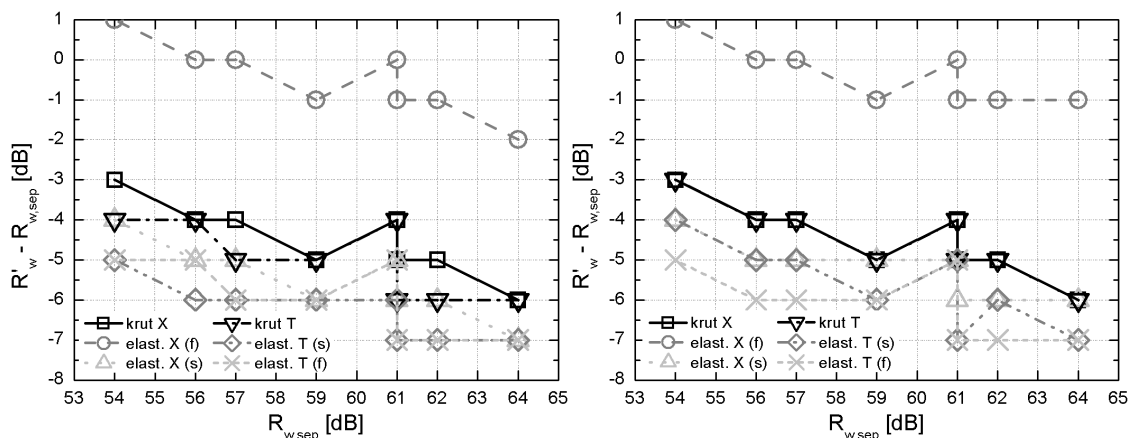
7.3.2. Rezultati

Slika 7.13 ponovo prikazuje smanjenje izolacije od vazdušnog zvuka usled bočnog prenosa kao razliku vrednosti R'_w i $R_{w,sep}$, u funkciji merodavne izolacione moći

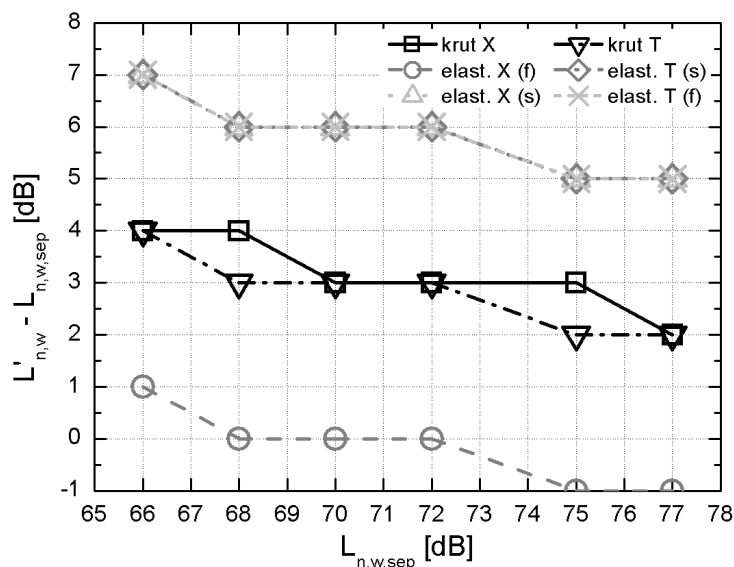
zajedničke i svih bočnih pregrada, za četiri razmatrana tipa spojeva zajedničke pregrade. Slično tome, Slika 7.14 prikazuje smanjenje izolacije od zvuka udara, kao razliku $L'_{n,w}$ i $L_{n,w,sep}$ u funkciji merodavne vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara zajedničke tavanice, za navedena četiri tipa spojeva. U slučaju izolacije od vazdušnog zvuka, ne postoji značajna razlika između rezultata za prostorije jedna pored druge i prostorije jedna iznad druge. Kao i u prethodnim analizama, razlike od ± 1 dB mogu se objasniti drugačijim dimenzijama i površinama zajedničkog i bočnih elemenata u dva slučaja i zaokruživanjem jednobrojnih vrednosti na najbližu celobrojnu vrednost. Takođe, razlike u rezultatima za dva tipa elemenata jednakih izolacionih moći ($R_w = 61$ dB) nastaju zbog razlike u njihovim površinskim masama (Tabela 7.3).



Slika 7.12. Elastični T-spoj: levo – *elast. T (s)*, desno – *elast. T (f)*



Slika 7.13. Smanjenje izolacije od vazdušnog zvuka usled bočnog prenosa u zavisnosti od izolacione moći pregrada i tipa spojeva zajedničke pregrade, za prostorije jedna do druge (levo) i jedna iznad druge (desno)



Slika 7.14. Smanjenje izolacije od zvuka udara usled bočnog prenosa u zavisnosti od merodavnog normalizovanog nivoa zvuka udara zajedničke tavanice i tipa spojeva zajedničke pregrade, za prostorije jedna iznad druge

7.3.3. Diskusija i zaključci

Zavisno od tipa spojeva, razlika između jednobrojne laboratorijske i građevinske vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka iznosi između -1 dB i 7 dB, odnosno -7 dB i 1 dB u slučaju zvuka udara. Najviše vrednosti izolacije postižu se elastičnim krkastim spojevima između zajedničke i bočnih pregrada. Ipak, ovo važi samo ako se elastični elementi nalaze na bočnim pregradama (spojevi obeleženi kao *elast. X (f)*). Na ovaj način dobijene su oko 4 dB više jednobrojne vrednosti izolacije u poređenju sa krutim krkastim spojevima, pri čemu su sva četiri spoja, teorijski, zamenjena elastičnim. Nasuprot tome, postavljanje elastičnih spojeva na zajedničku pregradu (spojevi *elast. X (s)*), smanjuju ukupnu izolaciju između prostorija u odnosu na krute krstaste spojeve za oko 1 dB u slučaju vazdušnog zvuka, odnosno oko 3 dB u slučaju zvuka udara. Objašnjenje je u činjenici da kada se elastični element nalazi na zajedničkoj pregradi, zvučna energija koja pogađa zajedničku pregradu sa predajne strane ne propagira u susedne pregrade već mahom biva izračena u prijemnu prostoriju. Istovremeno, bočne pregrade predajne prostorije se bez mehaničkih diskontinuiteta nastavljaju u bočne pregrade prijemne prostorije, što omogućuje nesmetani prenos energije bočnim putevima. Slično važi i za krute i elastične T-spojeve, s tim da su

dobijene razlike između *elast. T (s)* i *elast. T (f)* spojeva manje i obe vrste spoja daju niže vrednosti izolacije u odnosu na krute T-spojeve. Za sve tipove spojeva, veće razlike između laboratorijskih i građevinskih vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka i zvuka udara dobijene su za zajedničke elemente sa visokim izolacionim performansama. To još jednom pokazuje da udeo bočnog prenosa raste sa povećanjem laboratorijske vrednosti izolacije zajedničkog elementa.

8. Analiza razlika jednobrojnih vrednosti parametara proračunatih korišćenjem detaljnog i pojednostavljenog modela

Kao alternativa detaljnom klasičnom modelu, za proračun zvučne izolacije u zgradama može se koristiti pojednostavljeni model opisan u poglavlju 3.2.3. Umesto proračuna vrednosti izolacije u svim frekvencijskim podopsezima pojedinačno, pojednostavljeni model omogućava direktno izračunavanje jednobrojnih, merodavnih vrednosti deskriptora izolacije na osnovu jednobrojnih vrednosti ulaznih parametara. Takođe, uticaj bočnog prenosa, kao i razlike laboratorijskih i terenskih izolacionih karakteristika građevinskih elemenata uračunati su samo aproksimativno. Jedna od primena pojednostavljenog modela je i u situacijama kada se ne raspolože frekvencijski zavisnim izolacionim karakteristikama građevinskih elemenata, već samo njihovim jednobrojnim vrednostima.

Zbog svoje jednostavne softverske implementacije, pojednostavljeni model lako nalazi primenu u praksi. Često skupi komercijalni softveri za proračun izolacije prema detaljnom modelu mogu se tada zameniti posebno kreiranim svedenijim aplikacijama za proračun prema pojednostavljenom modelu. Međutim, potencijalni problem koji se možd javiti je razlika između rezultata dva modela pri identičnim scenarijima zvučne izolacije, kao posledica uvedenih pojednostavljenja i aproksimacija. Ove razlike ispitivane su u nastavku ovog poglavlja za različite postavke proračuna, vrste pregrada prostorija i spojeva između njih. Na osnovu toga, u sledećem poglavlju su analizirane i mogućnosti uvođenja još jednostavnijih aproksimativnih formula, kojim bi se omogućila početna estimacija vrednosti deskriptora zvučne izolacije, a čije se vrednosti ne bi u velikoj meri razlikovale od vrednosti dobijenih pomoću prethodna dva modela.

Prema navodima iz standarda EN 12354, datim takođe u poglavlju 3.2.4, tačnost pojednostavljenog modela proračuna izolacije približno je jednaka tačnosti detaljnog modela uz moguću pojavu blagog sistematskog odstupanja prema višim vrednostima u slučaju izolacije od vazdušnog zvuka. Iz toga sledi da dva modela u najvećem broju slučajeva daju sličan konačan rezultat u vidu jednobrojne merodavne vrednosti izolacije, uz eventualno nešto više vrednosti u slučaju pojednostavljenog modela. Ipak,

pojedina istraživanja [Manuel de Abreu Dias, 2009; Mašović et al., 2014 a; Mašović et al., 2014 b] pokazuju znatno veće razlike u rezultatima dva modela. Cilj ovog dela istraživanja bio je da ispita razlike dobijenih jednobrojnih vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka i zvuka udara korišćenjem detaljnog i pojednostavljenog klasičnog modela. Analize su izvršene za različite tipove zajedničke i bočnih pregrada (homogene i lake pregrade različitih izolacionih performansi), kao i različite tipove spojeva (kruti i elastični krstasti i T-spojevi) zajedničke pregrade sa bočnim.

8.1. Postavke proračuna

Za potrebe analiza posmatrane su nesmaknute predajna i prijemna prostorija jednakih dimenzija ($4 \times 5 \times 2,7 \text{ m}^3$). Za proračun izolacije od vazdušnog zvuka razmatrana su oba slučaja prostorija jedna pored druge (zajednički zid je dimenzija $4 \times 2,7 \text{ m}^2$) i jedna iznad druge, dok je za proračun izolacije od zvuka udara razmatran samo slučaj prostorija jedna iznad druge. Kako su prema EN 12354, pojednostavljeni proračuni pre svega namenjeni slučaju homogenih pregrada, one su dominantno zastupljene u analizama, mada su u određenoj meri analizirane i lake nehomogene pregrade, radi sticanja detaljnijeg uvida u potencijalne razlike. Takođe, analizirani tipovi homogenih pregrada odgovaraju najčešće zastupljenim u zgradama u Republici Srbiji [Mijić et al., 2012]. Dodatni elementi u vidu prozora, vrata, ventilacionih otvora i slično nisu obuhvaćeni proračunima. Detaljni proračuni vršeni su opisanim specijalizovanim softverom za proračun izolacije baziranog na detaljanom klasičnom modelu [URSA, 2014], a pojednostavljeni proračuni pomoću odgovarajućih procedura kreiranih u Matlab okruženju.

Razlike između vrednosti dobijenih detaljnim i pojednostavljenim modelima ispitivane su u dva pravca. Najpre je analiziran uticaj razlike izolacionih moći zajedničke i bočnih pregrada na odstupanja u rezultatima dva modela. Sve bočne pregrade (zidovi, podovi i tavanice) u tom slučaju načinjene su od istog osnovnog homogenog i masivnog materijala. Razmatrana su dva tipa bočnih pregrada – betonske pregrade debljine 16 cm i površinske mase 400 kg/m^2 ($R_w = 61$) i betonske pregrade debljine 22 cm i površinske mase 515 kg/m^2 ($R_w = 62$). Sa druge strane, analizirano je više tipova zajedničkih pregrada, i to:

- 18 homogenih zidova ($32 \text{ dB} \leq R_w \leq 64 \text{ dB}$),
- 9 lakih zidova ($42 \text{ dB} \leq R_w \leq 64 \text{ dB}$),
- 8 homogenih tavanica ($54 \text{ dB} \leq R_w \leq 64 \text{ dB}$, $66 \text{ dB} \leq L_{n,w} \leq 77 \text{ dB}$) i
- jedna drvena podna konstrukcija ($R_w = 61 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 56 \text{ dB}$).

Pregled svih analiziranih zajedničkih i bočnih pregrada dat je u Tabeli 8.1. Vrednosti faktora unutrašnjih gubitaka i brzine longitudinalnih talasa masivnih pregrada preuzete su iz Tabele 3.2, a frekvencije koincidencije izračunate po formuli (J3.3). Vrednosti izolacionih moći i normalizovanih nivoa zvuka udara pregrada u tercnim frekvencijskim podopsezima preuzeti su iz laboratorijskih merenja izolacije pregrada. Svi spojevi između pregrada su u ovom slučaju kruti krstasti spojevi.

Nakon toga, u drugoj analizi ispitivan je i uticaj vrste spojeva između zajedničke i bočnih pregrada na razlike u rezultatima dva proračuna. Za te potrebe sve pregrade (zajednička i bočne) su u proračunima načinjene od istog osnovnog materijala. Posmatrano je devet tipova pregrada – 8 homogenih masivnih ($54 \text{ dB} \leq R_w \leq 64 \text{ dB}$ i $66 \text{ dB} \leq L_{n,w} \leq 77 \text{ dB}$ u slučaju tavanica) i jedna laka nehomogena ($R_w = 61 \text{ dB}$ i $L_{n,w} = 56 \text{ dB}$ u slučaju tavanice), a njihove karakteritike date su u poslednja dva reda Tabele 8.1. Svi spojevi zajedničke pregrade su jednaki i analizom je obuhvaćeno četiri njihova tipa. Tipovi spojeva i njihove oznake korišćene u nastavku date su u Tabeli 8.2. Svi ostali spojevi između bočnih pregrada su kruti krstasti spojevi.


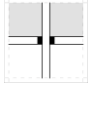

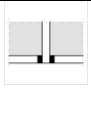
8.2. Rezultati

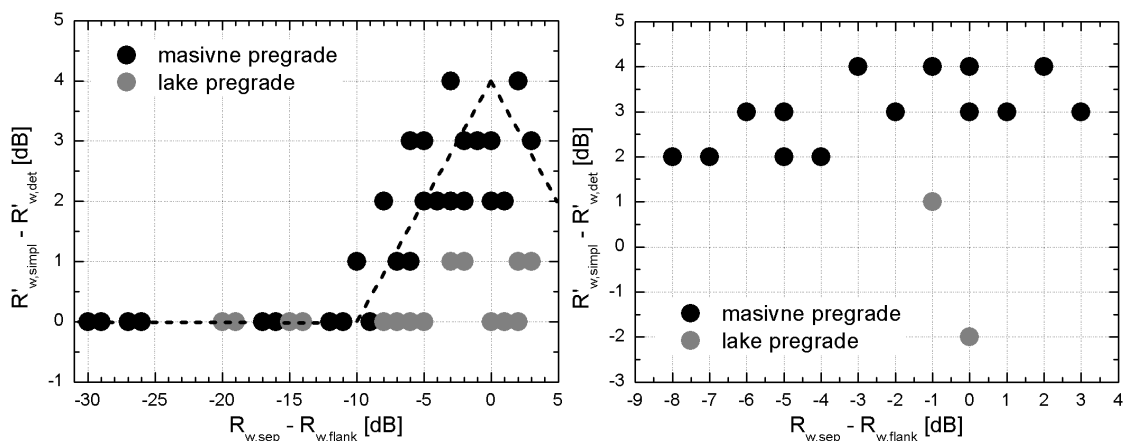
Kako bi se uporedile jednobrojne vrednosti deskriptora zvučne izolacije dobijene korišćenjem detaljnog i pojednostavljenog modela, identične postavke proračuna tretirane su pomoću oba modela. Izračunate razlike u rezultatima, u zavisnosti od izolacionih karakteristika zajedničke i bočnih pregrada, prikazane su na Slici 8.1 za vazdušni zvuk i Slici 8.2 za zvuk udara. Na slikama je data razlika između merodavnih vrednosti zvučne izolacije dobijenih korišćenjem pojednostavljenog i detaljnog modela u funkciji razlike merodavnih izolacionih moći zajedničke i bočnih pregrada. Rezultati za homogene zajedničke pregrade prikazani su crnom, a za lake nehomogene pregrade sivom bojom.

