

Metodologija procene merodavnih vrednosti izolacionih svojstava fasadnih elemenata u funkciji ugaone raspodele incidentne energije

Miodrag Stanojević, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović

Apstrakt—Ovaj rad bavi se razvojem metodologije za procenu ostvarenih izolacionih svojstava fasadnih elemenata u realnim okolnostima. U prethodnim istraživanjima predložena je metodologija upotrebe mikrofonskog niza za određivanje ugaone raspodele incidentne energije koja pogađa fasadu. Pokazano je da se ugaona raspodela incidentne energije varira u zavisnosti od konfiguracije urbane zone. Izolaciona svojstva pregrade zavise od ugla incidencije i od gustine energije koja iz različitih uglova pogađa pregradu. U ovom radu predložena je metodologija procene merodavnih građevinskih izolacionih svojstava fasadnih elemenata na bazi ugaone raspodele incidentne energije. Analizirano je nekoliko standardnih fasadnih pregrada u uslovima različitih urbanih zona koje karakterišu specifične ugaone raspodele incidentne zvučne energije.

Ključne reči—ugaona raspodela incidentne zvučne energije, mikronski niz, merodavna izolaciona moć

I. UVOD

ZVUČNI komfor u boravišnim stambenim ili poslovnim prostorijama jedan je od kriterijuma u projektovanju i izgradnji zgrada različitih namena. Prema istraživanjima sprovedenim u mnogim pre svega Evropskim zemljama konstatovano je da je saobraćajna buka osnovni izvor uznemiravanja koji ugrožava zvučni komfor. Zato se u zakonskoj regulativi definišu minimalna izolaciona svojstva fasadnih elemenata kojima se boravišni prostori štite od spoljašnje, pre svega saobraćajne buke. Zakonska regulativa polazi od propisanih nivoa ambijentalne buke za akustičku zonu u kojoj se objekat nalazi ili od izmerenih vrednosti spoljašnje buke izmerenih na lokaciji objekta. Kriterijum koji fasadni elementi u pogledu izolacionih svojstava treba da zadovolje su maksimalni nivoi buke unutar boravišnih prostorija koji se propisuju za period dana i noći [1,2,3].

Spoljašnja buka dominantno je po svome poreklu saobraćajna buka. Saobraćajnu buku načelno čine pojedinačni događaji prolaska vozila u neposrednoj blizini fasade sa jedne strane i sa druge strane postoji jedan opšti fon buke čije je

poreklo saobraćajna buka manje ili više udaljenih saobraćajnica.

Merenja izolacionih svojstava fasadnih elemenata prema standardu [4] pretpostavljaju da izvor buke iz spoljašnje sredine pogađa fasadne elemente pod uglom od 45°.

Buka koja potiče od udaljenih saobraćajnica praktično formira jedan ravanski talas koji pogađa fasadu. Za razliku od toga buka pojedinačnih prolazaka vozila iz neposredne blizine fasade formira sferni talasni front koji u toku prolaska vozila napada fasadu pod različitim incidentnim uglovima.

U radovima [5,6] predložena je upotreba mikrofonskog niza za merenje ugaone raspodele incidentne zvučne energije koja pogađa fasadne elemente. U radovima je pokazano da se zavisno od konfiguracije objekata u urbanim zonama i njihove orijentacije u odnosu na dominantne saobraćajnice u okruženju dobijaju različite ugaone raspodele incidentne energije.

Koeficijent transmisije, odnosno njegov logaritamski ekvivalent, izolaciona moć, su frekvencijski i ugaono zavisne veličine. Stoga je građevinska merodavna vrednost izolacione moći zavisna od realnih ugaonih gustina incidentne zvučne energije koja pogađa fasadu na mestu gde se ona nalazi. Odnosno, građevinska, ostvarena izolaciona moć istih fasadnih skupova će se na različitim lokacijama da bude u izvesnoj meri različita.

Analitička zavisnost koeficijenta transmisije od ugla incidencije zvučnih talasa poznata je samo za homogene pregradne elemente. Poznavanjem osnovnih parametara građevinskog materijala, Jangovog modula elastičnosti, brzine longitudinalnih talasa i gubitaka u materijalu, kao i ugaone raspodele gustine incidentne energije moguće je za svaku lokaciju proračunati građevinsku izolacionu moć pregrade. Ta vrednost se razlikuje od vrednosti izolacione moći koja se dobija u laboratorijskim uslovima kada se pretpostavlja da je pregrada napadnuta difuznim poljem.

U slučaju kada je pregrada složene strukture i sastavljena od više slojeva istog ili različitih materijala nije moguće analitički izraziti koeficijent transmisije. Za takve slučajeve predložena je metoda za procenu ostvarene izolacione moći na osnovu ugaone raspodele gustine energije, odnosno, na osnovu ukupne normalne komponente incidentne energije izračunate na osnovu raspodele.

Predložena metodologija korekcije laboratorijskih vrednosti primenjena je na ugaone raspodele incidentne energije za 4 različite urbane konfiguracije:

- Molerova ulica (MO),

Miodrag Stanojević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: miodragstanojevic@bitprojekt.co.rs),

Miloš Bjelić, anović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs),

Dragana Šumarac Pavlović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs),

- ulica Cara Nikolaja (CN),
- Bulevar kralja Aleksandra (BL) i
- ulica Ilije Garašanina (IG).

II. PRORAČUN INCIDENTNE ENERGIJE NA OSNOVU UGAONE RASPODELE

U slučaju kada je pregradni zid izložen difuznom i homogenom polju možemo da analitički izvedemo izraz za upadnu incidentnu snagu koja pogađa elementarnu površinu ΔS . U difuznom i homogenom polju gustina energije koja dolazi u bilo koju tačku zvučnog polja je jednaka nezavisno od pravca nailaska.

Talasi koji dolaze u neku tačku prostora iz prostornog ugla $d\Omega$ pretpostavimo da imaju gustinu energije dE . Talasi koji tu tačku pogađaju iz celokupnog prostornog ugla 4π imaju ukupnu gustinu energije E . Ako posmatramo homogeno i difuzno polje onda je gustina energije po pravcima jednaka pa možemo da konstatujemo da je gustina energije koja dolazi iz prostornog ugla $d\Omega$ u odnosu na ukupnu gustinu energije srazmerna odnosu prostornog ugla $d\Omega$ i ukupnog prostornog ugla 4π . Prema tome:

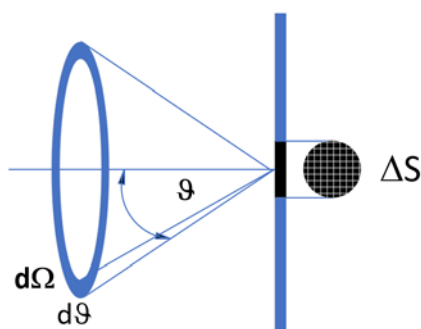
$$\frac{dE}{E} = \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (1)$$

Ako na beskonačnom zidu zamislimo jednu elementarnu površinu kružnog oblika (slika 1) površine ΔS , gustina energije koja pogađa površinu pod uglom θ dolazi iz prostornog ugla $d\Omega$, koji je određen sa uglom incidencije θ i $d\theta$.

Prema tome gustine energije koja površinu pogađa pod uglom θ može se iskazati na sledeći način:

$$\Delta P_u = \frac{Ec\Delta S}{2} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{Ec\Delta S}{4} = \frac{J\Delta S}{4} \quad (2)$$

$$\frac{dE}{E} = \frac{2\pi \sin \theta d\theta}{4\pi} = \frac{\sin \theta d\theta}{2} \quad (3)$$



Slika 1. Incidentna energija koja pogađa element površine zida iz difuznog polja

Prethodni obrazac se može iskazati preko intenziteta J jer možemo da smatramo da su se talasi koji pogađaju neku tačku više puta reflektovali tako da se mogu smatrati ravanskim.