Tabela 8.1. Tipovi i osnovne fizičke karakteristike analiziranih pregrada

tip pregrade	t [cm]	m' [kg/m ²]	f_c [Hz]	η_{int} [/]	c_L [m/s]	R_w [dB]	$L_{n,w}$ [dB]	izolacione karakteristike (Prilog B)
bočne pregrade								
homogeni zid/tavanica	16	400	114,68	0,006	3500	61	75	Tabela B.5
homogeni zid/tavanica	22	515	83,41	0,006	3500	62	68	Tabela B.7
zajedničke pregrade								
homogeni zid	14	325	131,07	0,006	3500	54	-	Tabela B.1
homogeni zid	14	400	131,07	0,006	3500	56	-	Tabela B.2
homogeni zid	16	375	114,68	0,006	3500	57	-	Tabela B.3
homogeni zid	18	425	101,94	0,006	3500	59	-	Tabela B.4
homogeni zid	16	400	114,68	0,006	3500	61	-	Tabela B.5
homogeni zid	20	470	91,75	0,006	3500	61	-	Tabela B.6
homogeni zid	22	515	83,41	0,006	3500	62	-	Tabela B.7
homogeni zid	24	565	76,46	0,006	3500	64	-	Tabela B.8
homogeni zid	5	50	494,02	0,015	2600	32	-	Tabela B.9
homogeni zid	7	70	352,87	0,015	2600	35	-	Tabela B.10
homogeni zid	14	210	327,66	0,010	1400	45	-	Tabela B.11
homogeni zid	11	240	417,03	0,010	1400	50	-	Tabela B.12
homogeni zid	22	250	208,51	0,010	1400	52	-	Tabela B.13
homogeni zid	24	330	191,14	0,010	1400	55	-	Tabela B.14
homogeni zid	21	275	218,44	0,010	1400	55	-	Tabela B.15
homogeni zid	16	330	114,68	0,006	3500	56	-	Tabela B.16
homogeni zid	24	410	191,14	0,010	1400	59	-	Tabela B.17
homogeni zid	30	540	152,91	0,010	1400	61	-	Tabela B.18
laki zid	7,5	20	3000	-	-	42	-	Tabela B.20
laki zid	10	20	3000	-	-	47	-	Tabela B.21
laki zid	10	38	3000	-	-	54	-	Tabela B.22
laki zid	10	38	2500	-	-	54	-	Tabela B.23
laki zid	14	38	2500	-	-	56	-	Tabela B.24
laki zid	15,5	40	2500	-	-	59	-	Tabela B.25
laki zid	15,5	40	2500	-	-	62	-	Tabela B.26
laki zid	21	40	2500	-	-	63	-	Tabela B.27
laki zid	25,5	40	2500	-	-	64	-	Tabela B.28
homogena tavanica	14	325	131,07	0,006	3500	54	77	Tabela B.1
homogena tavanica	14	400	131,07	0,006	3500	56	77	Tabela B.2
homogena tavanica	16	375	114,68	0,006	3500	57	75	Tabela B.3
homogena tavanica	18	425	101,94	0,006	3500	59	72	Tabela B.4
homogena tavanica	16	400	114,68	0,006	3500	61	75	Tabela B.5
homogena tavanica	20	470	91,75	0,006	3500	61	70	Tabela B.6
homogena tavanica	22	515	83,41	0,006	3500	62	68	Tabela B.7
homogena tavanica	24	565	76,46	0,006	3500	64	66	Tabela B.8
laka tavanica	45	140	2000	-	-	61	56	Tabela B.19

Tabela 8.2. Tipovi i oznake analiziranih spojeva zajedničke pregrade

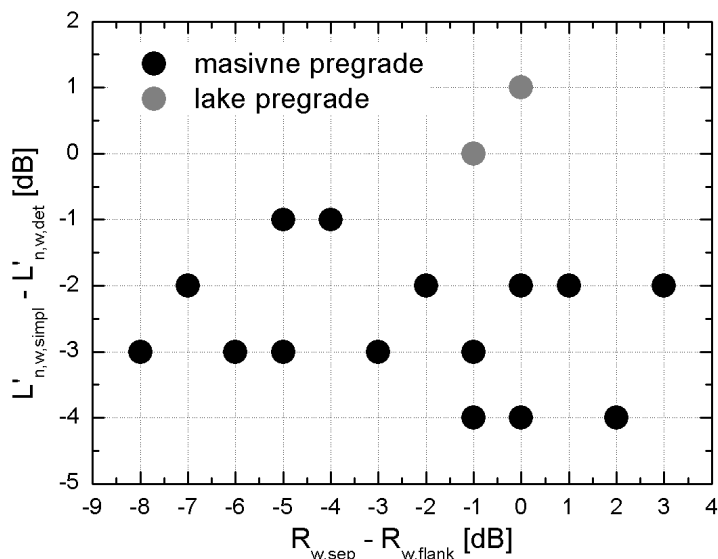
tip spoja	skica	oznaka
kruti krstasti spoj		<i>krut X</i>
elastični krstasti spoj sa elastičnim dodacima na bočnim pregradama		<i>elast. X (f)</i>
kruti T-spoj		<i>krut T</i>
elastični T-spoj sa elastičnim dodacima na bočnim pregradama		<i>elast. T (f)</i>



Slika 8.1. Razlika merodavnih vrednosti građevinske izolacione moći izračunatih primenom pojednostavljenog i detaljnog klasičnog modela u funkciji razlike merodavnih izolacionih moći zajedničke i bočnih pregrada, levo – prostorije jedna pored druge, desno – prostorije jedna iznad druge

Kada su razlike između merodavnih vrednosti izolacionih moći bočnih i zajedničkih pregrada velike ($R_{w,sep} - R_{w,flank}$ iznosi ispod -10 dB na Slici 8.1 levo), najčešće zbog debljih i masivnijih bočnih pregrada, ne postoji razlika u rezultatima dobijenim korišćenjem dva modela. Ovo se objašnjava malim uticajem bočnog prenosa na ukupnu izolaciju između predajne i prijemne prostorije, jer zajednička pregrada manje izolacione moći i površinske mase ne može pobuditi znatno masivnije bočne pregrade i predstavlja glavni put prolaska zvuka. Stoga je građevinska vrednost izolacije između prostorija praktično jednaka laboratorijskoj vrednosti izolacije zajedničke pregrade. Dodatne korekcije u vidu odnosa terenske i laboratorijske vrednosti

strukturnog vremena reverberacije zajedničke pregrade ili bočnih izolacionih moći nemaju uticaj na rezultat i dva modela daju identične jednobrojne vrednosti deskriptora.



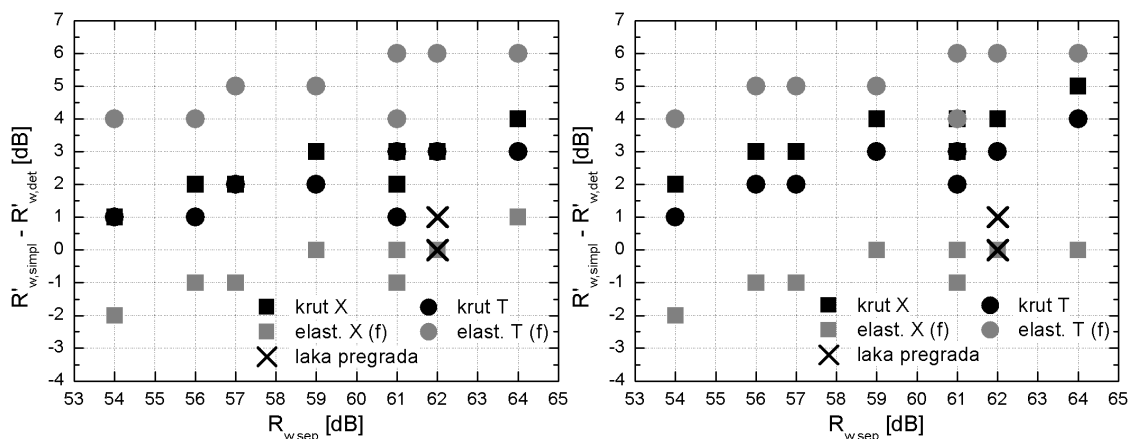
Slika 8.2. Razlika merodavnih vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara izračunatih primenom pojednostavljenog i detaljnog klasičnog modela u funkciji razlike merodavnih izolacionih moći zajedničke i bočnih pregrada, za prostorije jedna iznad druge

Nasuprot tome, kada zajednička i bočne pregrade imaju slična fizička i izolaciona svojstva, razlike između rezultata dva modela rastu do 4 dB, pri čemu pojednostavljeni model daje više vrednosti izolacije (više merodavne vrednosti građevinske izolacione moći, odnosno niže vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara). Na dijagramu na Slici 8.1, odstupanja su aproksimirana isprekidanom linijom. Izvedena zavisnost važi za sve homogene i masivne pregrade i ne zavisi od međusobnog položaja prostorija (jedna iznad druge ili jedna pored druge) u proračunima izolacije od vazdušnog zvuka. Razlike u rezultatima znatno su manje kada je zajednička pregrada laka, nehomogena i iznose do 1 dB. Razlog za to je u slabijem prenosu zvučne energije kroz spoj lake zajedničke i masivnih bočnih pregrada i malom doprinosu bočnog provođenja. Ipak, sa Slike 8.1 ovo se ne može sa sigurnošću tvrditi, posebno za prostorije jedna iznad druge, zbog ograničenog broja analiziranih slučajeva sa nehomogenim pregradama, pa su za osnovanije zaključke neophodne opsežnije analize.

Rezultati dobijeni za zvuk udara (Slika 8.2) pokazuju slične tendencije u

razlikama između dva modela samo sa suprotnim predznakom u odnosu na izolaciju od vazdušnog zvuka, odnosno nižim vrednostima normalizovanog nivoa zvuka udara prema pojednostavljenom modelu. Kada su zajednička i sve bočne pregrade homogene i masivne, razlike između dva modela su najveće, do 4 dB, kada svi elementi imaju približno jednake vrednosti izolacionih moći i površinske mase. Dobijene razlike u slučaju jedine analizirane drvene podne konstrukcije su manje, do 1 dB.

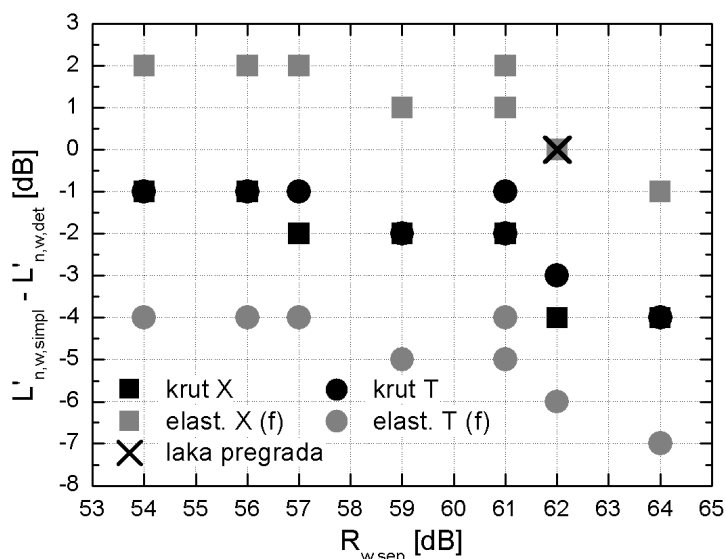
Rezultati analize uticaja spojeva zajedničke pregrade prikazani su na graficima na Slikama 8.3 i 8.4 za izolaciju od vazdušnog zvuka i zvuka udara, respektivno. Oni prikazuju razliku merodavnih vrednosti izolacije izračunatih korišćenjem pojednostavljenog i detaljnog modela u funkciji izolacione moći zajedničke i svih bočnih pregrada. Različite vrste spojeva predstavljene su različitim simbolima. Posebno, nekoliko analiziranih slučajeva nehomogene drvene tavanice prikazane su simbolom \times .



Slika 8.3. Razlika merodavnih vrednosti građevinske izolacione moći izračunatih primenom pojednostavljenog i detaljnog klasičnog modela u funkciji izolacione moći i tipa spojeva zajedničke pregrade, levo – prostorije jedna pored druge, desno – prostorije jedna iznad druge

Razlike između dva modela veće su u slučaju elastičnih spojeva zajedničke pregrade nego u slučaju krutih veza. Pojednostavljeni model daje do 6 dB više vrednosti izolacije u slučaju elastičnih T-spojeva, odnosno 2 dB niže vrednosti u slučaju elastičnih krstastih spojeva, uz blag rast vrednosti sa višim vrednostima izolacione moći pregrada. Suprotan predznak razlika pri krstastim i T-spojevima može se objasniti time što

pojednostavljeni proračun ne uzima u obzir terensku vrednost strukturnog vremena reverberacije zajedničke pregrade. Kada krstasti spojevi sadrže elastične veze prema bočnim pregradama, zvučna energija koja dospe u zajedničku pregradu prenosi se ka pregradi u njenom nastavku, normalno na bočne pregrade, čime se smanjuje prenos zvučne energije prema prijemnoj prostoriji i ostvaruje viša izolacija. Pojednostavljeni model ovo ne uzima u obzir i stoga daje niže vrednosti izolacije. Slično tome, kada zajednička pregrada ima elastične T-spojeve prema bočnim pregradama, energija koja dospe u nju ne prenosi se prema ostalim pregradama već većinski biva izračena u prijemnu prostoriju, čime se smanjuje građevinska vrednost izolacije između prostorija, što je opet obuhvaćeno samo detaljnim modelom.



Slika 8.4. Razlika merodavnih vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara izračunatih primenom pojednostavljenog i detaljnog klasičnog modela u funkciji izolacione moći i tipa spojeva zajedničke pregrade, za prostorije jedna iznad druge

Kod krutih spojeva, pojednostavljeni model daje u proseku 2-3 dB više vrednosti izolacije, sa nešto većim razlikama kada su spojevi krstasti u poređenju sa T-spojevima. Iz prethodne analize uticaja odnosa izolacionih karakteristika zajedničke i bočnih pregrada, može se zaključiti da su ove razlike posledica jednakih izolacionih moći i površinskih masa svih pregrada u proračunima, a da kruti spojevi ne unose dodatnu razliku između dva modela. Ipak, primetno je da razlike blago zavise od izolacionih moći pregrada i tipa krutih spojeva – krstati ili T-spojevi.

U slučaju izolacije od vazdušnog zvuka ne postoji značajna razlika između rezultata za prostorije sa zajedničkim zidom i zajedničkom tavanicom. Kao i u prethodnoj analizi (Slike 8.1 i 8.2), razlike u rezultatima proračuna izolacije od zvuka udara date na Slici 8.4 imaju slične apsolutne vrednosti kao izolacija od vazdušnog zvuka, uz suprotan predznak. Takođe, analize jedine nehomogene drvene zajedničke tavanice pokazuju da detaljni i pojednostavljeni model daju približno jednake vrednosti nezavisno od tipa spojeva.

8.3. Diskusija

Rezultati sprovedenih analiza pokazuju da u mnogim scenarijima proračuna zvučne izolacije od praktičnog interesa ne postoji zadovoljavajuće slaganje u rezultatnim vrednostima detaljnog i pojednostavljenog klasičnog modela. Pojednostavljeni model iako sažet i lakši za implementaciju ne može se u opštem slučaju koristiti kao zamena za detaljni, posebno u slučaju masivnih homogenih zajedničkih pregrada i bočnih pregrada sličnih fizičkih karakteristika (pre svega površinskih masa i vrednosti izolacionih moći), kao i eventualnog prisustva elastičnih spojeva između pregrada. Razlike u izračunatim merodavnim vrednostima izolacije od vazdušnog i zvuka udara dobijenim detaljnim i pojednostavljenim modelom od 4 dB svakako predstavljaju značajna odstupanja. To nije u skladu sa tvrdnjama u [EN 12354] i [Metzen, 1999], na osnovu kojih sledi da dva tipa matematičkih modela imaju približno jednaku tačnost i vrednost standardne devijacije odstupanja od realnih izmerenih vrednosti, uz samo nešto više vrednosti izolacije u slučaju pojednostavljenog modela. Stoga se postavlja pitanje validnosti pojednostavljenih modela u ovim slučajevima od praktične važnosti, posebno imajući u vidu da i pored uvedenih pojednostavljenja matematički model ostaje relativno složen uz neizvesnu tačnost.

Uzroci razlika dva modela svakako se nalaze u drugačijim matematičkim modelima i različitom načinu na koji oni tretiraju terenske (*in situ*) izolacione karakteristike relevantnih građevinskih pregrada i bočni prenos. Ukoliko se izostavi eventualni uticaj dodatnih obloga i ostalih građevinskih elemenata, izolaciona moć direktnog prenosa (R_{Dd}) jednaka je *in situ* vrednosti izolacione moći zajedničke pregrade ($R_{s,situ}$). Prema detaljnom modelu u svakom od terčnih frekvencijskih

podopsega one iznose, prema formulama (J3.14) i (J3.16):

$$R_{Dd} = R_{sep,situ} = R_{sep} - 10 \log_{10} \left(\frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \right), \quad (J8.1)$$

gde su R_{sep} laboratorijska vrednost izolacione moći, $T_{s,situ}$ i $T_{s,lab}$ *in situ* i laboratorijsko strukturno vreme reverberacije zajedničke pregrade, respektivno. Sa druge strane, pojednostavljeni model u istom slučaju zanemaruje razliku između laboratorijske i *in situ* izolacione moći i izjednačava merodavne vrednosti izolacione moći direktnog prenosa i zajedničke pregrade:

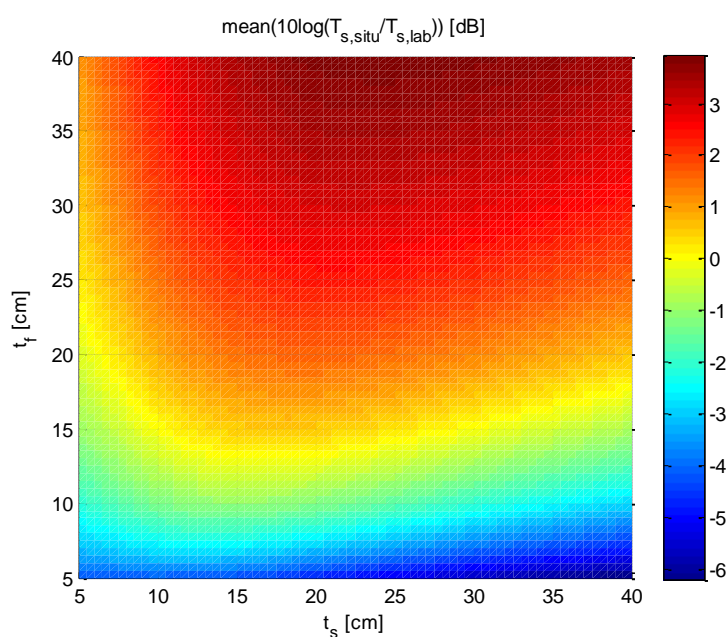
$$R_{Dd,w} = R_{sep,w}, \quad (J8.2)$$

Uticaj zanemarivanja faktora strukturnih vremena reverberacije zajedničke pregrade ($10 \log_{10}(T_{s,situ}/T_{s,lab})$) teško je odrediti u opštem slučaju. Jednobrajna vrednost $R_{Dd,w}$, prema procedurama datim u ISO 717-1, zavisi ne samo od vrednosti R_{Dd} , već i od odnosa oblika njene krive i referentne krive izolacione moći (poglavlje 2.3.2). Ipak, pod pretpostavkom da se oblik krive terenske izolacione moći zajedničke pregrade ne menja u odnosu na krivu laboratorijske izolacione moći u meri u kojoj bi značajno uticao na ponderaciju i dobijenu jednobrajnu vrednost izolacione moći, razlika između jednobrajnih vrednosti $R_{Dd,w}$ prema pojednostavljenom i detaljnom modelu može se aproksimirati kao srednja vrednost veličine $10 \log_{10}(T_{s,situ}/T_{s,lab})$ u svim tercnim podopsezima u opsegu 50-5000 Hz. U praktičnim okolnostima, ova aproksimacija je opravdana kada faktor strukturnih vremena reverberacije ne varira značajno (do nekoliko decibela) između frekvencijskih podopsega. U suprotnom slučaju, razumno bi bilo pretpostaviti da će vrednosti faktora na niskim frekvencijama imati veći uticaj na jednobrajnu vrednost $R_{Dd,w}$, jer su nepovoljna odstupanja krivih izolacionih moći u odnosu na referentnu krivu u ovom delu frekvencijskog opsega češća u praksi.