Ukupna normalna komponenta incidentne snage koja na površinu dolazi pod uglom θ i pogađa elementarnu površinu data je izrazom:

$$d\Delta P_u = dJ\Delta S \cos \theta = \frac{Ec\Delta S}{2} \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (4)$$

Ukupna upadna snaga za talase koji dolaze pod svim upadnim uglovima od 0 do $\pi/2$ data je izrazom:

$$\Delta P_u = \frac{Ec\Delta S}{2} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{Ec\Delta S}{4} = \frac{J\Delta S}{4} \quad (5)$$

Posmatrajući poslednji izraz možemo da konstatujemo da normalna komponenta energije koja pogađa neku površinu u difuznom polju je četiri puta manja od energije koja bilo koju tačku pogađa u difuznom polju iz celokupnog prostornog ugla 4π .

Normalna komponenta upadne energije je odgovorna za proces transmisije kroz površinu koja je pogođena zvučnim poljem.

Mikro fonskim nizom moguće je odrediti ugaonu raspodelu gustine incidentne energije po na površini fasade. Poznajući ovu raspodelu možemo da procenimo ukupnu normalnu upadnu snagu koja pogađa fasadnu pregradu. To nam omogućava da i u situacijama kada analitički izraz za koeficijent transmisije u funkciji upadnog ugla nije poznat, zbog složenosti strukture pregrade, možemo da procenimo realnu gustinu energije koja pogađa pregradu.

Za raspodelu uglova incidencije koja je srazmerna $\sin(\theta)$ normalna komponenta incidentne energije je:

$$\int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{1}{2} \quad (6)$$

III. IZOLACIONA MOĆ PREGRADE PRI POBUDI IZ DIFUZNOG POLJA

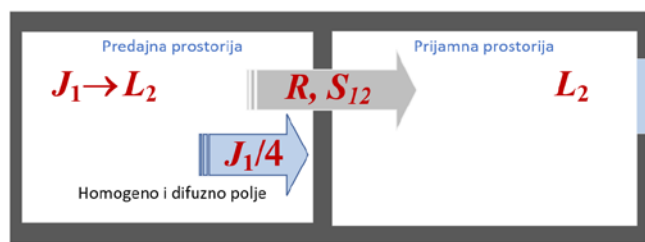
U okolnostima kada nije poznata analitička zavisnost koeficijenta transmisije za neku pregradu, što je slučaj za sve nehomogene strukture, do podataka o izolacionim svojstvima materijala i konstrukcija može se doći isključivo merenjima u laboratorijskim uslovima. Takvo merenje se bazira na pretpostavci da je pregrada ugrađena između predajne i prijemne prostorije, pri čemu su u predajnoj prostoriji ispunjeni uslovi za uspostavljanje difuznog i homogenog zvučnog polja. U takvim uslovima u predajnoj prostoriji intenzitet J_1 , odnosno nivo zvuka L_1 ujednačeni su po čitavoj zapremini, pa pregradnu konstrukciju površine S_{12} i izolacione moći R pogađa incidentna energija koja je, prema prethodnom izvođenju, srazmerna $J_1/4$. Ovo je šematski ilustrovano na slici 2.

Upadna zvučna snaga koju prima pregrada sa strane predajne prostorije je:

$$P_u = \frac{J_1 S_{12}}{4} \quad (7)$$

Deo energije koji pregrada izrači u susednu prostoriju srazmerna je koeficijentu transmisije τ , odnosno njenoj izolacionoj moći R . Izračena snaga u prijemnoj prostoriji je:

$$P_2 = \frac{J_1 S_{12}}{4} \tau \quad (8)$$



Slika 2 Prenos vazdušnog zvuka iz predajne u prijemnu prostoriju u slučaju difuznog i homogenog polja

Ako je ukupna apsorpcija u prijemnoj prostoriji A_2 , intenzitet zvuka u njoj je:

$$J_2 = \frac{4P_2}{A_2} \quad (9)$$

Nivo zvuka u prijemnoj prostoriji može se izraziti na sledeći način:

$$L_2 = L_1 + 10 \log \frac{S_{12}}{A_2} - R, \quad (10)$$

Ovaj izraz pokazuje da se izolaciona svojstva ugrađene pregrade mogu oceniti merenjem nivoa zvuka u predajnoj i prijemnoj prostoriji:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_{12}}{A_2} = D + 10 \log \frac{S_{12}}{A_2} \quad (11)$$

Ovde je D zvučna izolovanost definisana kao razlika nivoa u predajnoj i prijemnoj prostoriji.

Međutim, u slučaju kada je fasadni element izložen zvučnom polju u realnim uslovima, to jest ambijentalnom bukom iz spoljašnje sredine, incidentna zvučna energija nije difuzna, već ima neku ugaonu raspodelu gustine incidentne energije $p(\theta)$. Koeficijent transmisije $\tau(\theta, \omega)$, kao i ugaona raspodela incidentne energije $p(\theta, \omega)$ funkcije su koje zavise od dve promenljive. Njihova međuzavisnost određuje u kojoj meri promena ugaone raspodele incidentne energije menja građevinska izolaciona svojstva pregrade.

Osnovna karakteristika homogenih pregrada je postojanje manje ili više izražene frekvencije koincidencije. Pojava koincidencije prouzrokuje pad u frekvencijskoj karakteristici njihove izolacione moći u zoni oko te frekvencije. U realnim okolnostima karakterističnim u građevinarstvu, fasadni elementi koji su izloženi ambijentalnoj buci imaju složenu strukturu, sa više slojeva u sebi različitih fizičkih osobina. U tom smislu karakteristična su staklena okna na prozorima i balkonskim vratima koja su po pravilu sastavljena od više stakala različitih debljina između kojih je vazdušni međuprostor (takozvani „paketi stakla“). U tim paketima široko se koriste i laminirana stakla čija izolaciona svojstva značajno odstupaju od monolitnog stakla. To se ogleda u činjenici da laminirana stakla nemaju izraženu frekvenciju koincidencije u frekvencijskoj karakteristici njihove izolacione moći.

Određivanje laboratorijskih vrednosti izolacione moći pregradnih konstrukcija počiva na pretpostavci da je u

predajnoj prostoriji uspostavljeno difuzno i homogeno zvučno polje. U takvim uslovima kada u predajnoj prostoriji imamo difuzno polje intenziteta J_1 , odnosno ujednačenog nivoa zvuka L_1 . Pregradnu konstrukciju površine S_{12} izolacione moći R pogađa incidentna energija koja je prema prethodnom izvođenju srazmerna $J_1/4$, zvuka L_1 .

Kada je fasadni element pogođen difuznim poljem onda se numerički njegova teorijska izolaciona moć može proračunati na osnovu koeficijenta transmisije na sledeći način:

$$\tau(\omega) = \frac{\int_0^{2\pi} \tau(\theta, \omega) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta} = \quad (12)$$

$$= 2 \int_0^{2\pi} \tau(\theta, \omega) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta$$

U slučaju kada je fasadni element izložen zvučnom polju koji potiče iz spoljašnje sredine, incidentna zvučna energija nije difuzna već ima neku poznatu raspodelu $p(\theta)$.

Ukoliko je poznata ugaona raspodela incidentne energije $p(\theta)$ realna građevinska izolaciona moć računa se prema sledećoj formuli:

$$\tau(\omega) = \frac{\int_0^{2\pi} \tau(\theta, \omega) p(\theta, \omega) \cos(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} p(\theta, \omega) \cos(\theta) d\theta} \quad (13)$$

Koeficijent transmisije $\tau(\theta, \omega)$, kao i ugaona raspodela incidentne energije $p(\theta, \omega)$ su funkcije koje zavise od dve promenljive. Njihova međuzavisnost uticaće na to u kojoj meri promena raspodele incidentne energije menja građevinska izolaciona svojstva pregrade.

Kod homogenih pregrada poznata je analitička zavisnost koeficijenta transmisije. Materijal od koga je sačinjena pregrada u analitičkoj zavisnosti izražena je preko ukupnih gubitaka u pregradi η i površinske mase pregrade m'' prema formuli:

$$\tau(\omega, \theta) = \left\{ \left[1 + \eta \frac{\omega \cos \theta}{2\rho c} m'' \frac{\omega^2 \sin^4 \theta}{\omega_c^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega \cos \theta}{2\rho c} m'' \left(1 - \frac{\omega^2 \sin^4 \theta}{\omega_c^2} \right) \right]^2 \right\}^{-1}$$

Za sve složene strukture pregradnih elemenata koji se nalaze na fasadi nije poznata analitička zavisnost koeficijenta transmisije. U tom slučaju građevinska izolaciona svojstva nekog pregradnog elementa mogu se proceniti samo na osnovu procene uticaja ugaone zavisnosti raspodele incidentne energije.