Strukturno vreme reverberacije pregrade je retko merena veličina i njene vrednosti potrebne za proračun izolacije najčešće se računaju prema jednačinama (J3.4) i (J3.5). Ono zavisi od niza, međusobno povezanih, fizičkih parametara pregrada kao što su faktor unutrašnjih gubitaka u materijalu pregrade, brzina fleksionih talasa u njoj, faktor zračenja, površina i dimenzije pregrade, njena površinska masa, apsorpcione i transmisionne karakteristike spojeva i frekvencija. U ovom radu analiziran je uticaj debljine homogenih pregrada. Ispitivanje uticaja strukturnih vremena reverberacije pregrada na proračunate vrednosti izolacije prema detaljnom i pojednostavljenom

modelu vršeno je na primeru pravougaone betonske pregrade dimenzija $4 \times 2,7 \text{ m}^2$, gustine 2300 kg/m^3 , faktora unutrašnjih gubitaka 0,006 i brzine fleksionih talasa 3500 m/s . Pregrada se nalazi između predajne i prijemne prostorije jednakih dužina – 5 m. Duž sve četiri ivice pregrade nalaze se kruti krstasti spojevi zajedničke pregrade sa homogenim bočnim pregradama (međusobno jednakih debljina), indeksa prenosa vibracija računatog prema empirijskim formulama datim u Aneksu E norme EN 12354-1. Debljina zajedničke i bočnih pregrada varirana je u rasponu 5 cm do 40 cm u koracima od po 5 cm.

Radi jednostavnijeg poređenja dva modela, frekvencijski zavisne vrednosti faktora $10\log_{10}(T_{s,situ}/T_{s,lab})$, računate prema formulama (J3.5) i (J3.4), svedene su na njihovu srednju vrednost u svim tercnim frekvencijskim podopsezima proširenog opsega, od 50 Hz do 5000 Hz. Rezultati su prikazani na Slici 8.5. Na horizontalnoj i vertikalnoj osi date su debljine zajedničke i bočnih pregrada, respektivno.



Slika 8.5. Zavisnost odnosa *in situ* i laboratorijske vrednosti struktornog vremena reverberacije zajedničke pregrade od debljine betonskih pregrada (zajedničke i bočnih)

Srednja vrednost količnika $10\log_{10}(T_{s,situ}/T_{s,lab})$ varira u rasponu od -6 dB do +4 dB i povećava se sa debljinom (i površinskom masom) bočnih elemenata. Najniže vrednosti javljaju se za veoma masivne zajedničke pregrade smeštene između bočnih

pregrada značajno manje površinske mase. Međutim, kada su zajednička i bočne pregrade približno jednakih debljina, oko 0,2 m, srednja vrednost faktora je 1-2 dB. Ovo delimično objašnjava razlike u rezultatima dva modela za proračun izolacije sa Slika 8.1 i 8.2, jer samo detaljni model uključuje ovaj faktor pri izračunavanju izolacione moći direktnog prenosa. Međutim, *in situ* vrednosti izolacione moći pregrada figurišu u detaljnom modelu i u proračunu bočnih izolacionih moći (jednačina (J3.19)). Stoga se uticaj faktora akumulira kroz sve pregrade, a razlika između rezultata dva modela dodatno povećava.

Dodatna razlika između dva modela pojavljuje se u proračunu bočnih izolacionih moći. Ponovo izuzimajući uticaj obloga i ostalih dodatnih elemenata iz jednačine (J3.19), izolacione moći bočnih putanja prema detaljnom modelu imaju vrednosti:

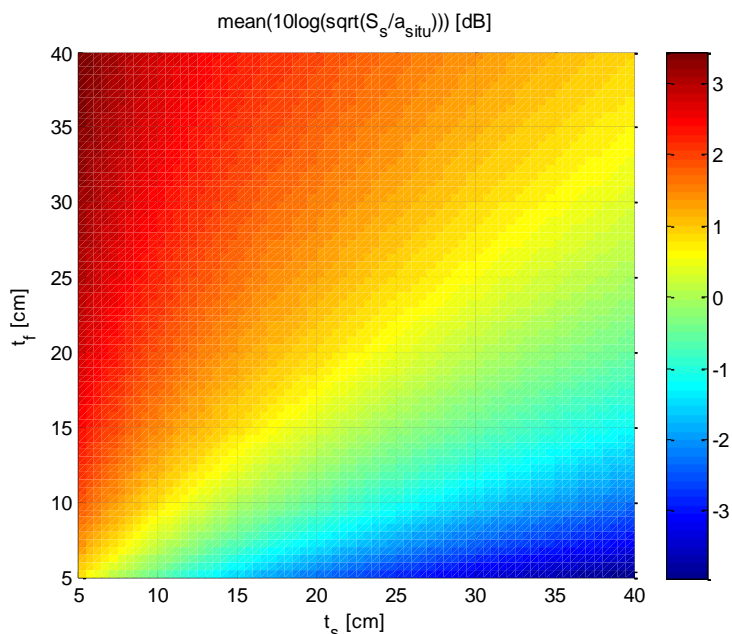
$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}}, \quad (\text{J8.3})$$

gde su R_i i R_j izolacione moći dve pregrade uključene u bočni prenos, S_i i S_j njihove površine, a S_s površina zajedničke pregrade. $\overline{D_{v,ij,situ}}$ je srednja vrednost *in situ* razlike nivoa brzine vibracija između pregrada i povezana je sa indeksom prenosa vibracija (K_{ij}) relacijom (J3.18b). Merodavne vrednosti bočnih izolacionih moći prema pojednostavljenom modelu (jednačina (J3.28)) u istom slučaju iznose:

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + K_{ij} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f}, \quad (\text{J8.4})$$

gde je l_f dužina spoja između elemenata i i j . Korišćenjem jednačine (J3.18b), lako se može izvesti da se detaljni model i jednačina (J8.3), svode na pojednostavljeni i jednačinu (J8.4), kada su apsorpcione dužine svih pregrada numerički jednake njihovim površinama ($a_{i,situ} = S_i/1\text{m}$ za svaki element i).

Stoga je uticaj ovog faktora analiziran preko frekvencijski usrednjenog logaritma kvadratnog korena odnosa $a_{i,situ}/S_i$ zajedničke pregrade. Kvadratni koren dodat je na osnovu jednačina (J3.18b) i (J8.3) iz kojih sledi da su bočni koeficijenti transmisije proporcionalni kvadratnom korenu apsorpcionih dužina. Slika 8.6 prikazuje vrednost faktora usrednjenu po tercnim podopsezima proširenog opsega u funkciji debljine zajedničke i bočnih pregrada.



Slika 8.6. Zavisnost odnosa površine zajedničke pregrade i *in situ* vrednosti apsorpcione dužine zajedničke pregrade od debljine betonskih pregrada (zajedničke i bočnih)

Varijacije su nešto manje nego u slučaju uticaja faktora strukturnih vremena reverberacije, oko ± 4 dB. Uticaj razlika S_s i a_{situ} je najmanji kod pregrada približno jednakih debljina (srednja vrednost faktora je oko 0 dB). Ipak, čak i u takvom slučaju, vrednosti između 0,5 dB i 1 dB su dovoljne da obore vrednosti bočnih izolacionih moći u detaljnom modelu i povećaju razliku u konačnim jednobrojnim vrednostima deskriptora dobijenim pomoću detaljnog i pojednostavljenog modela. To znači da u realnim okolnostima pojednostavljeni model može davati niže jednobrojne vrednosti građevinske izolacione moći, posebno imajući u vidu da ova razlika uvodi sistematsko odstupanje koje se akumulira po svim bočnim putanjama i njihovim odgovarajućim izolacionim moćima. Ipak, ovo važi samo u situacijama kada bočni prenos značajno utiče na ukupnu izolaciju između predajne i prijemne prostorije, kao na primer kada zajednička i bočne homogene pregrade imaju približno jednake površinske mase. Uticaj faktora apsorpcionih dužina se tada pridodaje uticaju faktora strukturnih vremena reverberacije, rezultirajući u povećanoj razlici između dva modela.

Kada je zajednička pregrada laka u odnosu na bočne, bočne izolacione moći su znatno veće od direktne i ne utiču na merodavnu vrednost građevinske izolacione moći

između prostorija. Istovremeno, iz dijagrama na Slici 8.5 sledi da za tako tanke zajedničke pregrade logaritam odnosa strukturnih vremena reverberacije retko prevazilazi opseg $\pm 0,5$ dB u uobičajenim scenarijima zvučne izolacije (leva strana dijagrama). Stoga je građevinska vrednost izolacione moći približno jednaka izolacionoj moći zajedničke pregrade prema oba modela proračuna. Slično važi i kada je zajednička pregrada veoma debela i masivna u odnosu na bočne (desna strana dijagrama na Slikama 8.5 i 8.6). Iako bočni prenos ima povećan udeo u ukupnoj izolaciji u ovom slučaju, dva faktora – apsorpcionih dužina i strukturnih vremena reverberacije imaju suprotne predznake i međusobno se poništavaju, ostavljajući manju konačnu razliku između dva modela.

Proračun izolacije od zvuka udara između prostorija jedna iznad druge prema pojednostavljenom modelu je još svedeniji. Detaljni model obuhvata i direktan i bočni prenos nezavisno i, isključujući doprinos dodatnih elemenata iz jednačina (J3.15), (J3.17) i (J3.20), oni se mogu izraziti formulama:

$$L_{n,d} = L_{n,situ} = L_n + 10 \log_{10} \left(\frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \right) \text{ i:} \quad (\text{J8.5})$$

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log_{10} \sqrt{\frac{S_i}{S_j}}. \quad (\text{J8.6})$$

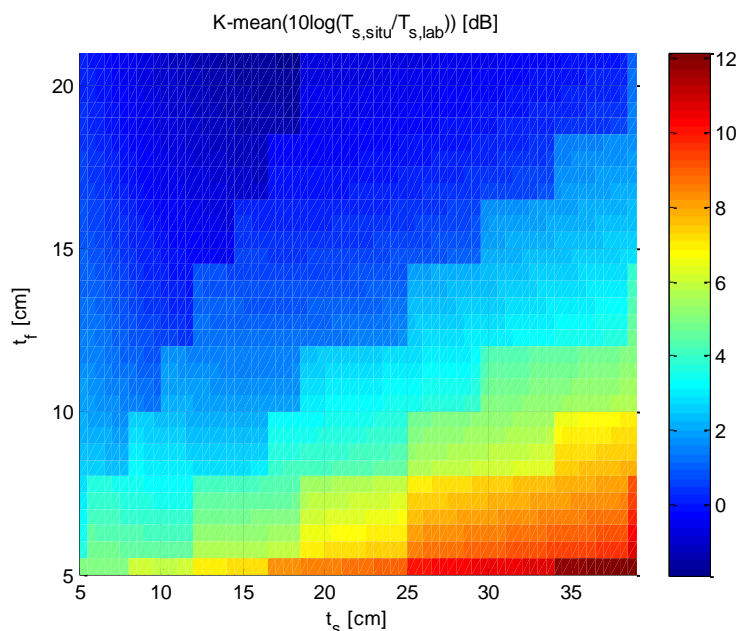
Umesto različitih faktora iz ovih jedničina kojima su kvantifikovane terenske izolacione karakteristike elemenata i bočni prenos, pojednostavljeni model uvodi jedinstveni korekcionni faktor K , čija vrednost zavisi od odnosa površinskih masa zajedničke i bočnih pregrada prijemne prostorije. Iz jednačine (J3.31) sledi:

$$L'_{n,w} = L_{n,w} + K, \quad (\text{J8.7})$$

pri čemu vrednost faktora K varira između 0 dB i 6 dB i najveća je kada je masivna tavanica okružena mnogo lakšim bočnim pregradama, dok u slučaju pregrada približno jednakih masa ili masivnijih bočnih pregrada ima nultu vrednost.

U zavisnosti od toga koliko faktor K precizno aproksimira faktore $10 \log_{10} (T_{s,situ} / T_{s,lab})$ i $-\left(\overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log_{10} \sqrt{S_i / S_j} \right)$, slaganje jednobrojnih vrednosti dobijenih pomoću dva modela biće manje ili veće. Nakon poređenja jednačina (J8.1) i (J8.5) i jednačina (J8.3) i (J8.6), zaključci izvedeni za izolaciju od vazdušnog zvuka mogu se preneti na zvuk udara. Analizirani faktori imaju veoma sličan uticaj na vrednosti dobijene detaljnim modelom, samo drugačijeg predznaka, dok se pojednostavljenim

modelom oni (a time i terenske izolacione karakteristike elemenata i bočni prenos) aproksimiraju faktorom K . Razlika između K i srednje vrednosti prvog faktora po tercnim podopsezima data je na Slici 8.7.

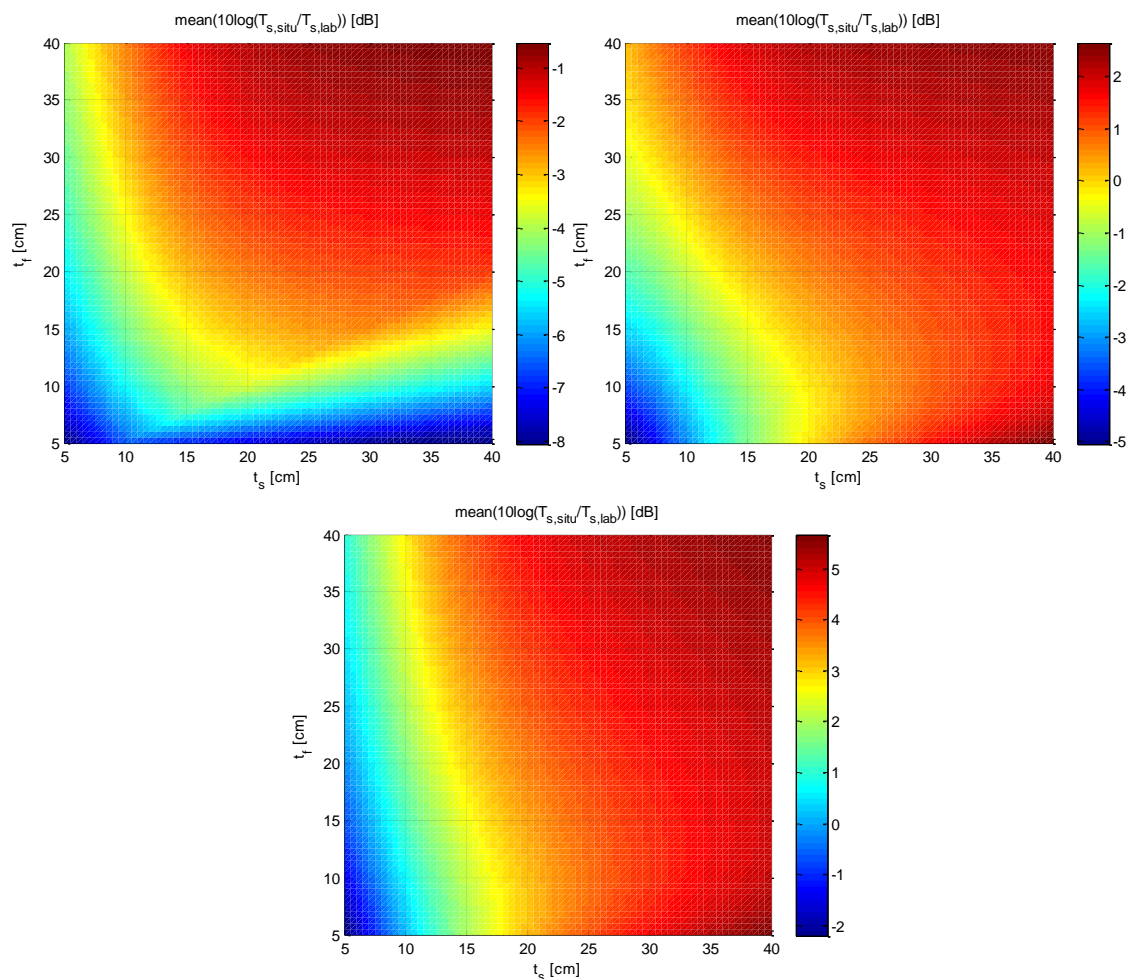


Slika 8.7. Zavisnost razlike faktora K i faktora odnosa *in situ* i laboratorijske vrednosti strukturnog vremena reverberacije zajedničke pregrade od debljine betonskih pregrada (zajedničke i bočnih)

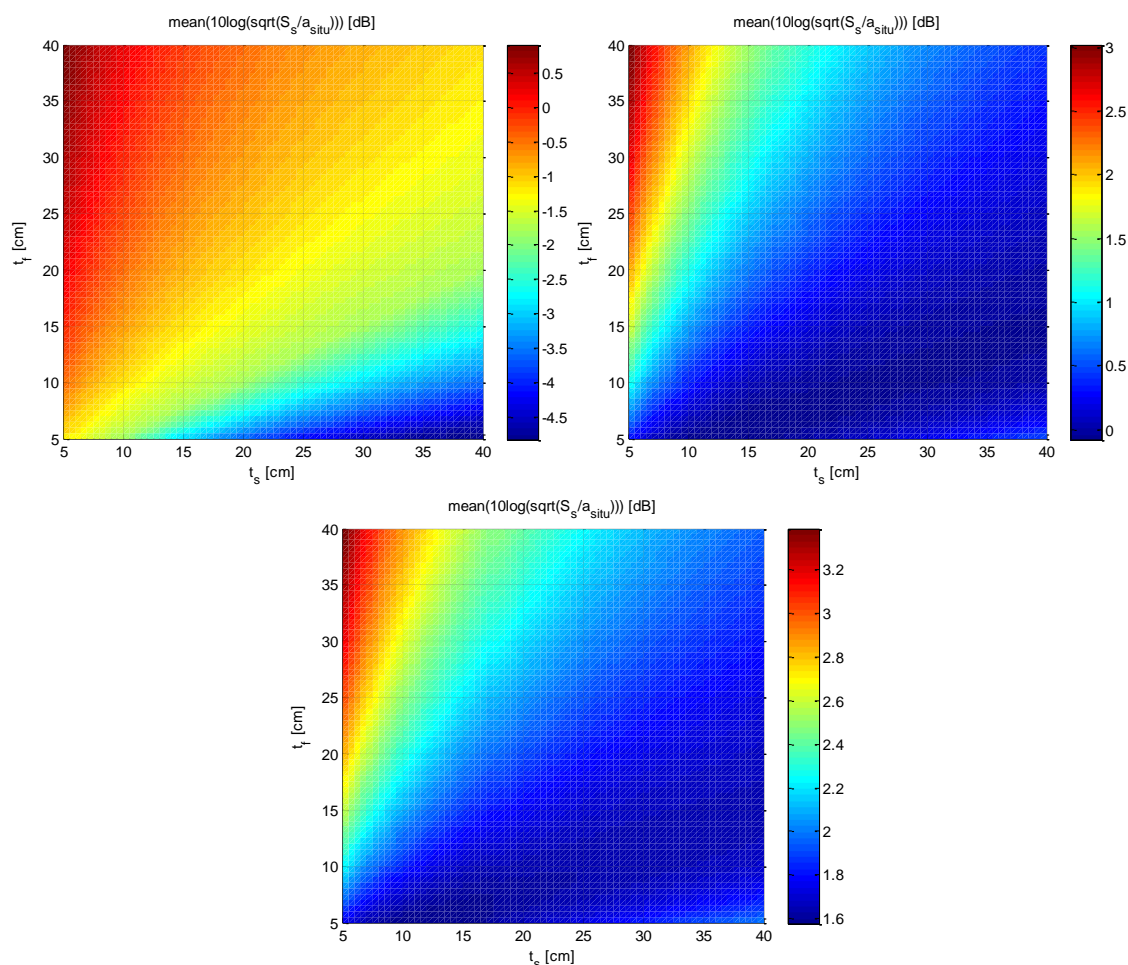
Prema Slici 8.7, za sve pregrade približno jednakih površinskih masa, razlika je mala, do 1 dB, a faktor K , prema tabeli datoj u Aneksu B EN 12354-1, ima vrednost 0-1 dB. To, međutim, nije dovoljno da nadoknadi sve dodatne aproksimacije koje se uvode pojednostavljenim modelom. Pojednostavljeni model ne uračunava ni četiri dodatne putanje prenosa zvuka udara, od zajedničke tavanice ka bočnim zidovima prijemne prostorije. Njihov doprinos povećava ukupni normalizovani nivo zvuka računat prema detaljnom modelu, pa razlika između jednobrojnih vrednosti dva modela raste. Nasuprot tome, kada je zajednička tavanica znatno masivnija od bočnih zidova, faktor K raste i kompenzuje bočni prenos zvuka, pa se razlike između rezultata dva modela smanjuju.

Razlike detaljnog i pojednostavljenog modela ispitane su i za različite tipove spojeva zajedničke pregrade. Ponovo je to urađeno za četiri tipa spojeva iz Tabele 8.2,

pri čemu su sva četiri spoja zajedničke pregrade istog tipa. Grafici na Slikama 8.5, 8.6 i 8.7 dati su za krute krstaste spojeve. Rezultati za preostala tri tipa spoja prikazani su na Slikama 8.8-8.10.



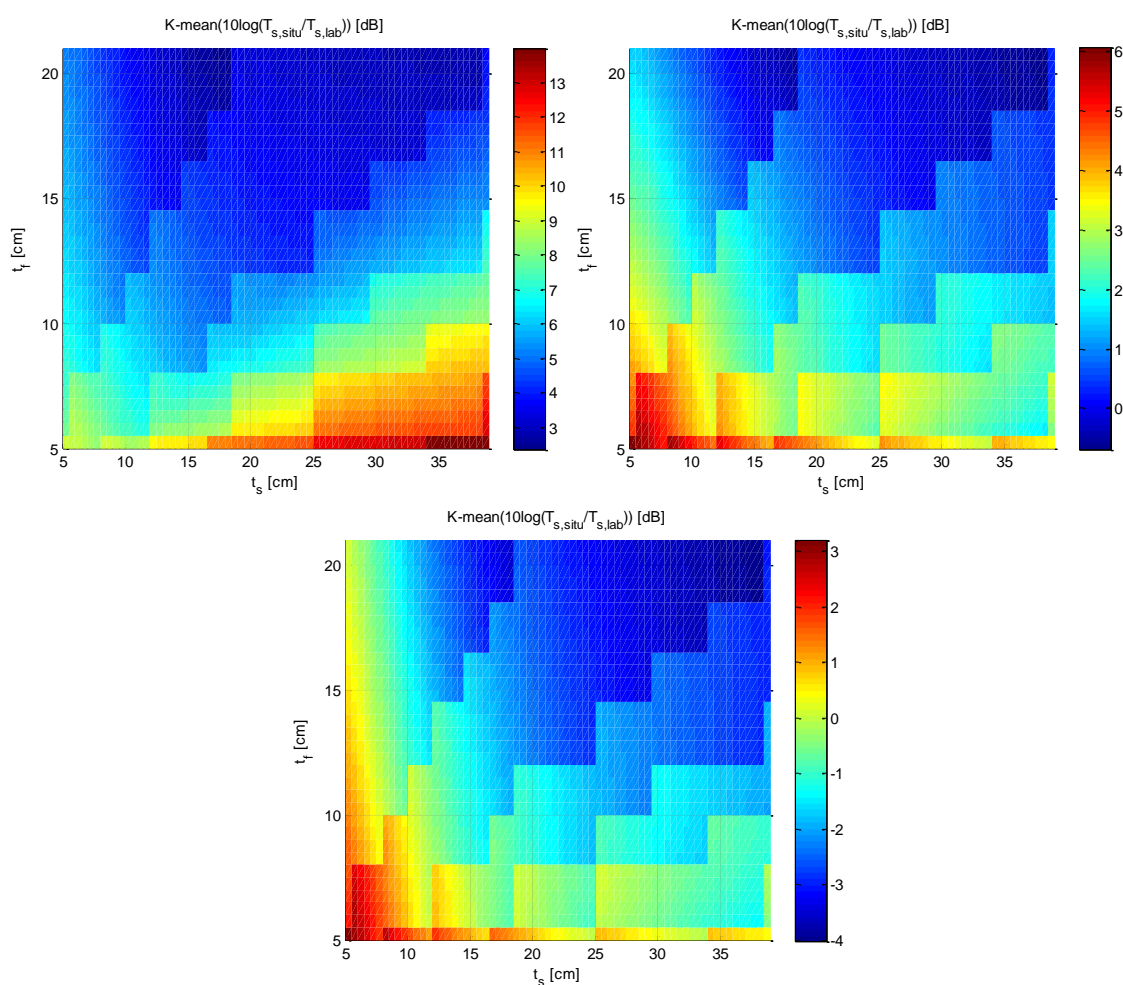
Slika 8.8. Zavisnost odnosa *in situ* i laboratorijske vrednosti strukturnog vremena reverberacije zajedničke pregrade od debljine betonskih pregrada (zajedničke i bočnih) za različite tipove spojeva zajedničke pregrade: gore levo – *elast. X(f)*, gore desno – *krut T*, dole – *elast. T(f)* spojevi na zajedničkoj pregradi



Slika 8.9. Zavisnost odnosa površine zajedničke pregrade i *in situ* vrednosti apsorpcione dužine zajedničke pregrade od debljine betonskih pregrada (zajedničke i bočnih) za različite tipove spojeva zajedničke pregrade: gore levo – *elast. X(f)*, gore desno – *krut T*, dole – *elast. T(f)* spojevi na zajedničkoj pregradi

Razlike koje nastaju u rezultatima detaljnog i pojednostavljenog modela pri različitim tipovima spojeva zajedničke pregrade mogu se objasniti dijagramima na Slikama 8.8-8.10. U slučaju izolacije od vazdušnog zvuka i T-spojeva između zajedničke i bočnih pregrada sličnih debljina, faktor $10\log_{10}(T_{s,situ}/T_{s,lab})$ ima dominantan uticaj na rezultatne vrednosti. Za krute krstaste i T-spojeve on ima približno jednaku vrednost, pa su i rezultati za ova dva tipa spoja dati na Slici 8.2 približno jednaki. U slučaju analiziranog tipa elastičnog T-spoja, ovaj faktor ima oko 3 dB višu vrednost u odnosu na prethodna dva tipa spojeva, što dodatno utiče na razlike dva modela. Kada je zajednička pregrada povezana sa bočnim analiziranim elastičnim krutim spojem, najveći

uticaj ima putanja zvuka u nastavku zajedničke pregrade, koja zaobilazi elastičnu vezu. To se ne odražava značajno na odnos strukturnih vremena reverberacije pregrade, ali utiče na povećanje apsorpcione dužine spojeva, usled povećanja gubitaka zvučne energije na njima, i smanjenje vrednosti faktora S_s/a_{situ} od oko 2 dB. U slučaju izolacije od zvuka udara, na sva tri dijagrama sa Slike 8.10 primetna je direktna veza između razlike faktora K i $10\log_{10}(T_{s,situ}/T_{s,lab})$ i razlike rezultata dva modela, datih na Slici 8.3.



Slika 8.10. Zavisnost razlike faktora K i faktora odnosa *in situ* i laboratorijske vrednosti strukturnog vremena reverberacije zajedničke pregrade od debljine betonskih pregrada (zajedničke i bočnih) za različite tipove spojeva zajedničke pregrade: gore levo – *elast. X(f)*, gore desno – *krut T*, dole – *elast. T(f)* spojevi na zajedničkoj pregradi

Dobijeni rezultati ostavljaju mogućnost za korekciju vrednosti koje se dobijaju izvršavanjem proračuna prema pojednostavljenom modelu, radi usaglašavanja sa

detaljnim, ali i mogućnost za definisanje drugačijih pojednostavljenih modela, koji bi uz potencijalno još jednostavnije procedure davali vrednosti približnije detaljnom modelu. U sledećem poglavlju testiran je jedan takav aproksimativan empirijski model. Ipak, svi rezultati su ograničeni na slučaj bočnih pregrada od istog materijala i izvedeni na relativno malom uzorku materijala pregrada i broju scenarija zvučne izolacije. Opširnije analize modela na većem broju scenarija neophodne su da bi se sa sigurnošću potvrdila njihova osnovanost.

Prema linearnoj aproksimaciji izvedenoj na Slici 8.1 levo (isprekidana linija), korekcija vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka izračunatih prema pojednostavljenom modelu iznosi:

$$R'_{w,simpl,correct} = R'_{w,simpl} - K_{simpl}, \quad (J8.8)$$

gde je:

$$K_{simpl} = \begin{cases} -0,4|R_{w,sep} - R_{w,flank}| + 4; & |R_{w,sep} - R_{w,flank}| < 10\text{dB} \\ 0; & |R_{w,sep} - R_{w,flank}| \geq 10\text{dB} \end{cases}, \quad (J8.9)$$

korekcionni faktor. Slično tome, korekcija normalizovanih vrednosti nivoa udara za prostorije jedna iznad druge:

$$L'_{n,w,simpl,correct} = L'_{n,w,simpl} + K_{simpl}. \quad (J8.10)$$

Za dodatnih $0,2(R_{w,sep} - 50 \text{ dB})$ potrebno je uvećati vrednost faktora K_{simpl} kada je zajednička pregrada visoke izolacione moći sa vrednostima $R_{w,sep} > 50 \text{ dB}$. Na osnovu rezultata na Slici 8.3, kada spojevi zajedničke pregrade imaju elastične veze prema svim bočnim pregradama, vrednostima K_{simpl} dodaje se i $+2,5 \text{ dB}$ u slučaju T-spojeva, odnosno $-2,5 \text{ dB}$ u slučaju krstastih spojeva. U svim slučajevima, korekciju jednobrojnih vrednosti deskriptora dobijenih pojednostavljenim modelom potrebno je izvršiti u proračunu pre zaokruživanja njihovih vrednosti na ceo broj.

Ukoliko sve bočne pregrade nisu jednake ili nemaju iste tipove spojeva sa zajedničkom, vrednost korekcionnog faktora može se usrednjiti prema formuli:

$$K_{simpl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{simpl,i}, \quad (J8.11)$$

gde je $K_{simpl,i}$ vrednost faktora za odgovarajuć odnos izolacionih moći zajedničke i pojedinačne bočne pregrade i tip spoja između njih, izračunat prema navedenim uputstvima, a N ukupan broj bočnih pregrada.

8.4. Zaključci

Rezultati prikazani u ovom poglavlju upućuju na nekoliko zaključaka u vezi sa razlikama u rezultatima proračuna zvučne izolacije prema detaljnom i klasičnom modelu:

- detaljni i pojednostavljeni klasični model u mnogim praktičnim situacijama mogu davati značajno drugačije rezultate sa razlikama merodavnih jednobrojnih vrednosti deskriptora do 3-4 dB;
- u slučaju izolacije od vazdušnog zvuka pojednostavljeni model daje nešto veće merodavne vrednosti građevinske izolacione moći, dok u slučaju izolacije od zvuka udara daje nešto manje jednobrojne vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara u poređenju sa detaljnim modelom;
- razlike postaju najizraženije, do nekoliko decibela, kada su sve pregrade homogene i masivne, a zajednička i bočne pregrade imaju približne vrednosti površinskih masa i izolacionih moći;
- kruti spojevi zajedničke pregrade ne utiču u većoj meri na povećanje razlika; nasuprot tome, ukoliko spojevi sadrže elastičnu vezu na bočnim pregradama, krstasti spojevi doprinose smanjenju a T-spojevi povećanju razlika u vrednosti izolacije dva modela; za sve analizirane tipova spojeva, razlike unekoliko rastu sa povećanjem izolacionih moći pregrada;
- sve navedeno za izolaciju od vazdušnog zvuka važi u jednakoj meri kako za prostorije sa zajedničkim zidom tako i za prostorije sa zajedničkom tavanicom
- razlike dva modela nastaju usled drugačijeg tretmana terenskih vrednosti izolacije pregrada i bočnog prenosa, odnosno dodatnih aproksimacija pojednostavljenog modela.

Ipak, rezultati i zaključci ograničeni su na slučaj bočnih pregrada od istog materijala i izvedeni na osnovu relativno malog uzorka materijala pregrada i broja scenarija zvučne izolacije. Opširnije analize modela na većem broju scenarija neophodne su da bi se sa sigurnošću potvrdila njihova osnovanost.

9. Predlog jednog aproksimativnog postupka proračuna zvučne izolacije

U literaturi je već pokazano da u najvećem broju praktičnih slučajeva direktan prenos kroz zajedničku pregradu ima odlučujući uticaj na ukupnu zvučnu izolaciju [Gerretsen, 1979]. To je dokazano i u poglavlju 7, gde su odvojeno analizirani uticaji izolacionih karakteristika bočnih pregrada i spojeva zajedničke pregrade. Relacije koje su tako dobijene otvaraju mogućnost za izvesno pojednostavljenje procene zvučne izolacije uz razumno smanjenje tačnosti rezultata. Prema navodima iz literature (videti poglavlje 3.2.4), očekivana odstupanja proračunatih vrednosti izolacije u odnosu na realne, to jest izmerene u zgradama, imaju standardnu devijaciju između 2 dB i 3 dB. Prihvatljivo smanjenje tačnosti rezultata koje bi se postiglo bilo kojim novouvedenim matematičkim modelima bilo bi ono koje ne bi značajno povećalo ovu standardnu devijaciju. U 7. poglavlju pokazano je, pak, da se doprinos bočnih pregrada dobijenoj vrednosti izolacije u većini okolnosti, osim u ekstremnim slučajevima, kreće u rasponu od svega nekoliko decibela. U skladu sa tim, razumno je postaviti praktično pitanje neophodnosti korišćenja složenih matematičkih procedura klasičnog modela za kvantifikovanje bočnog prenosa, ionako ograničene tačnosti, ukoliko se zahteva grublja predikcija jednobrojne vrednosti izolacije.

9.1. Aproksimativne formule

U poglavlju 7 prikazana je šira analiza uticaja pojedinačnih izolacionih moći zajedničke i bočnih pregrada na rezultatnu jednobrojnu vrednost izolacije. Analiza je realizovana korišćenjem detaljnog modela proračuna. Na osnovu dobijenih rezultata je za slučaj masivnih pregrada moguće odrediti izvesne zakonitosti koje se mogu koristiti za određivanje aproksimativnih formula za izračunavanje jednobrojnih vrednosti izolacije.

Tako je na osnovu rezultata prikazanih na Slici 7.9 definisana aproksimativna empirijska formula za proračun merodavne vrednosti građevinske izolacione moći (R'_w) na osnovu merodavnih izolacionih moći zajedničke ($R_{w,sep}$) i bočnih pregrada ($R_{w,flank}$):

$$R'_w = R_{w,sep} - \left[\frac{4R_{w,sep} - R_{w,flank}}{10} + \frac{132}{10} \right], \quad (J9.1)$$

gde uglasta zagrada predstavlja zaokruživanje na najbliži ceo broj. Slično tome, prema rezultatima sa Slike 7.10 definisana je empirijska formula za jednobrojnu vrednost izolacije od zvuka udara:

$$L'_{n,w} = L_{n,w,sep} - \left[\frac{L_{n,w,sep} - R_{w,flank}}{10} + \frac{21}{5} \right], \quad (J9.2)$$

gde $L'_{n,w}$ i $L_{n,w,sep}$ predstavljaju merodavnu građevinsku i laboratorijsku vrednost normalizovanog nivoa zvuka udara zajedničke tavanice, respektivno, a $R_{w,flank}$ merodavnu vrednost izolacione moći bočnih zidova. U obe formule kao parametri koriste se samo jednobrojne merodavne vrednosti izolacije zajedničkog i njemu susednih bočnih elemenata, što daleko pojednostavljuje račun. To znači da se predloženi aproksimativni model uslovno može koristiti kao zamena za pojednostavljeni model.

Namena formula koje su ovde definisane je za prvu procenu izolacije od vazdušnog i udarnog zvuka u zgradi, umesto daleko složenijih proračuna prema klasičnom modelu. Njihova primena podrazumeva nezatno smanjenu tačnost, to jest razliku u odnosu na vrednosti dobijene procedurama proračuna klasičnog detaljnog modela.

Obe relacije važe za slučaj masivnih pregrada od istog osnovnog materijala, pri čemu su zajedničke i bočne pregrade jednake debljine, i kada su sva četiri spoja zajedničke pregrade istog tipa. Ipak, kao aproksimacija mogu se primeniti i u drugim kompleksnijim slučajevima sa masivnim pregradnim elementima. Na primer, ukoliko su svi bočni zidovi u predajnoj i prijemnoj prostoriji sa zajedničkim zidom od istog osnovnog materijala i iste debljine, a podovi i tavanice od drugog osnovnog materijala i druge debljine, merodavna vrednost građevinske izolacione moći može biti procenjena korišćenjem gornjih formula na sledeći način:

- izračunati vrednost R'_w za slučaj svih bočnih pregrada od istog osnovnog materijala i iste debljine kao dati bočni zidovi,
- izračunati vrednost R'_w za slučaj svih bočnih pregrada od istog osnovnog materijala i iste debljine kao date tavanice i podovi,
- R'_w za dati slučaj proceniti kao srednju vrednost prethodno dve izračunate vrednosti.