IV. IZOLACIONA MOĆ PREGRADE U RAZLIČITIM KONFIGURACIJAMA URBANIH CELINA

Kada nije poznata ugaona i frekvencijska zavisnost koeficijenta transmisije podaci od izolacionim svojstvima pregrada bazirana su na laboratorijskim vrednostima. U

laboratorijskim uslovima pretpostavlja se da je pregrada napadnuta difuznim polje na svim frekvencijama tako da se poznavanje stvarne ugaone raspodele koja se dobija merenjima uz pomoć mikrofonskog niza može izraziti novim korekcionim faktorom koji je frekvencijski zavistan:

$$\tau(\omega) = \frac{\tau(\omega)_{lab}}{\int_0^{2\pi} p(\theta, \omega) \cos(\theta) d\theta} = \frac{\tau(\omega)_{lab}}{k(\omega)} \quad (14)$$

Korekcija izolacione moći u slučaju poznate ugaone raspodele incidentne energije u odnosu na izmerenu laboratorijsku vrednost može se izraziti na sledeći način:

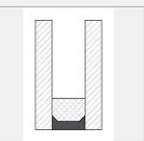
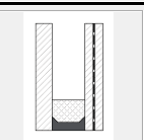
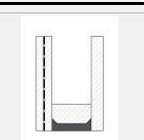
$$\Delta R(\omega) = R_{lab}(\omega) + 10 \log \frac{\int_0^{\pi/2} p(\theta, \omega) \cos(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta} \quad (15)$$

Za potrebe analize napravljena je eksperimentalna postavka koja obuhvata merenja vršena na četiri urbane lokacije u Beogradu. Lokacije su: Molerova ulica (MO), ulica Cara Nikolaja (CN), Bulevar kralja Aleksandra (BL) i ulica Ilije Garašanina (IG). Sve odabrane lokacije pripadaju različitoj klasi urbane konfiguracije terena [7].

Na slikama 3,4,5 i 6 prikazane su raspodele incidentne energije dobijene mikrofonskim nizovima u funkciji frekvencije i uglova incidencije na sve 4 posmatrane lokacije.

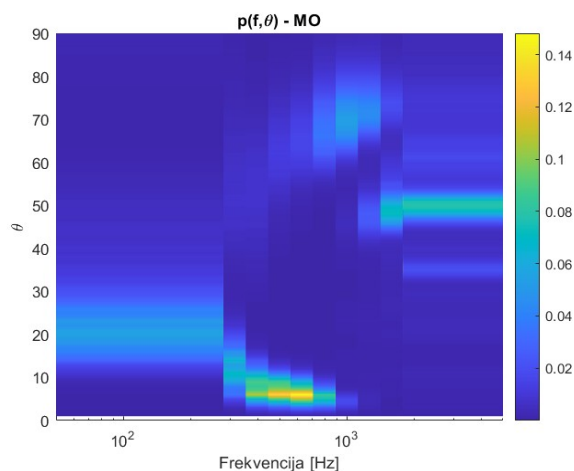
TABELA 1.