Iz rezultata analiza uticaja tipa spojeva zajedničke pregrade sa bočnim prikazanim na Slikama 7.13 i 7.14 mogu se izvesti relacije između merodavnih laboratorijskih i građevinskih vrednosti zvučne izolacije:

$$R'_w = \frac{4}{5} R_{w,sep} + 12 - C_R \quad \text{i} \quad \text{(J9.3)}$$

$$L'_{n,w} = \frac{4}{5} L_{n,w,sep} + 14 + C_L, \quad \text{(J9.4)}$$

gde C_R i C_L predstavljaju korekzione faktore za vazdušni zvuk i zvuk udara, respektivno, kojim se u formulama unosi uticaj spojeva zajedničke pregrade. Njihove vrednosti zavise od spojeva zajedničke pregrade. Za spojeve koji su analizirani u poglavlju 7, vrednosti ovih korekcionih faktora prikazane su u Tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Vrednosti korekcionih faktora za različite tipove spojeva zajedničke pregrade

tip spoja	C_R	C_L
<i>krut X</i>	5	3.5
<i>elast. X (f)</i>	0.5	0.5
<i>elast. X (s)</i>	5.5	6.5
<i>krut T</i>	5	3.5
<i>elast. T (s)</i>	6	6.5
<i>elast. T (f)</i>	6.5	6.5

Kao u prethodnom slučaju, i ove formule su izvedene samo za slučaj masivnih pregrada od istog osnovnog materijala jednake debljine, i kada su sva četiri spoja zajedničke pregrade istog tipa. Međutim, u svrhu aproksimacije mogu se primeniti i u kompleksnijim slučajevima, kada četiri spoja zajedničke pregrade nisu istog tipa. Na primer, u slučaju da spojevi zajedničkog zida sa bočnim zidovima pripadaju jednom tipu, a spojevi sa podovima i tavanicama drugom, razumno je očekivati da će zvučna izolacija biti između procenjenih vrednosti u dva slučaja u kojima su sva četiri spoja istog tipa kao spojevi sa podovima i tavanicama i istog tipa kao spojevi sa bočnim zidovima. Korekzioni faktori se tada mogu izračunati kao aritmetička sredina dva odgovarajuća korekcionih faktora iz Tabele 9.1.

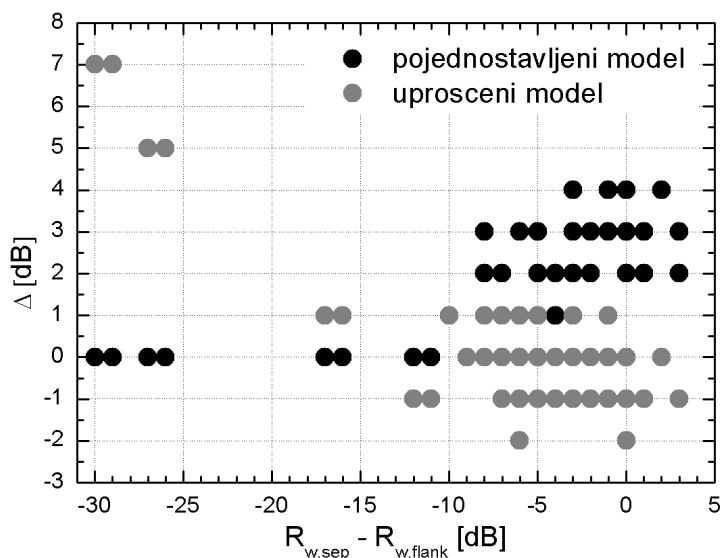
9.2. Diskusija

Rezultati izvedeni u ovom poglavlju pokazuju da je detaljni proračun moguće u izvesnoj meri aproksimirati veoma jednostavnim formulama u kojima figurišu samo merodavne vrednosti izolacije zajedničke i bočnih pregrada. Ovo je pokazano samo za slučaj svih masivnih i homogenih pregrada, pa su iz tog razloga, dve vrste modela (pojednostavljeni prema [EN 12354] i aproksimativni prema [Mašović et al., 2013 f; Mašović et al., 2013 h]) upoređeni prema dobijenim jednobrojnim vrednostima deskriptora zvučne izolacije sa detaljnim klasičnim modelom. Razlike jednobrojnih vrednosti u odnosu na detaljne modele date su na dijagramima na Slikama 9.1 i 9.2. Slika 9.1 ih prikazuje u funkciji razlika merodavnih izolacionih moći zajedničke i bočnih pregrada, a Slika 9.2 u funkciji merodavne izolacione moći zajedničke pregrade i tipova njenih spojeva sa bočnim pregradama. Na oba dijagrama istovremeno su prikazani rezultati za prostorije jedna pored druge i jedna iznad druge. Takođe, radi lakšeg poređenja sa odgovarajućim vrednostima za izolaciju od vazdušnog zvuka, razlike normalizovanih nivoa zvuka udara tavanica date su sa suprotnim predznakom. Na Slici 9.2 tipovi spojeva prikazani su različitim simbolima. Rezultati pojednostavljenog modela (P) dati su crnom, a aproksimativnog (uprošćenog) modela (U) crvenom bojom. Svetlijim nijansama obeleženi su elastični spojevi.

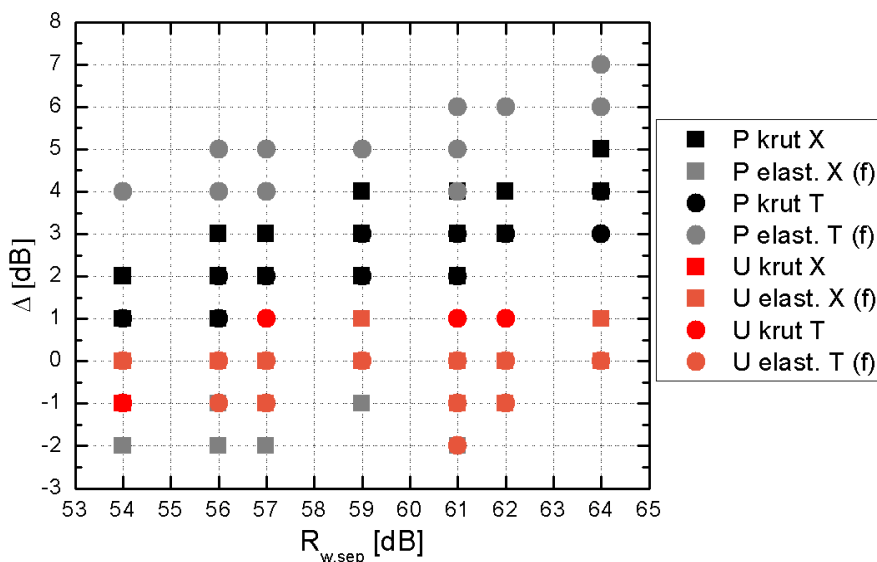
Sa Slike 9.1 uočljivo je da dobijene jednostavne empirijske formule daju vrednosti približnije detaljnim modelima u svim slučajevima zajedničke i bočnih pregrada sličnih fizičkih karakteristika i razlika u vrednostima merodavnih izolacionih moći ispod 10 dB. Za mnogo veće vrednosti izolacione moći bočnih pregrada u odnosu na zajedničku, formule ne daju zadovoljavajuće rezultate, ali se u takvim okolnostima uticaj bočnog prenosa može zanemariti, a građevinska izolaciona moć aproksimirati laboratorijskom izolacionom moći zajedničke pregrade.

Slično tome, prema rezultatima prikazanim na Slici 9.2, aproksimativni model za sve analizirane tipove spojeva zajedničke pregrade daje u praktično svim okolnostima merodavne vrednosti izolacije u opsegu ± 1 dB oko jednobrojnih vrednosti dobijenih detaljnim modelom. To nije slučaj sa pojednostavljenim modelom, po kome odstupanja u velikoj meri zavise od tipova spojeva, ali i od izolacionih karakteristika pregrada (poglavljje 8). Ipak, treba još jednom napomenuti da su svi rezultati ograničeni

na slučaj bočnih pregrada od istog materijala i izvedeni na relativno malom uzorku materijala pregrada i broju scenarija zvučne izolacije. Opširnije i detaljnije analize modela neophodne su da bi se sa sigurnošću potvrdila njihova osnovanost.



Slika 9.1. Poređenje razlika merodavnih vrednosti izolacione moći izračunatih primenom detaljnog i pojednostavljenog i aproksimativnog modela u funkciji razlike izolacionih moći pregrada



Slika 9.2. Poređenje razlika merodavnih vrednosti izolacione moći izračunatih primenom detaljnog i pojednostavljenog i aproksimativnog modela u funkciji izolacione moći zajedničke i bočnih pregrada i tipa spojeva između njih

Predložene aproksimativne formule zahtevaju dalju proveru u različitim okolnostima da bi se detaljnije odredio domen njihove primenljivosti. Potrebno je izvršiti analize i za slučaj prostorija različitih veličina i različitih površina zajedničkog i bočnih elemenata. Od presudnog značaja bilo bi i da se rezultati dobijeni ovakvim formulama verifikuju i merenjima na terenu, zajedno sa rezultatima detaljnog i pojednostavljenog modela. Posebno, u proračun izolacije od zvuka udara potrebno je uključiti i u praksi verovatniji scenario sa plivajućim podom kao dodatnim elementom.

10. Zaključak

Cilj ovog rada bio je istraživanje mogućnosti za unapređenje metoda proračuna zvučne izolacije u zgradama. Proračun zvučne izolacije se u opštem slučaju sastoji iz dva koraka. Prvi je proračun vrednosti frekvencijski zavisnih deskriptora izolacije – izolacione moći za vazdušni zvuk ili nivoa zvuka udara. Rezultat je predstavljen dijagramom ili tabelom s vrednostima po frekvencijskim podopsezima. Drugi korak je izračunavanje vrednosti jednobrojnog deskriptora na osnovu prethodno određenih vrednosti u frekvencijskim podopsezima. Ovako dobijena jednobrojna vrednost, označena kao „merodavna“ (*rated*), predstavlja konačan rezultat proračuna zvučne izolacije i služi za ocenu stanja u zgradama. Za oba ova proračunska koraka postoje usvojene procedure utvrđene standardima. One su detaljno opisane u poglavljima 2 i 3 ovog rada.

Proces prenosa zvuka između susednih prostorija odvija se brojnim putanjama na kojima imaju uticaja razni fizički faktori. Taj proces je suviše složen da bi se mogao modelovati na način prihvatljiv za projektantsku praksu, što znači da se do rezultata dolazi u razumnom vremenu, sa dostupnim podacima o građevinskim materijalima i konstrukcijama i sa standardnim nivoom inženjerskih alata (računara). Zbog toga usvojeni postuci proračuna podrazumevaju izvesna pojednostavljenja, što uvodi neminovnu grešku u rezultatu. Tome još treba dodati činjenicu da podatke s kojim se ulazi u proračune karakteriše merna nesigurnost proizašla iz načina na koji se oni dobijaju. Najzad, subjektivni doživljaj buke od koje izolacija treba da zaštiti kompleksan je fenomen zavisan od nivoa, ali i od prirode zvučnog signala, što usložnjava pitanje dovoljne zvučne izolacije za postizanje akustičkog komfora u zgradama.

Imajući sve to u vidu, procedure proračuna zvučne izolacije koje se danas koriste ostavljaju prostor za kritičku analizu njihove pouzdanosti i tačnosti u raznim okolnostima građevinske realnosti, a time i za eventualna usavršavanja, poboljšanje tačnosti rezultata proračuna i usklađivanje rezultata sa subjektivnom percepcijom buke od koje izolacija treba da štiti. Polazeći od takvog stava, u ovom radu su analizirani i predloženi sledeći doprinosi unapređenju metoda proračuna zvučne izolacije:

- predložena je modifikacija referentnih spektara buke za izračunavanje korekcionog člana jednobrojne vrednosti izolacione moći i izolovanosti da bi se dobile vrednosti koje su prilagođene realnoj buci od koje se štiti;
- utvrđen je nivo impulsivnosti buke koja nastaje u domaćinstvima da bi se realnije procenjivale minimalne potrebne vrednosti zvučne izolacije između stanova;
- utvrđen je uticaj vrednosti pojedinih ulaznih parametara proračuna zvučne izolacije između susednih prostorija na rezultat proračuna i na osnovu toga su izvedene preporuke za potrebnu preciznost pri usvajanju vrednosti tih parametara, a sa ciljem da se poboljša tačnost;
- predloženi su korekcionni faktori kojim se poboljšava tačnost rezultata dobijenih pojednostavljenom procedurom proračuna definisanom standardom;
- predložen je jedan aproksimativni model proračuna zvučne izolacije.

Određivanje jednobrojnih vrednosti izolacije od vazdušnog zvuka pomoću referentnih spektara, bez obzira da li se oni koriste za dobijanje spektralnih korekcionih faktora ili za direktno izračunavanje jednobrojnih vrednosti izolacije kao što je predloženo u novim ISO standardu, daje oblicima referentnih spektara ključni uticaj na konačan rezultat. Za neke oblike frekvencijske zavisnosti izolacije promene u obliku referentnog spektra variraju izračunate jednobrojne vrednosti za preko 10 dB. Stoga je od izuzetne važnosti da referentni spektar odslikava realnost spektra buke u životnoj sredini. Na osnovu analize rezultata monitoringa buke sprovedenog u stanovima tokom obavljanja svakodnevnih životnih aktivnosti pokazano je da referentni spektar *L_{living}* definisan ISO standardom ne odslikava stanje buke za najveći broj tipičnih okolnosti u stanovima. Konstatovano je da ovaj referentni spektar ima suviše velike vrednosti u najnižim frekvencijskim podopsezima. Stoga je u radu predložena jedna modifikacija oblika referentnog spektra za izračunavanje zvučne izolacije od vazdušnog zvuka da bi se rezultat podeseo prema realnosti buke u zgradama i tako približio subjektivnim kriterijumima za ocenu akustičkog komfora.

Monitoring buke sproveden u stanovima u okviru ovog rada pokazao je da su mnogi izvori buke u domaćinstvima pretežno impulsnog tipa. To su udarci posuđem ili nameštajem, glasan govor i smeh, i slično. Karakteristično za ovu vrstu buke je da generisani dugovremenski ekvivalentni nivo može biti značajno ispod opšte prihvaćene

granice izrazito bučnih aktivnosti (80 dB), pa čak i ispod usvojene granice za normalne aktivnosti (70 dB), ali da postoje povremeni ekscresni događaji tokom kojih nivo zvučnog pritiska neretko prelazi 90 dB. Njihov impulsni karakter dodatno može delovati uznemirujuće, posebno tokom sna, što se mora uzeti u obzir i oblikom referentnog spektra. Za kvantifikovanje impulsivnosti buke u domaćinstvima predloženo je korišćenje kombinacije kvantila L_5-L_{95} i $L_{10}-L_{90}$, standardne devijacije vremenski promenljivog nivoa zvuka, kao i *emergence* deskriptora, pre svega procentualnog trajanja bučnih događaja u odnosu na ukupno trajanje aktivnosti. Za prag bučnih događaja preporučena je relativna vrednost 10 dB iznad dugovremenog ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska. Sve ovo u izvesnoj meri zahteva dalje preispitivanje kriterijuma za zvučnu izolaciju između stanova.

Analiza impulsivnosti je uzgred donela još jedan argument u korist „užem“ obliku referentnog spektra L_{living} . Pokazano je da muzika sa izraženim niskofrekvencijskim komponentama reprodukovana preko kućnih audio uređaja, koja predstavlja i najvažniji izvor buke u domaćinstvima na niskim frekvencijama, generalno ne pokazuje impulsni karakter. Istovremeno, glavni izvori impulsne buke proizvode zvučnu energiju dominantno koncentrisanu u višim frekvencijskim podopsezima.

Klasični model proračuna zvučne izolacije, s obzirom na njegovu kompleksnost usled velikog broja ulaznih fizičkih i akustičkih parametara potrebnih za proračun, analiziran je sa stanovišta uticaja pojedinih ulaznih parametara na krajnji rezultat proračuna. Pokazano je da u praktičnim okolnostima fizički parametri pregrada, poput faktora unutrašnjih gubitaka i brzine longitudinalnih talasa u materijalima homogenih pregrada, nemaju značajan uticaj na rezultate proračuna. U radu je pokazano da se u praksi oni mogu približno aproksimirati bez bitnih posledica na tačnost rezultata proračuna. Nasuprot tome, indeksi prenosa vibracija kroz spojeve pregrada mogu značajnije uticati na konačnu izračunatu vrednost izolacije, i do nekoliko decibela. Problem u realizaciji proračuna zvučne izolacije je u tome što su to do sada retko merene veličine o čijim realnim vrednostima postoje malobrojni i međusobno različiti podaci u literaturi. Uticaj spojeva i izolacionih moći bočnih pregrada posebno je izražen u slučajevima visokoizolacionih zajedničkih pregrada, kada izolacija od vazdušnog zvuka između prostorija može biti do oko 5 dB niža od izolacije same zajedničke pregrade. U slučaju izolacije od zvuka udara, nivo zvuka udara može biti i do 3 dB viši

od nivoa zvuka udara tavanice izmerenog u laboratorijskim uslovima. U radu je predložena modifikacija standardnog postupka proračuna koja se zasniva na uvođenju margine sigurnosti u određivanju vrednosti indeksa prenosa vibracija. Usvojenom marginom se povećava vrednost indeksa prenosa pre pristupanja proračunu (do 5 dB).

Zbog činjenica da je krajnji rezultat proračuna zvučne izolacije jednobrojna, merodavna vrednost, često se u praksi umesto detaljnog proračuna zvučne izolacije koristi pojednostavljeni proračun. Za njegovu primenu dovoljno je poznavanje merodavnih, jednobrojnih vrednosti izolacije svih elemenata građevinskog sklopa. Algoritam ovog postupka takođe je definisan standardom. Ipak, u ovom radu je pokazano da dva proračuna definisana standardom, detaljni i pojednostavljeni, iako zasnovani na istom klasičnom modelu prenosa zvuka u zgradama ne daju uvek jednake vrednosti. To je posebno slučaj sa proračunom izolacije između prostorija u slučaju kada homogena zajednička pregrada ima slične fizičke i akustičke karakteristike kao i bočne, njoj susedne pregrade. Tada razlike između rezultata dobijenih pomoću dva modela mogu biti do 3-4 dB, pri čemu pojednostavljeni model daje više vrednosti izolacione moći od vazdušnog zvuka, odnosno niže vrednosti normalizovanog nivoa zvuka udara. Pokazano je da razlika nastaje kao posledica drugačijeg tretmana terenskih izolacionih moći pregrada i bočnog prenosa u dva modela i mora se uzeti u obzir pri korišćenju pojednostavljenog modela. Razlike između dva proračuna dodatno variraju u zavisnosti od vrste spojeva između zajedničke i susednih pregrada. Te razlike su najveće u slučaju elastičnih spojeva. Jedna mogućnost korekcije rezultata dobijenog pojednostavljenim proračunom predstavljena je u radu.

U radu je pokazano da se u slučaju pregradnih konstrukcija koje se veoma često pojavljuju u praksi građenja zgrada, kao što je masivna zajednička homogena pregrada okružena masivnim bočnim pregradama sličnih izolacionih karakteristika, merodavna vrednost izolacije može dobiti jednostavnim, aproksimativnim formulama. Ovakve konstrukcije se široko primenjuju u ovom regionu, delimično i zbog zahteva seizmike. Na osnovu analize izvršene detaljnim proračunima pomoću softvera napravljenog za tu namenu predložen je novi aproksimativni model za izračunavanje merodavnih vrednosti zvučne izolacije. Vrednosti koje se tako dobijaju bliže su vrednostima dobijenim detaljnim modelom nego one koje se dobijaju korišćenjem pojednostavljenog modela opisanog u standardu. Utvrđeno je da u slučaju masivne zajedničke homogene pregrade

okružene masivnim bočnim pregradama sličnih izolacionih karakteristika odstupanje rezultata dobijenih predloženom metodom od rezultata s detaljnim modelom je do ± 1 dB.

Zaključak ovde prikazanog rada je da postoji značajan prostor za poboljšanje i pojednostavljenje postojećih metoda za proračun zvučne izolacije u zgradama. To je omogućeno kako modifikacijom matematičkih procedura proračuna, uz jasniji uvid u relacije između uključenih parametara i njihov značaj na rezultate proračuna, tako i boljim uvidom u karakteristike same buke od koje izolacija štiti i njenu potencijalnu subjektivnu percepciju. U skladu sa tim, najkorisnije buduće dopune analizi bila bi sa jedne strane opsežna laboratorijska ili terenska merenja zvučne izolacije, u cilju provere modifikovanih procedura i zaključaka, a sa druge psihoakustički testovi uticaja buke različitih karakteristika (kako spektralnih tako i vremenskih) na subjektivan osećaj ugroženosti bukom. Znanja u oba pravca svakako bi doprinela efikasnijim i subjektivno prilagođenijim metodama za ocenu i predikciju zvučne izolacije u zgradama.

Literatura

- [AcouBAT, 2014] <http://www.cstb.fr/dae/en/nos-produits/logiciels/acoubat-sound.html>
- [Adnađević et al., 2010] M. Adnađević, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, D. Mašović, Statistics of Sound Level Generated in Dwellings During Everyday Activities – Preliminary Analysis, European (EAA-COST) Symposium “Harmonization of European Sound Insulation Descriptors and Classification Standards“, Firenca, Zbornik radova, 2010.
- [Adnađević et al., 2011 a] M. Adnađević, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, D. Mašović, Noise in dwellings generated in normal home activities – general approach, Proceedings of Forum Acusticum, Aalborg, Denmark (2011), pp. 1335–1340.
- [Adnađević et al., 2011 b] M. Adnađević, D. Mašović, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, The use of emergence descriptors for noise in dwellings evaluation, 19. TELFOR, zbornik radova, Beograd, Zbornik radova, 1107-1110, 2011.
- [Adnađević et al., 2011 c] M. Adnađević, D. Mašović, Analiza buke u stanovima generisane u svakodnevnim aktivnostima korišćenjem klasičnih deskriptora buke, 55. ETRAN, Teslić, Zbornik radova, AK1.2-1-4, 2011.
- [Alba et al., 2007] J. Alba, J. Venero, R. Del Rey, J. Ramis Soriano, E. Escuder, R. Gavalda, In situ measurements of the structural reverberation time of several brick walls, Proc. ICA 2007, Madrid, Španija, 2007.
- [Barbaresi et al., 2007] L. Barbaresi, G. Semprin, Laboratory measurements of the flanking transmission for brick wall junctions, Proc. ICA 2007, Madrid, Španija (2007).
- [Bastian, 2014] <http://www.datakustik.com/en/products/bastian/>
- [Beranek, 1960] L. L. Beranek, Noise reduction, prvo izdanje, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 292-293, (1960).
- [Buratti et al., 2014] C. Buratti, E. Belloni, E. Moretti, Façade noise abatement prediction: New spectrum adaptation terms measured in field in different road and railway traffic conditions, Appl. Acoust. 76, 238-248 (2014).
- [Can et al., 2008] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, J. Defrance, Capturing urban traffic noise dynamics through relevant descriptors, Appl. Acoust. 69 (12), 1270-1280 (2008).

- [COST Action TU0901, 2014] COST Action 0901, <http://www.costtu0901.eu/>, 2014.
- [Craik, 2001] R. J. M. Craik, The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings, *Appl. Acoust.* 62 (1), 29–46 (2001)
- [Cremer et al., 2005] L. Cremer, M. Heckl, B. A. T. Petersson, *Structure-Borne Sound*, treće izdanje, Springer, (2005).
- [Crispin et al., 2004] C. Crispin, C. Mertens, M. Blasco, B. Ingelaere, M. Van Damme, D. Wuyts, The vibration reduction index K_{ij} : laboratory measurements versus predictions EN 12354-1 (2000), *Proc. Internoise 2004*, Prag, Češka Republika (2004).
- [Crocker et al., 1969] M. J. Crocker, A. J. Price, Sound transmission using statistical energy analysis, *J. Sound Vib.* 9 (3), 469-486, (1969).
- [DIN 4109, 1989] DIN 4109, *Sound insulation in buildings – Requirements and testing*, 1989.
- [Directive 2002/49/EC, 2002] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise, *Official Journal of the European Communities*, 2002.
- [Eberhardt et al., 1987] J. L. Eberhardt, L.-O. Stråle, M. H. Berlin, The influence of continuous and intermittent traffic noise on sleep, *Journal of Sound and Vibration*, 116(3), 445-464 (1987).
- [EN 12354] EN 12354, *Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements*
- Part 1: Airborne sound insulation between rooms, 2000.
 - Part 2: Impact sound insulation between rooms, 2000.
 - Part 3: Airborne sound insulation against outdoor noise, 2000.
 - Part 4: Transmission of indoor sound to the outside, 2000.
 - Part 5: Noise from technical installations and equipment, 2009.
 - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces, 2003.
- [Galbrun, 2008] L. Galbrun The prediction of airborne sound transmission between two rooms using first-order flanking paths, *Appl. Acoust.* 69 (12), 1332–1342 (2008)
- [Gerretsen, 1979] E. Gerretsen, Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures, *Appl. Acoust.* 12 (6), 413-433 (1979).

- [Gerretsen, 1986] E. Gerretsen, Calculation of Airborne and Impact Sound Insulation Between Dwellings, *Appl. Acoust.* 19 (4), 245-264 (1986).
- [Gerretsen, 1994] E. Gerretsen, European developments in prediction models for building acoustics, *Acta Acust.* 2(3), 205–214 (1994).
- [Grimwood, 1997] C. Grimwood, Complaints about poor sound insulation between dwellings in England and Wales, *Appl. Acoust.* 52(3/4), 211–223 (1997).
- [Guski, 1977] R. Guski, An analysis of spontaneous noise complaints, *Environmental Research* 13 (2), 229–236 (1977).
- [Harris, 1957] C. M. Harris, *Handbook of Noise Control*, prvo izdanje, McGraw-Hill Book Company, pp. 1-1, (1957).
- [Heckl et al., 1963] M. Heckl, E. J. Rathe, Relationship between the Transmission Loss and the Impact-Noise Isolation of Floor Structures, *J. Acoust. Soc. Am.* 35 (11), 1825–1830 (1963)
- [Insul, 2014] <http://www.insul.co.nz/>
- [ISO 10140] ISO 10140 Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements, svi delovi.
- [ISO 140] ISO 140 Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements, svi delovi.
- [ISO 16717] ISO 16717, Acoustics – Evaluation of sound insulation spectra by single-numbers
 – Part 1: Airborne sound insulation, 2012.
 – Part 2: Impact sound insulation, 2012.
- [ISO 1996] ISO 1996, Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise
 – Part 1: Basic quantities and assessment procedures, 2003.
 – Part 2: Determination of sound pressure levels, 2007.
- [ISO 6242-3] ISO 6242-3:1992 Building construction – Expression of users' requirements – Part 3: Acoustical requirements, 1992
- [ISO 717] ISO 717, Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements
 – Part 1: Airborne sound insulation, 2013.
 – Part 2: Impact sound insulation, 2013.

- [ISO 717-1, 1996] ISO 717-1:1996, Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, 1996.
- [Jackson et al., 1975] G. M. Jackson and H. G. Leventhall, Household appliance noise, *Appl. Acoust.* 8(2), 101–108 (1975).
- [Josse et al., 1964] R. Josse, C. Lamure, Transmission du son par une paroi simple, *Acustica* 14, 266-280 (1964).
- [Kropp et al., 1994] W. Kropp, A. Pietrzyk, T. Kihlman, On the meaning of the sound reduction index at low frequencies, *Acta Acust.* 2(5), 379–392 (1994).
- [Kryter, 1982] K. D. Kryter, Community annoyance from aircraft and ground vehicle noise, *J. Acoust. Soc. Am.* 72 (4), 1222–1242 (1982)
- [Kurtović, 1977] H. Kurtović, Osnovi tehničke akustike, prvo izdanje, Naučna knjiga, Beograd, pp. 472-473, (1977).
- [Kuttruff, 2007] H. Kuttruff, Acoustics – An introduction, prvo izdanje na engleskom jeziku, Taylor & Francis, pp. 287-289, 309-310 (2007).
- [Langdon et al., 1977] F. J. Langdon, I. B. Buller, Party wall insulation and noise from neighbours, *J. Sound Vib.* 55 (4), 495-507 (1977)
- [Lyon et al., 1962] R. H. Lyon, G. Maidanik, Power Flow between Linearly Coupled Oscillators, *J. Acoust. Soc. Am.* 34 (5), 623–639 (1962)
- [Lyon et al., 1965] R. H. Lyon, T. D. Scharton, Vibrational-Energy Transmission in a Three-Element Structure, *J. Acoust. Soc. Am.* 38 (2), 253–261 (1965)
- [Ljunggren et al., 2014] F. Ljunggren, C. Simmons, K. Hagberg, Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, *Appl. Acoust.* 85, 57-68 (2014).
- [Manuel de Abreu Dias, 2009] R. Manuel de Abreu Dias, Extended Abstract, Comparative analysis between airborne sound insulation prediction methods, Universidade Tecnica de Lisboa – Instituto Superior Tecnico, novembar 2009.
- [Mašović et al., 2011 a] D. Mašović, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, M. Adnađević, Noise in dwellings generated in normal home activities – spectral approach, *Proceedings of Forum Acusticum, Aalborg, Denmark* (2011), pp. 1383–1388.
- [Mašović et al., 2011 b] D. Mašović, M. Adnađević, Spektralna analiza uobičajene buke u domaćinstvima, 55. ETRAN, jun 2011, Teslić, Zbornik radova, AK1.3-1-4

- [Mašović et al., 2013 a] D. Mašović, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation', J. Acoust. Soc. Am. Express Letters, Vol.134, No.5, 2013, 420-425
- [Mašović et al., 2013 b] D. Mašović, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, Comparison between the spectrum shape of traffic noise in Belgrade and the ISO 717-1 reference spectrum, Internoise 2013, septembar 2013, Insbruk, Austrija, Proceedings, ID 0523
- [Mašović et al., 2013 c] D. Mašović, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Uticaj pojedinih fizičkih parametara na tačnost proračuna zvučne izolacije prema standardima EN 12354, 57. ETRAN, jun 2013, Zlatibor, Zbornik radova, AK1.2
- [Mašović et al., 2013 d] D. Mašović, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, An insight into EN 12354 sound insulation calculation results dispersion due to variations of building element performance quantities, Internoise 2013, septembar 2013, Insbruk, Austrija, Proceedings, ID 0522
- [Mašović et al., 2013 e] D. Mašović, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, The influence of less available physical parameters on the sound insulation calculation according to EN 12354, XLVIII ICEST, jun 2013, Ohrid, Makedonija, Zbornik radova Vol. 1, 153-156
- [Mašović et al., 2013 f] D. Mašović, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Calculation of sound insulation according to EN 12354: Influence of sound reduction index of flanking elements, 21. TELFOR, novembar 2013, Beograd, Zbornik radova, 789-792
- [Mašović et al., 2013 g] D. Mašović, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Uticaj bočnog prenosa na vrednost izolacije od vazdušnog zvuka studijskih prostorija, Taktions 2013, novembar 2013, Novi Sad, Srbija, Proceedings, 37-40
- [Mašović et al., 2013 h] D. Mašović, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Calculation of sound insulation according to EN 12354: Influence of type of the separating element junctions, 21. TELFOR, novembar 2013, Beograd, Zbornik radova, 793-796
- [Mašović et al., 2013 i] D. Mašović, N. Arsić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Customization of software for sound insulation prediction in buildings to

- national legislations – Case study: Slovenia, XLVIII ICEST, jun 2013, Ohrid, Makedonija, Zbornik radova Vol. 1, 149-152
- [Mašović et al., 2013 j] D. Mašović, N. Arsić, M. Stanojević, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Problemi softverske implementacije proračuna zvučne izolacije po standardima SRPS EN 12354, 57. ETRAN, jun 2013, Zlatibor, Zbornik radova, AK1.3
- [Mašović et al., 2013 k] D. Mašović, K. Miskinis, M. Oguc, F. Scamoni, C. Scrosati, Analysis of façade sound insulation field measurements – Influence of acoustic and non-acoustic parameters, Internoise 2013, Insbruk, Austrija, Proceedings, septembar 2013
- [Mašović et al., 2013 l] D. Mašović, K. Miskinis, M. Oguc, F. Scamoni, C. Scrosati, Analysis of façade sound insulation field measurements – Comparison of different performance descriptors and influence of low frequencies extension, Internoise 2013, Insbruk, Austrija, Proceedings, septembar 2013
- [Mašović et al., 2014 a] D. Mašović, M. Mijić, The difference between single number values of sound insulation calculated using detailed and simplified model of EN 12354, Forum Acusticum 2014, septembar 2014, Krakov, Poljska, neobjavljeno
- [Mašović et al., 2014 b] D. Mašović, M. Mijić, Razlika između vrednosti zvučne izolacije izračunatih korišćenjem detaljnog i pojednostavljenog modela prema EN 12354, Etran 2014, Vrnjačka Banja, Srbija, Zbornik radova, jun 2014
- [Metzen, 1999] H. A. Metzen, Accuracy of CEN-prediction models applied to German building situations, *Building Acoustics*, 6 (3), 325-340 (1999)
- [Metzen, 2005] H. A. Metzen, Prediction of Sound Insulation in Timber Frame Buildings, *Proceedings of Forum Acusticum, Budimpešta, Mađarska (2005)*, pp. 2347–2352.
- [Mijić et al., 2012] M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, D. Todorović, A. Radivojević, Sound insulation between dwellings in existing housing stock in Serbia, *Proceedings of Euronoise 2012, Prag, Češka Republika*, pp. 1254-1259, 2012.
- [Monteiro et al., 2012] C. R. A. Monteiro, C. M. Marino, F. Torchia, E. Nannipieri, N. Robertson, S. R. Smith, M. Machimbarrena, Comparative analysis of airborne sound insulation field measurements using different ISO 717-1 performance

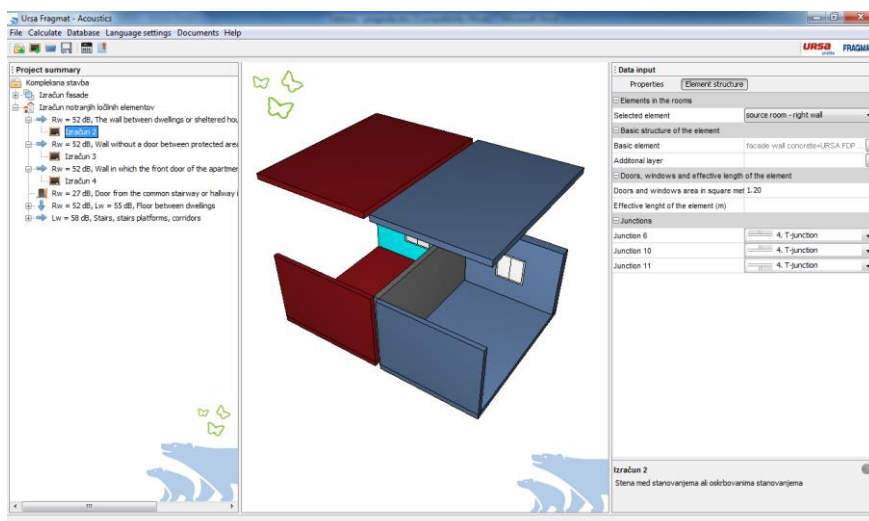
- descriptors—Lightweight separating walls and floors, Proceedings of Euronoise, Prague, Czech Republic (2012), pp. 1202–1207.
- [Mortensen, 1999] F. R. Mortensen, Subjective evaluation of noise from neighbors with focus on low frequencies, Technical University of Denmark, 1999.
- [Muellner et al., 2012] H. Muellner, M. M. Stani, Living-Noise Spectrum Evaluation – Empirical Evaluation of the Contemporary Living Noise Spectrum in Multi-Family Houses, Federal Institute of Technology Vienna (TGM), izvestaj br. 11977/AB, jul 2012.
- [Neubauer, 2005] R. O. Neubauer, Airborne sound insulation in dwellings and its subjective estimation, 12th ICSV 2005, Lisabon, Portugal, 2005.
- [Öhrström et al., 1982] E. Öhrström, R. Rylander, Sleep disturbance effects of traffic noise – A laboratory study on after effects, Journal of Sound and Vibration, 84(1), 87-103 (1982).
- [Park et al., 2009] H. K. Park, J. S. Bradley, Evaluating standard airborne sound insulation measures in terms of annoyance, loudness, and audibility ratings, J. Acoust. Soc. Am. 126(1), 208–219 (2009).
- [Pedersen, 1995] D. B. Pedersen, Estimation of vibration attenuation through junctions of building structures, Appl. Acoust., vol. 46, no. 3, pp. 285-305, 1995.
- [Pedersen, 1999] D. B. Pedersen, Evaluation of EN 12354 part 1 and 2 for Nordic Dwelling Houses, Building Acoustics, 6 (3), 259-268 (1999)
- [Raimbault et al., 2003] M. Raimbault, C. Lavandier, M. Berengier, Ambient sound assessment of urban environments: field studies in two French cities, Appl. Acoust. 64 (12), 1241-1256 (2003).
- [Rasmussen et al., 2010] B. Rasmussen, J. H. Rindel, Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe, Appl. Acoust. 71 (3), 171-180 (2010).
- [Rasmussen, 2006] B. Rasmussen, Façade sound insulation comfort criteria in European classification schemes for dwellings, Proceedings of Euronoise 2006, Tampere, Finska, 2006.
- [Rasmussen, 2010] B. Rasmussen, Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe, Appl. Acoust. 71 (4), 373-385 (2010).

- [Rasmussen et al., 2013] B. Rasmussen, M. Machimbarrena (editors), COST Action TU0901 – Towards a common framework in building acoustics throughout Europe, COST Office, pp. 26–28 (2013).
- [Richter, 1986] U. Richter, Nachhallzeit und mittlere Schnelle von ebenen Platten bei Biegewellenanregung, *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik* 5-6, 189-192 (1968)
- [Rychtáriková et al., 2012] M. Rychtáriková, H. Mülner, M. Stani, V. Chmelík, C. Glorieux, Does the living noise spectrum adaptation of sound insulation match the subjective perception, *Proceedings of Euronoise 2012*, Prag, Češka Republika, pp. 180-184, 2012.
- [Schiavi et al., 2010] A. Schiavi, A. Astolfi, The prediction of the vibration reduction index K_{ij} for brick and concrete rigid junctions, *Appl. Acoust.*, vol. 71, no. 6, pp. 523-530, 2010.
- [Schneider et al., 2011] M. Schneider, H-M. Fischer, M. Weimer, Vibration reduction index of 'real' junctions, *Proc. Forum Acusticum 2011*, Alburg, Danska, 2011.
- [Schultz, 1978] T. J. Schultz, Synthesis of social surveys on noise annoyance, *J. Acoust. Soc. Am.* 64 (2), 377–405 (1978)
- [Smith et al., 2003] S. Smith, R. Mackenzie, R. Mackenzie, T. Waters-Fuller, The implications of ISO 717 spectrum adaptation terms for residential dwellings, *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 25 (3), 2003.
- [SONarchitect ISO, 2014] <http://www.soundofnumbers.net/index.php/sonarchitect-iso>
- [SRPS U.J6.201] SRPS U.J6.201:1990, Akustika u gradarstvu – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada, 1990.
- [TSG-1-005] TSG-1-005:2012, Tehnična smernica, Zaščita pred hrupom v stavbah, Ministarstvo za okolje in prostor, Republika Slovenija, 2012.
- [URSA 2014] URSA, <http://www.ursa.si/sl-si/arhitekti/strani/program-akustika.aspx>, 2014.
- <http://www.ursa.com.hr/hr-hr/arhitekti/strani/program-akustika.aspx>
- <http://www.ursa.rs/sr-latn-cs/arhitekti/stranice/program-akustika.aspx>
- [Van den Berg, 2004] M. Van den Berg, Neighbour noise: A rational approach, *Proceedings of the 2nd WHO International Housing and Health Symposium*, Bon, Nemačka, pp. 151-154, 2004.

- [Vér et al., 2006] I. L. Vér, L. L. Beranek, Noise and vibration control engineering – Principles and applications, drugo izdanje, John Wiley & Sons, Inc., pp. 444-445, (2006).
- [Vian et al., 1983] J.-P. Vian, W. F. Danner, J. W. Bauer, Assessment of significant acoustical parameters for rating sound insulation of party walls, J. Acoust. Soc. Am. 73(4), 1236–1243 (1983).
- [Vorländer, 2008] M. Vorländer, Auralization – Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality, prvo izdanje, Springer, pp. 160–162 (2008).
- [Vos, 1992] J. Vos, Annoyance caused by simultaneous impulse, road-traffic, and aircraft sounds: A quantitative model, J. Acoust. Soc. Am. 91 (6), 3330–3345 (1992)
- [Vos, 2001] J. Vos, On the annoyance caused by impulse sounds produced by small, medium-large, and large firearms, J. Acoust. Soc. Am. 109 (1), 244–253 (2001)
- [WHO, 2014] WHO, <http://www.euro.who.int/>, 2014.
– <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/noise>
– <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/data-and-statistics>
- [СНиП II-12-77, 1978] СНиП II-12-77, Строительные нормы и правила, Часть II – Нормы проектирования, Глава 12: Защита от шума, pp. 15 (1978)

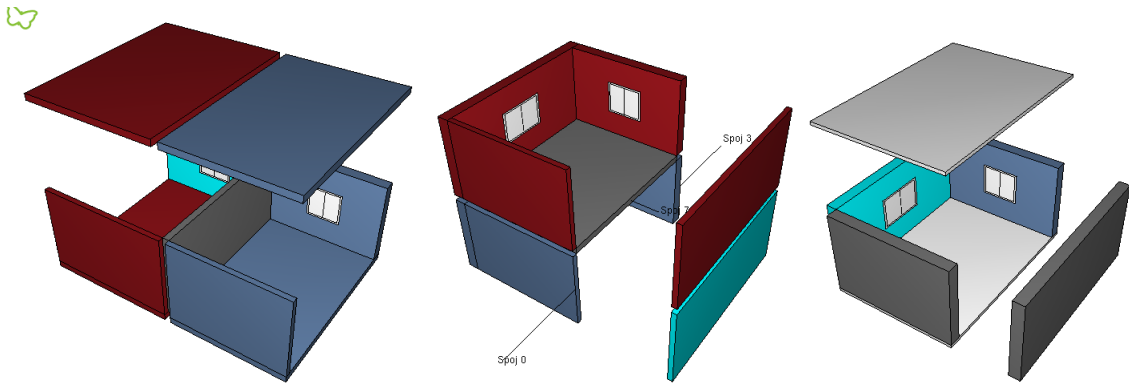
PRILOG A: Grafičko okruženje softvera za proračun zvučne izolacije

Izgled glavnog prozora grafičkog interfejsa za svaki pojedinačni proračun dat je na Slici A.1. Stablo sa svim proračunima obuhvaćenih projektom dato je u levom delu prozora, geometrijski model prostorija za trenutno aktivan proračun (Slika A.2) zauzima centralni deo prozora, dok se svi ulazni podaci unose od strane korisnika u desnom delu. Ovi podaci obuhvataju dimenzije prostorija, odabir osnovnih materijala svih pregrada, dodatnih obloga, malih i ostalih elemenata iz baze elemenata, odabir tipova svih spojeva itd.

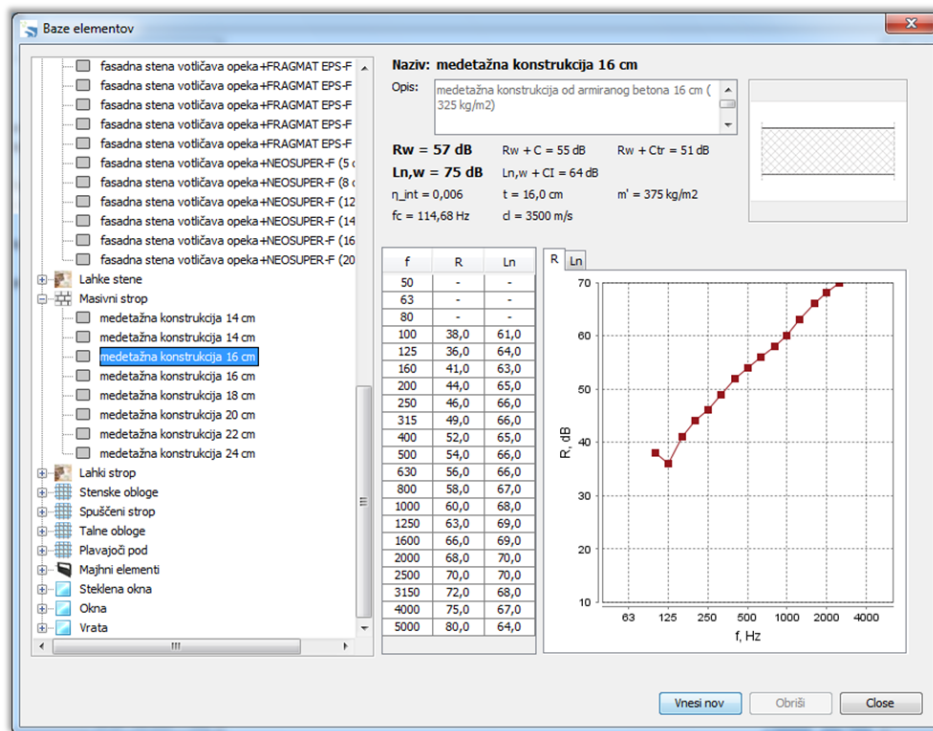


Slika A.1. Grafičko okruženje softvera za proračun zvučne izolacije

Korisnik zadavanje ulaznih parametara vrši popunjavanjem odgovarajućih polja u grafičkom okruženju softvera, kroz padajuće menije i odabiranje za proračun relevantnih elemenata iz baze građevinskih elemenata, pridruženoj softveru. Nakon definisanja scenarija svakog pojedinačnog proračuna, vrši se kalkulacija i program kao izlazni podatak nudi izračunatu vrednost građevinske izolacione moći. Pored dimenzija prostorija, desni deo glavnog prozora (Slika A.1) rezervisan je za unos drugih neophodnih veličina od strane korisnika: tipova pregrada (Slika A.3) i spojeva i eventualnih dodatnih obloga i drugih relevantnih građevinskih elemenata.



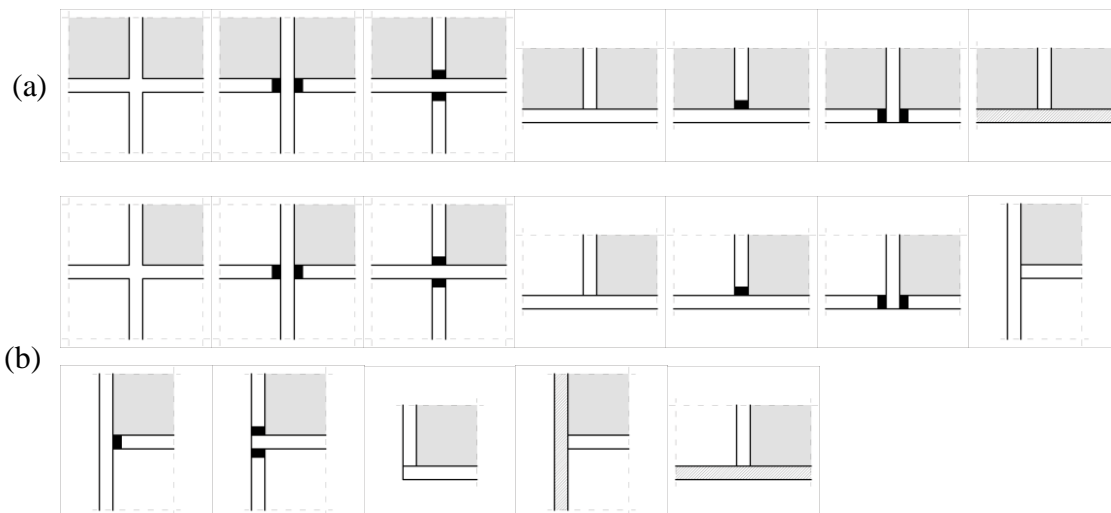
Slika A.2. Geometrijska konfiguracija prostorija sa zajedničkim zidom (levo), zajedničkom tavanicom (u sredini) i prijemne prostorije sa fasadnim zidom (desno)



Slika A.3. Izgled prozora baze građevinskih elemenata (primer masivnih homogenih tavanica)

Na Slici A.4 dati su simbolički prikazi spojeva, pri čemu svetlo osenčena površina označava predajnu ili prijemnu prostoriju. Sa slike se vidi da se, radi bolje razumljivosti, prikaz spoja mora prilagoditi u zavisnosti od toga da li se nalazi na zajedničkoj ili samo nekoj od bočnih pregrada, kako je orijentisan (u slučaju T-spojeva)

i gde se nalazi eventualni elastični dodatak. Takođe, prikazane oznake spojeva zajedničke pregrade potrebno je rotirati za 90 stepeni ukoliko se radi o tavanici.



Slika A.4. Simbolički prikaz različitih tipova spojeva (a) zajedničke pregrade (b) ostalih pregrada

Formiranje projekta u softveru vrše se kroz niz sukcesivnih prozora. Korisnik najpre unosi osnovne podatke o novom projektu u prozoru na Slici A.5. U prozoru prikazanom na Slici A.6, korisnik može izabrati, prema dokumentu „*Tehnična smernica TSG-1-005:2012*“. Za svaki od izabranih tipova može se kasnije izvršiti proizvoljan broj proračuna, a, ukoliko je potrebno, mogu se naknadno dodavati i drugi tipovi.

Nov elaborat

Koraki

1. Osnovni podatki
2. Vrsta zgrade
3. Položaji ki se proverjajo

Osnovni podatki

Oznaka elaborata*

Naziv objekta*

Lokacija Objekta*

Investitor

Odgovorni vodja projekta

Avtor elaborata

Datum izdelave elaborata* (dd.MM.yyyy)

Vrsta zgrade Kompleksna Enodružinska

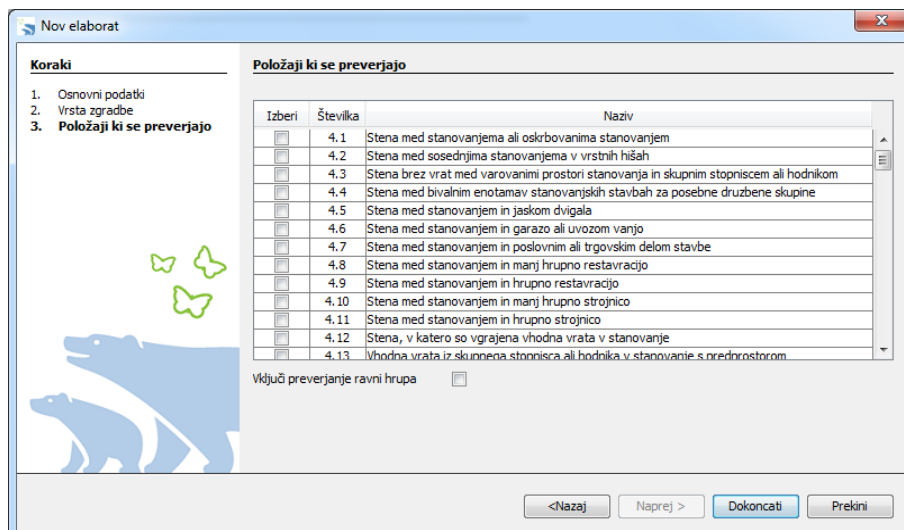
Meja sigurnosti* D2m,nT,Atr dB R'w dB L'n,w dB

Območje varstva pred hrupom

* Polja označena z zvezdico morajo biti izpolnjena

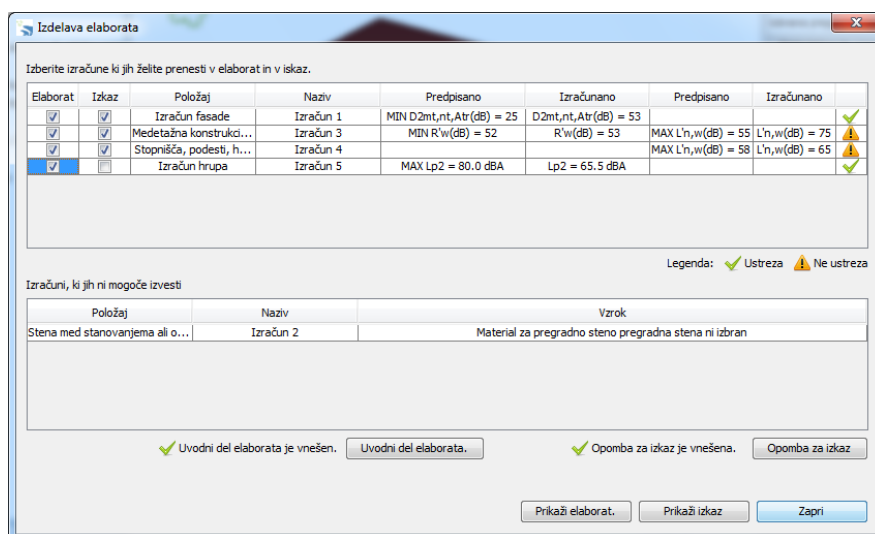
<Nazaj

Slika A.5. Unos osnovnih podataka o projektu



Slika A.6. Odabir tipova pregrada za koje se vrši proračun

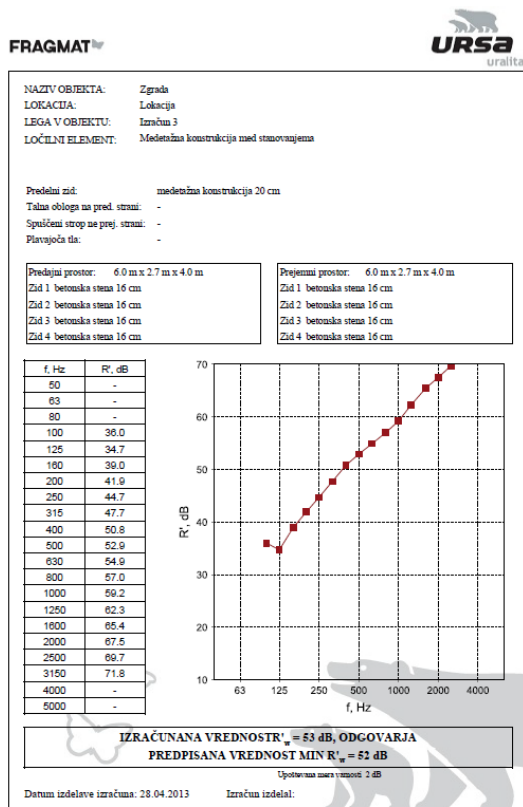
Nakon unošenja svih parametara i izvršavanja proračuna, rezultati u vidu merodavnih vrednosti izolacije prikazuju se u okviru prozora datog na Slici A.7.



Slika A.7. Rezultati proračuna zvučne izolacije i poređenje sa minimalnim kriterijumima

Rezultate proračuna moguće je na kraju izvesti u vidu izveštaja u dve forme, prikazane na Slici A.8. Sa leve strane dat je prikaz rezultata pojedinačnog proračuna (u ovom slučaju građevinske izolacione moći) u ternim frekvencijskim podopsezima. Sa desne strane dat je tabelarni prikaz izračunatih merodavnih vrednosti zvučne izolacije u

zakonski propisanoj formi [TSG-1-005:2012, 2012] za sve proračune obuhvaćene projektom. Tabela prikaz dat je sa razlogom poređenja izračunatih vrednosti sa zakonski propisanim minimalnim kriterijumima za date tipove zgrada i pregrada, kao i vrednostima izmerenim na terenu, nakon izgradnje objekta



Zaštita pred hrupom v stavbi
Zvočna izolacija notranjih ločilnih elementov

Ločilni element ali prostor	Projektna vrednosti	Naitrovani ulrepi	Izračunane vrednosti	Izmerjene vrednosti	Ustrezno (da/ne)
NOTRANJJI POKONČNI LOČILNI ELEMENTI (stene, stene z vrati ipd.)					
1 Stopnišča, podesti, hodniki	$L'_{n,w}$ (dB)	max 58	65		
2 Vhodna vrata iz skupnega stopnišca ali hodnika v stanovanje s predzračnikom	$R'_{n,w}$ (dB)	min 27	-		
NOTRANJJI VODORAVNI LOČILNI ELEMENTI (medetažne konstrukcije, podesti, stopnice)					
1 Medetažna konstrukcija med stanovanjema	$R'_{n,w}$ (dB)	min 52	53		
	$L'_{n,w}$ (dB)	max 55	75		

Slika A.8. Izgled izveštaja sa rezultatima proračuna: levo – rezultati pojedinačnog proračuna sa vrednostima u tercnim podopsezima, desno – izračunate merodavne vrednosti radi poređenja sa minimalnim kriterijumima i izmerenim vrednostima

PRILOG B: Izolacione karakteristike analiziranih pregrada

Homogene pregrade

Tabela B.1. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 325 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 54 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 77 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 14 cm															
opis	armirani beton debljine 14 cm, gustina 325 kg/m^2															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
54	52			48		77		66		325	2321	0,14	0,006	3500		131,1
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	35	37	35	41	44	46	49	52	54	55	58	60	63	66	68	70
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$L_n[\text{dB}]$	63	66	65	67	68	68	67	68	68	69	70	71	71	72	72	70

Tabela B.2. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 400 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 56 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 77 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 14 cm															
opis	armirani beton debljine 14 cm, gustina 400 kg/m^2															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
56	54			50		77		66		400	2857	0,14	0,006	3500		131,1
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	38	36	39	41	46	47	50	54	56	57	59	63	66	66	67	67
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$L_n[\text{dB}]$	63	66	65	67	68	68	67	68	68	69	70	71	71	72	72	70

Tabela B.3. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 375 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 57 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 75 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 16 cm															
opis	armirani beton debljine 16 cm, gustina 325 kg/m^2															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
57	55			51		75		64		375	2344	0,16	0,006	3500		114,7
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	38	36	41	44	46	49	52	54	56	58	60	63	66	68	70	72
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$L_n[\text{dB}]$	61	64	63	65	66	66	65	66	66	67	68	69	69	70	70	68

Tabela B.4. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 425 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 59 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 72 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 18 cm																
opis	armirani beton debljine 18 cm																
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
59	57			53			72		61		425	2361	0,18	0,006	3500		101,9
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$R[\text{dB}]$	40	38	43	46	48	51	54	56	58	60	62	65	68	70	72	74	
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$L_n[\text{dB}]$	61	61	62	63	61	62	62	63	63	64	65	66	66	66	67	66	

Tabela B.5. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 400 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 61 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 75 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 16 cm																
opis	armirani beton debljine 16 cm, gustina 400 kg/m ²																
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
61	60			55			75		64		400	2500	0,16	0,006	3500		114,7
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$R[\text{dB}]$	44,5	44	47	44,5	50	53	56	60,5	61,5	59,5	64	70	71	76	77	76	
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$L_n[\text{dB}]$	61	64	63	65	66	66	65	66	66	67	68	69	69	70	70	68	

Tabela B.6. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 470 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 61 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 70 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 20 cm																
opis	armirani beton debljine 20 cm																
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
61	59			54			70		59		470	2350	0,2	0,006	3500		91,7
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$R[\text{dB}]$	41	40	44	47	50	53	56	58	60	62	64	67	70	72	74	76	
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$L_n[\text{dB}]$	59	59	60	61	59	60	60	61	61	62	63	64	64	64	65	64	

Tabela B.7. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 515 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 62 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 68 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 22 cm																
opis	armirani beton debljine 22 cm																
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
62	61			56			68		57		515	2341	0,22	0,006	3500		83,4
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$R[\text{dB}]$	43	44	47	50	52	54	56	58	60	62	65	67	69	72	74	77	
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
$L_n[\text{dB}]$	57	57	58	59	57	58	58	59	59	60	61	62	62	62	63	62	

Tabela B.8. Parametri homogenog zida/tavanice ($m' = 565 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 64 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 66 \text{ dB}$)

naziv	betonska tavanica 24 cm															
opis	armirani beton debljine 24 cm															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
64	63			58		66		55		565	2354	0,24	0,006	3500		76,5
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	45	46	49	51	54	56	58	60	62	64	67	70	72	74	76	79
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$L_n[\text{dB}]$	55	55	56	57	55	56	56	57	57	58	59	60	60	60	61	61

Tabela B.9. Parametri homogenog zida ($m' = 50 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 32 \text{ dB}$)

naziv	zid od blokova 5 cm															
opis	gipsana cigla širine 5 cm															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
32	32			30		/		/		50	1000	0,05	0,015	2600		494,0
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	28	30	33	33	33	32	30	28	27	26	29	34	36,5	39	41,5	44

Tabela B.10. Parametri homogenog zida ($m' = 70 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 35 \text{ dB}$)

naziv	zid od blokova 7 cm															
opis	gipsana cigla širine 7 cm															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
35	34			33		/		/		70	1000	0,07	0,015	2600		352,9
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	35	34	34	32	30	28	27	27	30	34	37	40	43	45,5	48	50,5

Tabela B.11. Parametri homogenog zida ($m' = 210 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 45 \text{ dB}$)

naziv	zid od blokova 11 cm															
opis	šuplji blok širine 11 cm															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
45	44			42		/		/		210	1500	0,14	0,01	1400		327,7
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	36	37	38	38	36	35	36	39	42	45	48	51	54	56	58	60

Tabela B.12. Parametri homogenog zida ($m' = 240 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 50 \text{ dB}$)

naziv	zid od betonskih blokova 10 cm															
opis	perforirani betonski blok širine 10 cm															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
50	49			46		/		/		240	2182	0,11	0,01	1400		417,0
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	40	39	38	39	40	41	43	45	48	50	52	54	56	58	61	64

Tabela B.13. Parametri homogenog zida ($m' = 250 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 52 \text{ dB}$)

naziv	zid od blokova 20cm															
opis	šuplji blok širine 20 cm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w+C_I}$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L	f_c				
52	51	49	/		/		250	1136	0,22	0,01	1400	208,5				
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	42	44	46	45	44	44	47	48	49	50	52	53	54	56	56	55

Tabela B.14. Parametri homogenog zida ($m' = 330 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 55 \text{ dB}$)

naziv	zid od opeke 22 cm															
opis	perforirana opeka širine 22 cm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w+C_I}$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L	f_c				
55	54	51	/		/		330	1375	0,24	0,01	1400	191,1				
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	41	40	39	43	46	49	51	53	54	55	56	56	57	58	59	60

Tabela B.15. Parametri homogenog zida ($m' = 275 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 55 \text{ dB}$)

naziv	zid od betonskih blokova 20 cm															
opis	perforirani betonski blok širine 20 cm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w+C_I}$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L	f_c				
55	54	51	/		/		275	1310	0,21	0,01	1400	218,4				
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	43	42	42	43	46	48	50	53	55	56	57	58	58	59	57	55

Tabela B.16. Parametri homogenog zida ($m' = 330 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 56 \text{ dB}$)

naziv	zid od blokova 15cm															
opis	betonski blok širine 15 cm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w+C_I}$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L	f_c				
56	55	51	/		/		330	2062	0,16	0,006	3500	114,7				
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	44	43	42	43	45	47	49	52	54	56	58	60	62	64	65	66

Tabela B.17. Parametri homogenog zida ($m' = 410 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 59 \text{ dB}$)

naziv	zid od opeke 22 cm															
opis	puna opeka širine 22 cm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w+C_I}$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L	f_c				
59	58	55	/		/		410	1708	0,24	0,01	1400	191,1				
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	49	48	47	47	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	67	68

Tabela B.18. Parametri homogenog zida ($m' = 540 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 61 \text{ dB}$)

naziv	zid od blokova 25 cm															
opis	2,5 cm malter + zvučno izolaciona opeka 25 cm, šupljine popunjene malterom + 2,5 cm malter															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w+C_I}$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L	f_c				
61	59	56	/		/		540	1800	0,3	0,01	1400	152,9				
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	57	49	45	48	51	52	53	56	59	61	63	64	66	68	67	67

Nehomogene pregrade

Tabela B.19. Parametri nehomogene tavanice ($m' = 140 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 61 \text{ dB}$, $L_{n,w} = 56 \text{ dB}$)

naziv	laka tavanica															
opis	vodootporni šper 1,5 cm + pesak 7 cm + vodootporni šper 1,5 cm + drvene grede 20 x 10 cm na rastojanju 80 cm, međuprostor ispunjen vunom + tačkasto ovešane gipsane ploče 2 x 1,25 cm															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$	m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
61	59			56			56		58	140	311	0,45	/	/		2000
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	46,6	54,8	48,1	46,5	47,4	48,5	58	58,7	58,2	63,2	65,8	63,7	64,7	65,2	66,1	71,3
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$L_n[\text{dB}]$	49,9	49	55,2	58,8	61,6	61,5	58,3	58,3	59	57,3	52,9	52,8	47,3	43,5	39,9	33,4

Tabela B.20. Parametri nehomogenog zida ($m' = 20 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 42 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 7,5 cm 2 x GKP + URSA TWF 1 (50 mm)															
opis	gipsani zid 7,5 cm: 1 x 12,5 mm GKP + profil 50 mm (vuna URSA TWF 1 debljine 50 mm) + 1 x 12,5 mm GKP															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$	m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
42	37			30			/		/	20	267	0,075	/	/		3000
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	12,1	16,4	23,9	29,3	33	39,7	45,8	49,9	54,7	56,9	59,7	62,1	64,5	62,9	51,4	44,6

Tabela B.21. Parametri nehomogenog zida ($m' = 20 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 47 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 10 cm 2 x GKP + URSA TWF 1 (60 mm)															
opis	gipsani zid 10 cm: 1 x 12,5 mm GKP + profil 75 mm (vuna URSA TWF 1 debljine 60 mm) + 1 x 12,5 mm GKP															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$	m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
47	42			34			/		/	20	200	0,1	/	/		3000
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	14,5	26,3	30,2	35,9	39,2	44,4	48,5	52,1	54,6	57,1	61,2	63,9	64,7	63	49,8	45,5

Tabela B.22. Parametri nehomogenog zida ($m' = 38 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 54 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 10 cm 2 x GKP + URSA FDP 2 (60 mm)															
opis	gipsani zid 10 cm: 1 x 12,5 mm GKP + profil 75 mm (vuna URSA FDP 2 debljine 60 mm) + 1 x 12,5 mm GKP															
R_w	R_w+C			R_w+C_{tr}			$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$	m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c
54	52			46			/		/	38	380	0,1	/	/		3000
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	29,2	31,8	36,5	40,8	44	49	54,2	57,1	59,7	62,3	65,6	67,8	69,7	68,6	56	53,5

Tabela B.23. Parametri nehomogenog zida ($m' = 38 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 54 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 10 cm 4 x GKP + URSA TWF 1 (50 mm)															
opis	gipsani zid 10 cm: 2 x 12,5 mm GKP + profil 50 mm (vuna URSA TWF 1 debljine 50 mm) + 2 x 12,5 mm GKP															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c			
54	49	40	/		/		38	380	0,1	/	/		2500			
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	20,9	33,1	42	43,1	44,4	47,9	54,4	58,9	62,4	64,4	66,5	69,8	72,9	72,4	60,5	55,7

Tabela B.24. Parametri nehomogenog zida ($m' = 38 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 56 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 15 cm 4 x GKP + URSA TWF 1 (75 mm)															
opis	gipsani zid 15 cm: 2 x 12,5 mm + profil 100 mm (vuna URSA TWF 1 debljine 75 mm) + 2 x 12,5 mm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c			
56	54	48	/		/		38	253	0,15	/	/		2500			
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	30,7	39,5	42,1	43,5	42,5	47,7	53	55,3	58,7	60,8	63,4	66,8	69,1	69,5	58,3	55,1

Tabela B.25. Parametri nehomogenog zida ($m' = 40 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 59 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 15,5 cm 4 x GKP + URSA TWP 1 (2 x 50 mm)															
opis	gipsani zid 15,5 cm: 2 x 12,5 mm + 2 x profil 50 mm s razmakom 5 mm (2 x vuna URSA TWP 1 debljine 50 mm) + 2 x 12,5 mm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c			
59	55	47	/		/		40	258	0,155	/	/		2500			
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	28,6	35,7	44,2	44,5	49,4	51,9	57,7	62,2	65,3	66,9	71,3	74,2	76	76,5	67,3	63,4

Tabela B.26. Parametri nehomogenog zida ($m' = 40 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 62 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 15,5 cm 4 x GKP + URSA TWF 1 (2 x 50 mm)															
opis	gipsani zid 15,5 cm: 2 x 12,5 mm + 2 x profil 50 mm s razmakom 5 mm (2 x URSA TWF 1 debljine 50 mm) + 2 x 12,5 mm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c			
62	60	53	/		/		40	258	0,155	/	/		2500			
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	35,1	44,2	46,6	48,1	50,9	54,5	59,6	62,9	65,7	67,9	73,2	76,1	77,9	77,7	72,2	71

Tabela B.27. Parametri nehomogenog zida ($m' = 40 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 63 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 20,5 cm 4 x GKP + URSA TWF 1 (2 x 75 mm)															
opis	gipsani zid 20,5 cm: 2 x 12,5 mm + 2 x profil 75 mm s razmakom 5 mm (2 x vuna URSA TWF 1 debljine 75 mm) + 2 x 12,5 mm															
R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}	$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c			
63	62	56	/		/		40	190	0,21	/	/		2500			
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	41,8	44,1	45,8	48	51,7	55,9	59,5	62,4	65	67,8	72,5	74,7	77	77,9	73,3	71,2

Tabela B.28. Parametri nehomogenog zida ($m' = 40 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 64 \text{ dB}$)

naziv	gipsani zid 25,5 cm 4 x GKP + URSA TWF 1 (2 x 100 mm)															
opis	gipsani zid 25,5 cm: 2 x 12,5mm + 2 x profil 100 mm s razmakom 5 mm (2 x vuna URSA TWF 1 debljine 100 mm) + 2 x 12,5 mm															
R_w	R_w+C		R_w+C_{tr}		$L_{n,w}$		$L_{n,w}+C_I$		m'	ρ	t	η_{int}	c_L		f_c	
64	62		56		/		/		40	157	0,255	/	/		2500	
$f[\text{Hz}]$	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$R[\text{dB}]$	40,2	46,1	45	47,8	52,3	56,5	61	63,8	66,7	70,5	74,9	78,5	80,4	80,9	78,3	75,2

Biografija autora

Draško (Bogosav) Mašović rođen je 28.10.1985. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju sa Vukovom diplomom. Diplomirao je jula 2008. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Odseku za telekomunikacije i informacione tehnologije (smer Audio i video tehnologije). Tema diplomskog rada bila je: „Dinamika muzičkog signala za različite žanrove“. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu (Smer za audio i video tehnologije) završio je decembra 2009. godine, nakon uspešno odbranjene master teze pod nazivom: „Analiza veličine kritičnog rastojanja u realnim prostorijama“.

Draško Mašović upisao je doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, decembra 2010. godine (modul Telekomunikacije), sa rukovodiocem naučno-istraživačkog rada prof. dr Miomrom Mijićem. Od juna 2011. do septembra 2014. godine bio je zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu u svojstvu istraživača-pripravnika, angažovan na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije broj TR036026: „Integracija i harmonizacija sistema zvučne zaštite u zgradama u kontekstu održivog stanovanja“. Od septembra 2014. godine, radi na institutu „*Virtual Vehicle*“ pri Tehničkom univerzitetu u Gracu (Austrija) kao istraživač na međunarodnom „*Batwoman (Basic Acoustics Training – & Workprogram on Methodologies for Acoustics – Network)*“ projektu FP7 ITN No. 605867. Područje istraživačkog rada Draška Mašovića obuhvata, između ostalog, građevinsku i arhitektonsku akustiku, zaštitu od buke, teorijsku akustiku i aeroakustiku.

Draško Mašović je dobitnik nagrade *Telenor* fondacije za najbolji studentski rad iz oblasti telekomunikacija prezentovan na 17. *TELFOR* konferenciji, održanoj novembra 2009. godine u Beogradu. Autor je jednog rada u međunarodnom časopisu, četiri rada u domaćem časopisu, 17 radova na međunarodnim konferencijama i 17 radova na nacionalnim konferencijama.

Прилог 1.

I. Изјава о ауторству

Потписани-а Драшко Машовић

број уписа 5010/2010

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„Унапређење метода за прорачун звучне изолације у зградама“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 01.07.2015.

DMasovic

Прилог 2.

II. Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Драшко Машовић

Број уписа 5010/2010

Студијски програм телекомуникације

Наслов рада „Унапређење метода за прорачун звучне изолације у зградама“

Ментор др Драгана Шумарац Павловић

Потписани Драшко Машовић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 01.07.2015.

D. Masovic

Прилог 3.

III. Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Унапређење метода за прорачун звучне изолације у зградама“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 01.07.2015.

D. Masović

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.