LABORATORIJSKE MERDAVNE IZOLACIONE MOĆI ANALIZIRANIH PROZORA

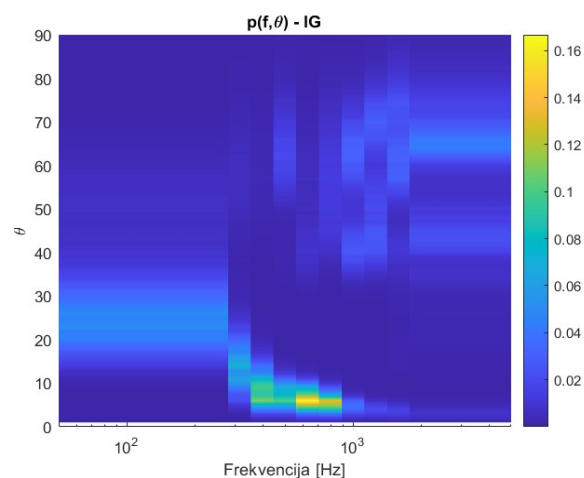
	Merodavne izolacione moći	Struktura
1.	ALU okno 4/16/4 R_w=31 dB R _w +C=30 dB R _w +C _{tr} =27 dB	
2.	PVC+drvo, okno 8 (laminirano) / 20(argon)/6 R_w=40 dB R _w +C=38 dB R _w +C _{tr} =34 dB	
3.	PVC+drvo okno 6/12/3/12/4 R_w=36 dB R _w +C=34 dB R _w +C _{tr} =30 dB	
4.	Okvir drvo Okno 6/12/6 R_w=37 dB R _w +C=36 dB R _w +C _{tr} =34 dB	

Na osnovu izmerenih raspodela gustine incidentne energije na posmatranim lokacijama određeni su prema gornjoj formuli frekvencijski zavisni korekcionni faktori za svaku analiziranu urbanu lokaciju. Na slici 7 prikazana je izračunata frekvencijska zavisnost korekcionnog faktora u odnosu na

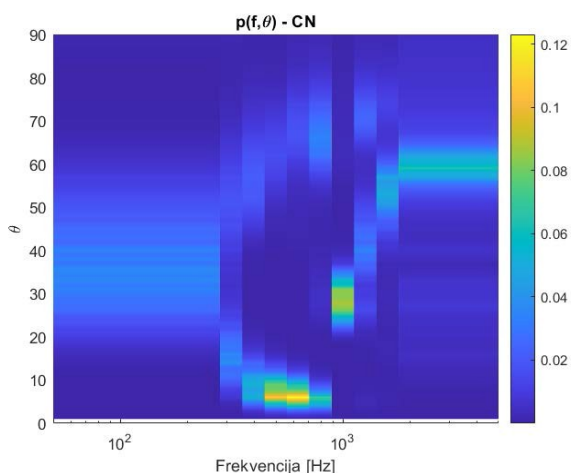
vrednosti izmerene u laboratorijskim uslovima, to jest u uslovima difuznog poja. Korekcionni faktor se kreće od -0.5 dB do 3 dB. Pozitivne vrednosti korekcionnog faktora ukazuju da će građevinska izolaciona moć fasadnog elementa biti veća u realnim okolnostima u odnosu na okolnost kada je pobuđena difuznim poljem.



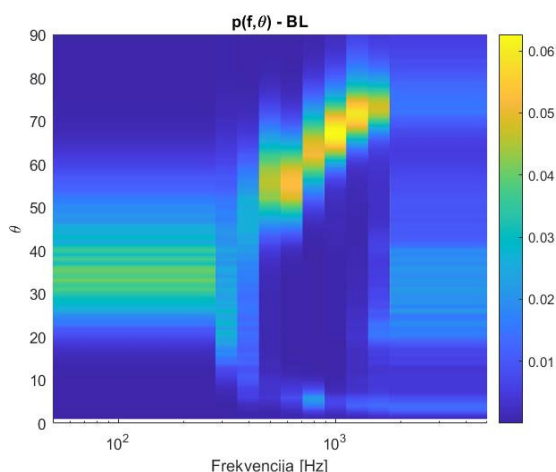
Slika 3. Raspodela incidentne energije na lokaciji MO - Molerova ulica



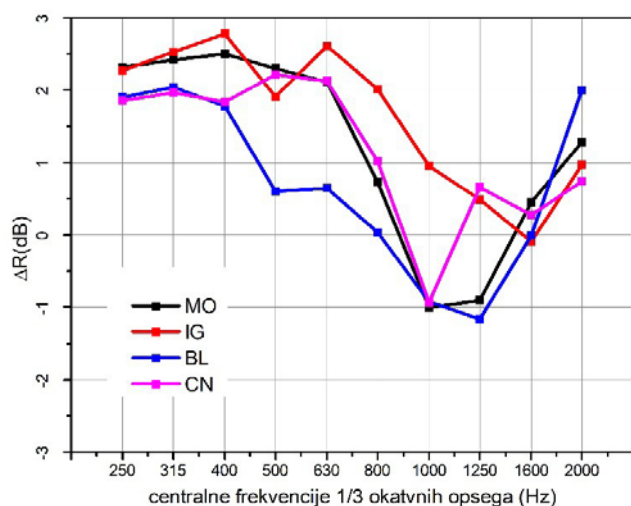
Slika 4. Raspodela incidentne energije na lokaciji IG – Ulica Ilije Garašanina



Slika 5. Raspodela incidentne energije na lokaciji CN – ulica Cara Nikolaja II

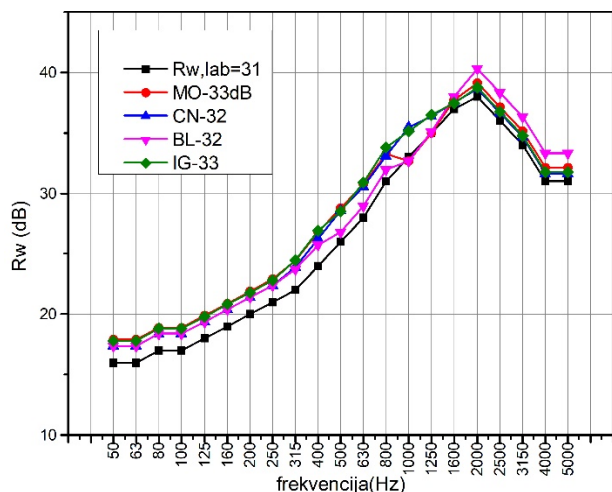


Slika 6. Raspeda incidentne energije na lokaciji BL – Bulevar kralja Aleksandra

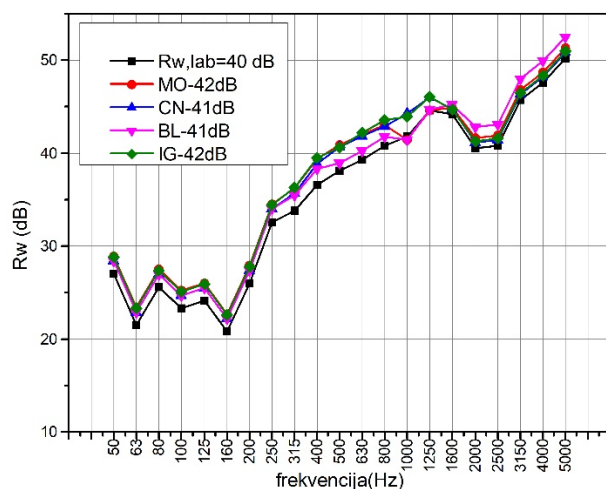


Slika 7. Vrednosti frekvencijski zavisnih korekcionih faktora za korigovanje laboratorijskih vrednosti zvučne izolacije za četiri različite urbane celine u gradu

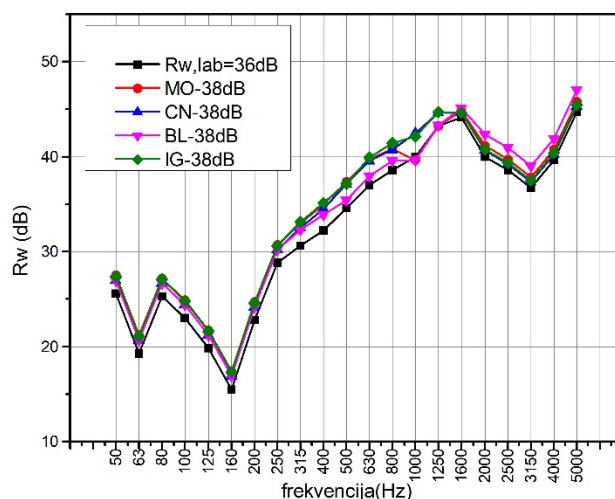
Na slikama 8,9,10 i 11 prikazane su korigovane krive izolacione moći za sve posmatrane strukture prozora na 4 analizirane gradske lokacije.



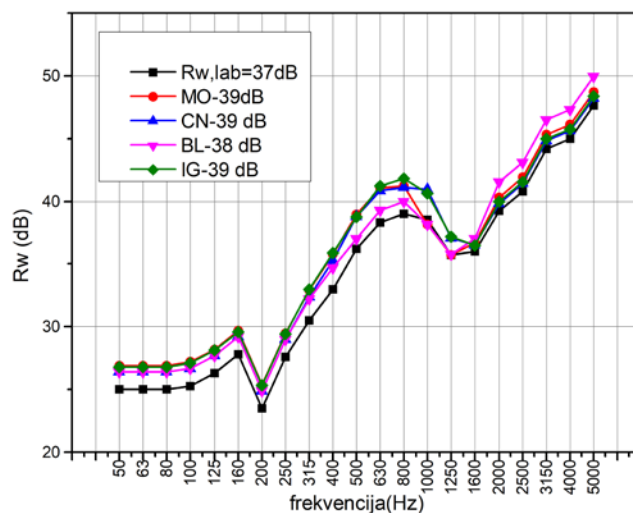
Slika 8. Korigovane krive izolacione moći prozorskog okna ALU okno 4/16/4



Slika 9. Korigovane krive izolacione moći prozorskog okna PVC+drvo, okno 8 (laminirano) / 20(argon)/6



Slika 10. Korigovane krive izolacione moći prozorskog okna - drvo 6/12/6



Slika 11. Korigovane krive izolacione moći prozorskog okna PVC+drvo, okno 8 (laminirano) / 20(argon)/6

ZAKLJUČAK

U radu je predložen postupak za precizniju procenu građevinskih izolacionih svojstava složenih fasadnih elemenata kada je poznata ugaona raspodela incidentne energije. Postupak se zasniva na proceni normalne komponente incidentne energije na osnovu poznate raspodele i izračunavanju korekcionog faktora kojim se ponderiše laboratorijska izolaciona moć. Postupak je primenljiv u situacijama kada analitička za visnost izolacione moći nije poznata a to je slučaj kod složenih struktura pregradnih elemenata.

U radu su razmatrani korekcionni faktori za nekoliko konfiguracija urbanih celina i za više standardnih fasadnih elemenata složene strukture.

Pokazano je u kojim se granicama mogu očekivati razlike između građevinskih i laboratorijskih merodavnih izolacionih moći koje mogu biti od značaja pri proceni nivoa ambijentalne buke za različite urbane lokacije.

ZAHVALNICA

Rad je nastao tokom istraživanja od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (broj ugovora 451-03-47/2023-01/ 200103).

LITERATURA

- [1] Pravilnik o metodologiji za određivanje akustičkih zona „Službeni glasnik RS“, broj 72 od 8. oktobra 2010.
- [2] Pravilnik o dozvojenim nivoima buke u životnoj sredini "Sl. glasnik RS", br. 54/92
- [3] U.J6.201, SRPS. Akustika u zgradarstvu – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada. 1990.

- [4] SRPS EN ISO 16283-3:2017, Akustika – Merenje zvučne izolacije u zgradama i zvučne izolacije građevinskih elemenata – Deo 3: Zvučna izolacija fasada
- [5] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić - Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis . May 2017, The Journal of the Acoustical Society of America, str. 3101-3104.
- [6] M. Stanojević, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, T. Miljković. Microphone array method for determining noise angular energy distribution on building envelopes. Achen 2019. 23rd International Congress on Acoustics. str. 134-141.
- [7] Miloš Bjelić „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza“, doktorska disertacija 2018

Abstract—This paper deals with the development of a methodology for evaluating the achieved insulating properties of facade elements in real circumstances. In previous researches, a methodology of using a microphone array was proposed to determine the angular distribution of the incident energy that hits the facade. It is shown that the angular distribution of the incident energy varies depending on the configuration of the urban zone. The insulating properties of the partition depend on the angle of incidence and on the energy density that hits the partition from different angles. In this paper, a methodology is proposed for evaluating the relevant building insulation properties of facade elements based on the angular distribution of incident energy. Several standard facade partitions for different urban zones were analyzed.

Methodology for evaluating the apparent sound insulation of facade elements as a function of the angular distribution of incident energy

Miodrag Stanojević, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović