

Određivanje zvučne snage spoljne jedinice klima uređaja za potrebe modelovanja zvučnih izvora

Marija Ratković

Katedra za Telekomunikacije, Laboratorija za Akustiku
Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

rm235012p@student.etf.bg.ac.rs, <https://orcid.org/0009-0006-2174-553X>

Miloš Bjelić

Katedra za Telekomunikacije, Laboratorija za Akustiku
Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

bjelic@etf.rs, <https://orcid.org/0000-0002-5859-1654>

Abstract—U ovom radu je pokazan princip modelovanja spoljne jedinice klima uređaja kao zvučnih izvora za potrebe izrade projekata zvučne zaštite. Modelovanje izvora i zvučnog polja je potrebno radi preciznog predviđanja nivoa buke u realnim uslovima. Zvučna snaga je ulazni podatak za modelovanje zvučnih izvora u inženjerskoj praksi. U ovom radu su prikazani rezultati određivanja zvučne snage klima uređaja na osnovu merenja intenziteta zvuka korišćenjem intenzitetske sonde. Modeli treba da budu dovoljno slični stvarnim uslovima, ali i što jednostavniji radi uštede vremena proračuna i računarskih resursa. Spoljna jedinica klime je modelovana u softveru *SoundPlan* na tri načina. Prvi model podrazumeva da sve stranice zrače zvučnu snagu gde je svaka stranica opisana zvučnom snagom koja je određena merenjem intenziteta zvuka. Drugi model podrazumeva da samo prednja stranica klime zrači ukupnu zvučnu snagu, a treći model podrazumeva da je klima opisana kao tačkasti izvor. U ovom radu je pokazano da je modelovanje ovakvog izvora kao tačkastog adekvatno. Pokazan princip može da se realizuje i za veće klimakomore i mašinske sisteme koji se nalaze na krovovima ili fasadnim zidovima zgrada za potrebe projekata zvučne zaštite.

Ključne reči—Intenzitetska sonda, klima uređaj, modelovanje zvučnog polja, zvučna snaga

I. UVOD

Precizno modelovanje terena, objekata i zvučnih izvora je neophodno za potrebe proračuna u projektima zvučne zaštite. Zvučna zaštita predstavlja skup mera koje obezbeđuju potrebne akustičke uslove za ostvarenje akustičkog komfora. Potrebno je na što precizniji način predvideti nivo buke u objektu ili u okolini objekta koji se projektuje. Mašinski sistemi za klimatizaciju se često nalaze na krovovima zgrada i bukom koju generišu dok su u radnom režimu mogu ugroziti okolne objekte. U proračunima za projekte zvučne zaštite se ovakvi izvori modeluju kao tačkasti i zato je kroz ovaj rad principijski pokazano ispitivanje ovakve pretpostavke. Zvučna snaga ovakvih sistema često nije definisana ili dovoljno precizno opisana u specifikaciji mašina zato je za precizno modelovanje neophodno sprovesti merenje zvučne snage.

Zvučna snaga se može izračunati na osnovu merenja intenziteta zvuka pomoću intenzitetske sonde [1]-[3]. Intenzitetska sonda se koristi u raznim inženjerskim oblastima: građevinskoj akustici [4], u određivanju buke mašina složenih geometrijskih oblika [5], [6] detekciji defekata u radu mašina [7] itd. U ranijem istraživanju merena je zvučna snaga pojedinačnih komponenti spoljne jedinice klima uređaja u kontrolisanim uslovima kao što je anehoična soba [8]. Takođe analizirana je i zvučna snaga spoljne jedinice klima uređaja kada je ona u različitim radnim režimima [9].

U radu je prikazan postupak određivanja zvučne snage izvora i postupak modelovanja zvučnih izvora. Zvučna snaga spoljne jedinice klima uređaja je određena na osnovu merenja intenziteta zvuka koju stvara spoljna jedinica klima uređaja kada je u radnom režimu. Intenzitet zvuka se meri pomoću intenzitetske sonde, nakon čega se iz tih podataka izračunava zvučna snaga izvora. Za merenje intenziteta zvuka potrebno je korišćenje posebne merne površine koja se koristi tokom eksperimenta. U standardu su definisani uslovi koje je potrebno obezbediti prilikom merenja intenziteta zvuka [10]. Za potrebe određivanja zvučne snage sproveden je eksperiment gde je meren intenzitet zvuka i računata zvučna snaga spoljne jedinice klima uređaja. Tokom eksperimenta je meren i nivo zvuka na četiri merne pozicije i ti rezultati će biti korišćeni za potvrdu adekvatnosti modelovanja. Za modelovanje izvora i zvučnog polja se koristi softver *SoundPlan* [11]. Ideja rada je modelovati zvučni izvor što jednostavnije, ali zadržati zvučno polje koje je dovoljno slično onom koje nastaje kada je izvor složen. Klima uređaj je modelovan na tri načina: složen model koji obuhvata sve stranice klima uređaja, modelovanje samo prednje stranice klima uređaja koja je opisana ukupnom snagom i modelovanjem klima uređaja kao tačkastog izvora koji je takođe opisan ukupnom snagom. Na ovaj način se proverava da li je modelovanje ovakvog izvora kao tačkastog adekvatno. Eksperiment je sproveden nad standardnim klima uređajem koji se koriste u domaćinstvima. Ovakvi uređaji su manji i proizvode manji nivo buke nego kompleksni mašinski sistemi koji se nalaze na krovovima zgrada. Zato je postavljena početna hipoteza da je moguće ovu klimu modelovati kao tačkasti izvor. U ovom radu je pokazan postupak za adekvatno određivanje zvučne snage neke mašine i kako te rezultate iskoristiti za modelovanje takvih izvora.

Rad je podeljen u četiri celine. Nakon uvodnog dela gde se čitalac upoznaje sa motivima i ciljevima ovog rada u drugom delu je opisana metodologija rada. Kroz metodologiju rada je opisana teorijska osnova određivanja zvučne snage kao i čitav postupak merenja intenziteta zvuka kroz eksperiment. U trećem delu su prikazani rezultati merenja intenziteta zvuka koji generiše spoljna jedinica klima uređaja, rezultati određivanja zvučne snage, kao i rezultati modelovanja izvora na različite načine. U poslednjem delu su prikazani glavni zaključci ovog rada.

II. METODOLOGIJA

Ovaj rad je podeljen na više celina koje obuhvataju:

- Merenje intenziteta zvuka koju generiše spoljna jedinica klima uređaja;
- Izračunavanje zvučne snage;

- Modelovanje zvučnog polja koje se stvara usled rada klima uređaja.

Zvučna snaga klima uređaja se određuje kako bi se ovaj izvor modelovao na ispravan način. Tokom eksperimenta u kome se meri intenzitet zvuka meren je i nivo zvuka na kontrolnim mestima, kao parametar koji će se porediti sa nivoom zvuka izračunatim u modelu. Cilj rada je da se uprosti model izvora tako da modelovani nivo zvuka bude dovoljno sličan izmerenim vrednostima nivoa zvuka kada klima radi u realnim uslovima.

A. Zvučna snaga

Zračenje izvora zvuka dovodi do promene zvučnog pritiska u okolini izvora i opisano je zvučnom snagom. Zvučni pritisak koji se beleži mikrofonom ili se registruje čulom sluha zavisi od rastojanja do izvora i akustičkog okruženja u kome se zvučni talasi prostiru. Merenjem zvučnog pritiska ne može se odrediti kolji nivo buke generiše mašina bez uticaja sredine u kojoj se nalazi. Zvučna snaga manje zavisi od spoljnih uticaja i ovim parametrom je moguće jednoznačno opisati buku koju generiše zvučni izvor [3], [12]. Zvučna snaga se može definisati kao energija zvuka koja u jedinici vremena prolazi kroz bilo koju površinu koja obuhvata izvor zvuka. Intenzitet zvuka opisuje brzinu protoka energije kroz jedinicu površine. Ovo je vektorska veličina, opisana je amplitudom, smerom i pravcem koji opisuje površinu kroz koju se meri protok energije. S druge strane, zvučni pritisak je skalarna veličina i definisan je samo amplitudom. Intenzitet zvuka je definisan i kao zvučna snaga koja se izrači po jedinici površine, stoga je moguće izračunati zvučnu snagu merenjem intenziteta po površini koja obuhvata zvučni izvor. Određivanje zvučne snage pomoću zvučnog pritiska je moguće samo u strogo kontrolisanim uslovima gde se mogu uvesti posebne pretpostavke o zvučnom polju. Takvi uslovi postoje u anehoičnim sobama ili reverberacionim komorama. Određivanje zvučne snage merenjem intenziteta zvuka je moguće i u uslovima koji nisu kontrolisani i nije potrebno uvođenje dodatnih pretpostavki [12]. Na ovaj način je moguće određivanje zvučne snage pojedinačnih mašina ili komponenata mašina, dok druge mašine u njenom okruženju generišu buku jer stacionarno zvučno polje ne utiče na merenje intenziteta zvuka. Merenjem intenziteta zvuka je moguće lokalizovati izvor zvuka jer je intenzitet zvuka vektorska veličina koja pored količine protoka zvučne energije, opisuje i pravac protoka te energije.

B. Merenje intenziteta zvuka i određivanje zvučne snage

Za merenje intenziteta zvuka je potrebno izmeriti zvučni pritisak i brzinu oscilovanja čestica elastične sredine. Zvučni pritisak je moguće izmeriti pomoću jednog mikrofona, dok merenje brzine oscilovanja čestica elastične sredine nije tako jednostavno. Brzina oscilovanja čestica elastične sredine je direktno povezana sa gradijentom zvučnog pritiska, odnosno promenom zvučnog pritiska u odnosu na rastojanje. Gradijent zvučnog pritiska se može izmeriti korišćenjem dva mikrofona koja se nalaze na malom rastojanju. Poznavanjem gustine fluida i gradijenta zvučnog pritiska određuje se ubrzanje oscilovanja čestica elastične sredine, a integraljenjem ovog izraza se određuje brzina oscilovanja čestica elastične sredine što je prikazano u (1).

$$v = -\frac{1}{\rho} \int grad(p) dt \quad (1)$$

Uvođenjem određenih aproksimacija gradijent zvučnog pritiska može da se odredi na osnovu razlike zvučnih pritiska na malom rastojanju kao što je prikazano u (2), gde su p_A i p_B vrednosti izmerenog zvučnog pritiska na mestima dva mikrofona, a Δr njihovo međusobno rastojanje.

$$grad(p) = \frac{p_B - p_A}{\Delta r} \quad (2)$$

Intenzitet zvuka je proizvod zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine, gde je zvučni pritisak određen kao srednja vrednost zvučnih pritisaka zabeleženih na mestima oba mikrofona. Srednja vrednost zvučnog pritiska može se definisati na osnovu dva izmerena zvučna pritiska kao u (3).

$$\langle p \rangle = \frac{p_A + p_B}{2} \quad (3)$$

Srednje vrednosti intenziteta zvuka u određenom vremenskom interval t je definisana u (4).

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2 \cdot \rho \cdot \Delta r} \int_0^t (p_B - p_A) d\tau \quad (4)$$

Za određivanje intenziteta zvuka u skladu sa jednačinom (4) se koristi intenzitetska sonda koja predstavlja sistem sačinjen od dva blisko postavljena mikrofona i distancera koji se nalazi između njih. Ovaj sistem za analizu intenziteta zvuka ima bidirekcionu karakteristiku usmerenosti, što dovodi do smanjenog uticaja okoline na rezultat merenja. Glavna prednost kod određivanja zvučne snage preko intenziteta zvuka je mogućnost sprovođenja merenja intenziteta zvuka u uslovima gde je prisutna ambijentalna buka ili je zvučno polje nastalo usled rada drugih mašina stacionarno. Zvučna snaga predstavlja proizvod srednje vrednosti normalne komponente intenziteta zvuka po mernoj površini i površine merne površine koja potpuno obuhvata izvor zvuka čija se zvučna snaga određuje. Pre merenja potrebno je izabrati mernu površinu unutar koje se nalazi izvor zvuka i na kojoj će se meriti intenzitet zvuka. Ta površina može biti različitih oblika, ali je bitno, da je ceo izvor unutar površine i da nema dodatnog izvora unutar nje. Merenje je moguće sprovesti na dva načina: kontinualnim pomeranjem intenzitetske sonde duž izabrane površine ili merenjem u diskretnom broju uniformno raspoređenih tačaka. U standardu koji definiše proceduru merenja intenziteta zvuka u diskretnim tačkama su definisani F indikatori polja koji se koriste za ocenu sprovedenih merenja. [10].



Sl. 1. Postavka eksperimenta

C. Postavka eksperimenta

Određivanje zvučne snage spoljne jedinice klima uređaja je sprovedeno u atrijumu fakulteta, što je prikazano na Sl. 1. U eksperimentu je korišćen klima uređaj Midea R410A [13]. Tokom eksperimenta za merenje intenziteta zvuka korišćena je intenzitetska sonda tip 3599, proizvođača *Brüel&Kjær*, koja je prikazana na Sl. 1 [12], [14]. Tokom eksperimenta je korišćen štitnik za vetar koji se postavlja preko sonde. Da bi se prikazao izgled sonde na Sl. 1 je intenzitetska sonda bez štitnika za vetar. Ovo je sistem sačinjen od dva fazno uparena mikrofona između kojih se nalazi distancer. Korišćen je distancer od 12 mm, zato što je on pogodan za merenja u frekvencijskom opsegu od 250 Hz do 5 kHz jer se najveći deo zvučne energije izrači u tom opsegu. Signali su prikupljeni korišćenjem akvizicionog sistema proizvođača *Brüel&Kjær* [15], dok je za obradu i prikaz rezultata korišćen *Pulse* softver istog proizvođača.

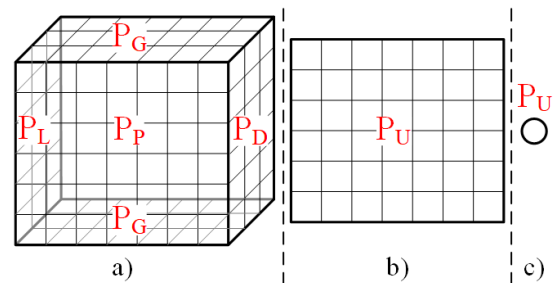
Merenje je sprovedeno po uslovima iz standarda, odnosno računati su F indikatori koji pokazuju validnost sprovedenog postupka [10]. Parametar F_1 na svim frekvencijskim opsezima od 63 Hz do 10 kHz ima vrednosti koje se nalaze u opsegu od 0.15 do 0.4, što zadovoljava traženi kriterijum iz standarda. Vrednosti indikatora F_2 i F_3 su u opsegu između 1.5 i 5. Indikatori F_2 i F_3 treba da su što sličniji odnosno da njihova apsolutna razlika nije veća od 3 dB. Na frekvencijskim opsezima od 100 Hz, 125 Hz i 160 Hz ovaj kriterijum nije zadovoljen. Merna površina se nalazila na rastojanju od 50 cm od klima uređaja. Da bi kriterijum bio ispunjen rastojanje merne površine od klime je smanjeno na 30 cm. Indikator F_4 na svim frekvencijskim opsezima ima vrednost između 0.5 i 1.

Merna površina je izabrana je u obliku paralelopipeda čije se stranice nalaze na rastojanju 30 cm od stranica spoljne jedinice klima uređaja. Intenzitet zvuka je meren u diskretnom broju tačaka koje su uniformno raspoređene na međusobnom rastojanju od 0.2 m. Sa prednje strane klima uređaja stranica paralelopipeda je dimenzija 1.4 m × 1.2 m i definisana je sa 56 mernih pozicija. Sa gornje i donje strane spoljne jedinice klima uređaja površine su dimenzija 1.4 m × 0.6 m, gde su merne tačke raspoređene na isti način i ima ih po 32. Sa gornje i donje strane se očekuju veoma slični rezultati zato je merenje realizovano samo za donju stranicu. Sa bočnih strana klima uređaja površine su dimenzija 1.2 m × 0.6 m i imaju po 28 mernih pozicija. Kako bi pozicije u kojima se meri bile precizne koristi se specijalno konstruisana mreža, koja je prikazana na slici Sl. 1, sačinjena od metalnog rama na kome su zategnute strune od najlona. Vremenski interval tokom kog se merio intenzitet zvuka na svakoj poziciji je 10 s. Tokom merenja klima je bila podešena da radi sa maksimalnim kapacitetom dok greje unutrašnji prostor do maksimalnih 30°C.

D. Modelovanje zvučnog polja

Za modelovanje i proračun nivoa buke koju generiše spoljna jedinica klima uređaja korišćen je softver *SoundPlan* verzija 8.0. Za proračun nivoa buke je korišćen standard ISO 9613 [16]. Modeluje se okruženje u kome se nalazi klima uređaj, što podrazumeva modelovanje atrijuma fakulteta, odnosno spoljnog prostora oivičenog zidovima. Izvor buke u modelu je spoljna jedinica klima uređaja koja se u prvom koraku modeluje sa svih pet stranica koje su opisane izračunatom zvučnom snagom u toku eksperimenta. Primenom kreiranog modela proračunat je nivo zvuka na različitim pozicijama u odnosu na klima uređaj i poredi sa nivoom zvuka koji je izmeren

fonometrom tokom eksperimenta na istim pozicijama [17]. Merne kontrolne pozicije su označene nazivima M_1 , M_2 , M_3 i M_4 . Takođe je tokom eksperimenta izmerena ambijentalna buka koja je dodata na proračunati nivo zvuka modelom. Cilj ovog rada je uprostiti model izvora zvuka što je više moguće, ali dobijati približno iste proračunate vrednosti nivoa zvuka modelom sa izmerenim vrednostima nivoa zvuka na kontrolnim pozicijama. Prvi uprošćeni model izvora koji je testiran podrazumeva modelovanje samo prednje stranice klima uređaja jer se očekuje da se najveći deo energije zrači ispred klima uređaja. Ovakav model izvora je opisan ukupnom zvučnom snagom klima uređaja. Maksimalno uprošćavanje modela izvora podrazumeva aproksimaciju klima uređaja kao tačkastog izvora, koji zrači ukupnu energiju u svim pravcima. Na Sl. 2 a), b) i c) su prikazana tri različita načina modelovanja izvora zvuka označeni kao prostorni, površinski i tačkasti izvor zvuka. Ova tri načina modelovanja koja su na Sl. 2 označena sa a), b) i c) će u daljem tekstu biti navedeni kao A, B i C modeli. P_P , P_D , P_L , P_G i P_U predstavljaju izračunatu zvučnu snagu prednje, desne, leve, gornje (donje) strane klima uređaja i ukupnu zvučnu snagu ovog zvučnog izvora, tim redom.

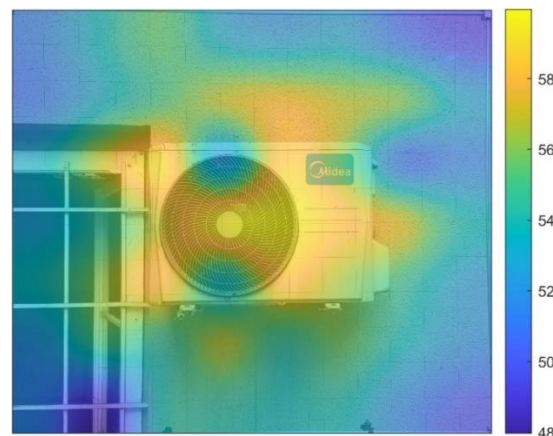


Sl. 2. Šematski prikaz modelovanja izvora zvuka, model opisan a) prostorni izvor zvuka, b) površinski izvor zvuka i c) tačkasti izvor zvuka

III. REZULTATI

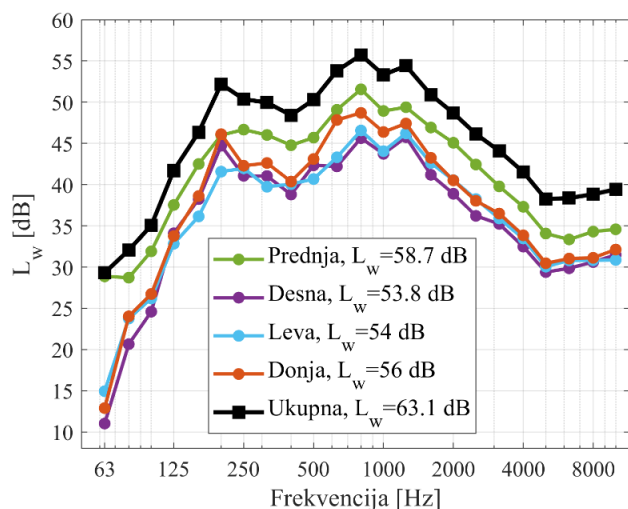
A. Zvučna snaga izvora zvuka

Na Sl. 3 je prikazana mapa izmerenog nivoa intenziteta zvuka na prednjoj stranici merne površine. Na sredini površine je intenzitet veći i dostiže 60 dB, što je očekivano jer je taj deo direktno ispred klime koja generiše buku. Za desnu, levu i donju stranicu je izmeren intenzitet na isti način kao i za prednju stranicu. Merenje je sprovedeno po proceduri koja se nalazi u standardu i izračunati su svi F indikatori polja koji se nalaze u okviru zadatih granica [10]. Zato se može tvrditi da je određivanje zvučne snage realizovano na adekvatan način.



Sl. 3. Intenzitet zvuka na prednjoj stranici merne površine

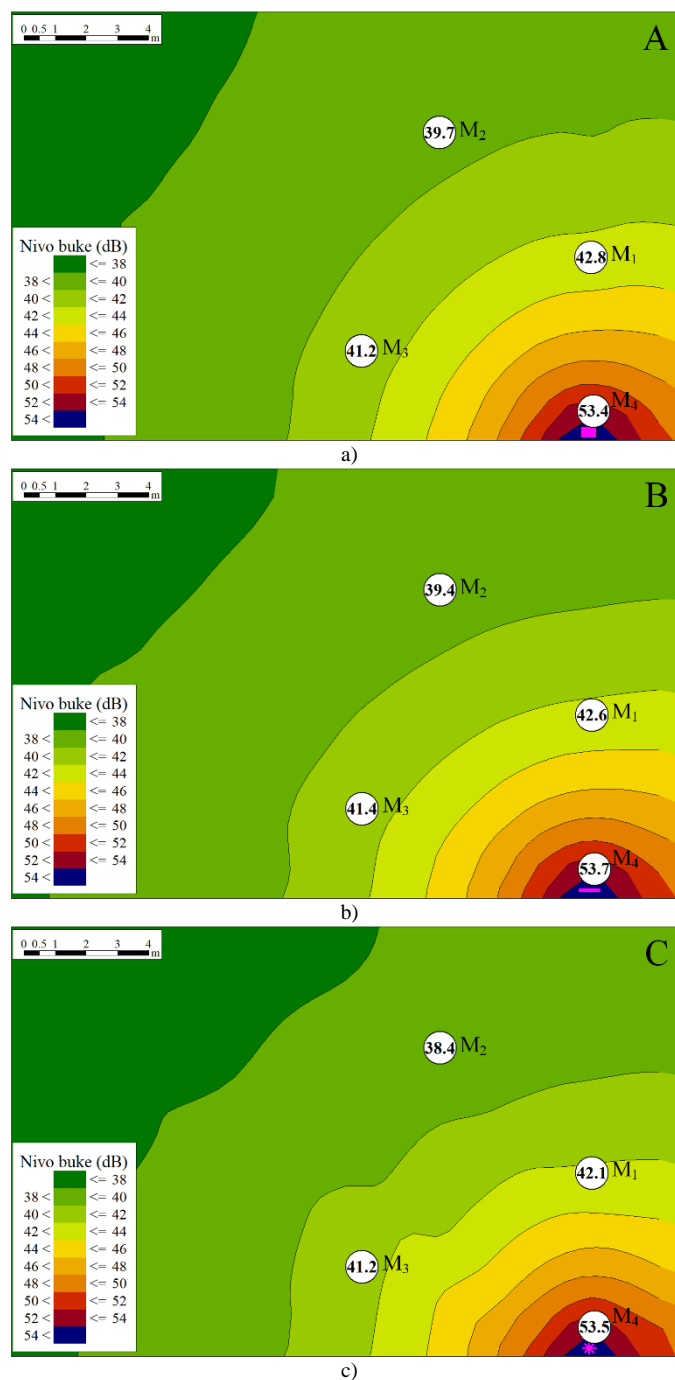
Zvučna snaga pridružena pojedinačnim stranicama merne površine kao i ukupna snaga zvučnog izvora izračunata je na osnovu usrednjenih vrednosti intenziteta zvuka na odgovarajućoj mernoj površini i površine merne površine. Na Sl. 4 su prikazani nivoi zvučne snage koji su određeni za prednju, desnu, levu i gornju stranicu merne površine. Ovim vrednostima se definiše složeni model (model A) izvora zvuka kada se računa nivo zvučnog polja u modelu. Nivo zvučne snage na prednjoj stranici je veći od nivoa zvučne snage ostalih stranica, što je potvrdilo početnu pretpostavku da je moguće modelovati izvor kao površinski izvor jer je zvučna snaga koja se izračni sa prednje strane klima uređaja najveća. Uprošćavanje modela izvora zvuka zahteva izračunavanje ukupne zvučne snage koju zrači ceo klima uređaj koja je prikazana na Sl. 4. Ovim zvučnom snagom se definišu uprošćeni modeli izvora zvuka koji podrazumevaju površinski ili tačkasti izvor.



Sl. 4. Zvučna snaga izvora zvuka po frekvencijskim opsezima

B. Proračun zvučnog polja modelom i verifikacija modela

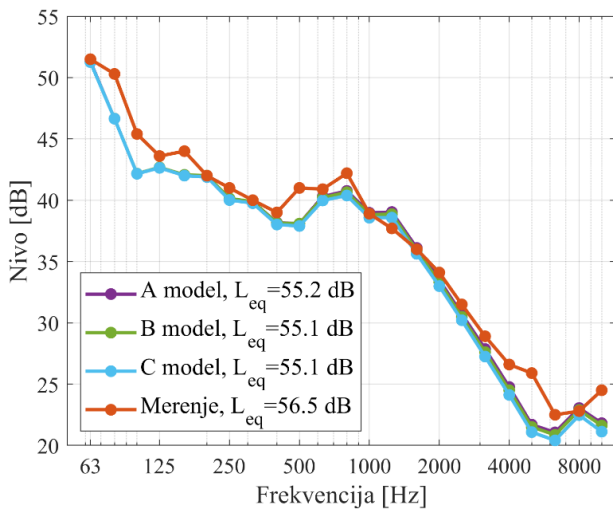
Proračun zvučnog polja u *SoundPlan*-u kada su izvori zvuka okarakterisani na prethodno opisan način je prikazano na Sl. 5. Na Sl. 5 a), b) i c) su prikazani rezultati proračuna zvučnog polja primenom modela A, B i C, odnosno kada je izvor zvuka modelovan kao prostorni, površinski i tačkasti izvor zvuka. Kontrolne pozicije na kojima je tokom eksperimenta meren nivoa zvučnog pritiska su na slikama označene kao M_1 , M_2 , M_3 i M_4 . Takođe su na slikama prikazani proračunati nivoi zvučnog pritiska na kontrolnim pozicijama primenom različitih modela. Proračun nije obuhvatio ambijentalnu buku, već je jedini izvor zvuka spoljna jedinica klima uređaja. Sa promenom modela izvora zvuka nivo zvučnog pritiska se najviše menja na poziciji M_2 , 1.3 dB je veći nivo u modelu A u odnosu na model C, odnosno 1 dB je veći nivo u modelu B u odnosu na model C. Na ostalim mernim pozicijama promene su maksimalno 0.7 dB, dok ih negde ni nema. Ove promene nivoa zvuka nisu značajne i može se zaključiti da se promenom modela izvora zvuka ne menja značajno zvučno polje.



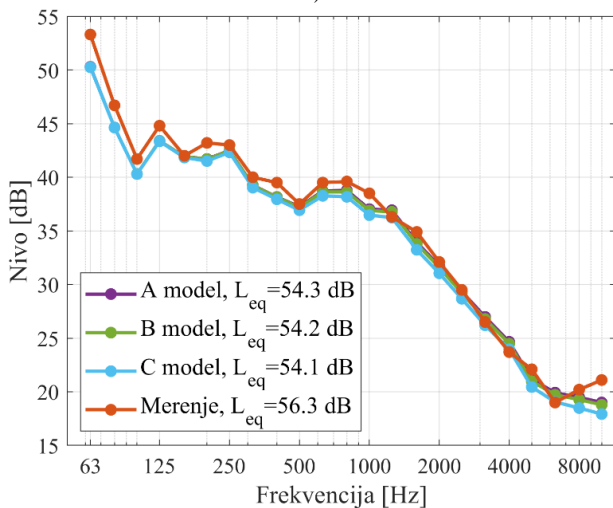
Sl. 5. Modelovano zvučno polje, model izvora opisan a) svim stranicama klime, b) prednjom stranicom i c) kao tačkasti izvor

Potrebno je verifikovati model, odnosno uporediti nivo zvučnog pritiska na kontrolnim tačkama koji su izmereni tokom određivanja zvučne snage sa nivoima zvučnog pritiska izračunatim primenom različitih modela. Da bi ove vrednosti bile uporedive proračunatim vrednostima nivoa zvučnog pritiska su dodate izmerene vrednosti ambijentalne buke, pošto modeli nisu obuhvatili modelovanje ambijentalne buke. Na Sl. 6 je prikazan nivo zvučnog pritiska na mernim pozicijama dobijen merenjem kao i modelovanjem zvučnog izvora na različite načine po 1/3 oktavnim opsezima počevši od 63 Hz do 10 kHz. Na svim mernim pozicijama modelovane vrednosti su veoma slične dok se izmerena vrednost razlikuje. Izmerena vrednost se

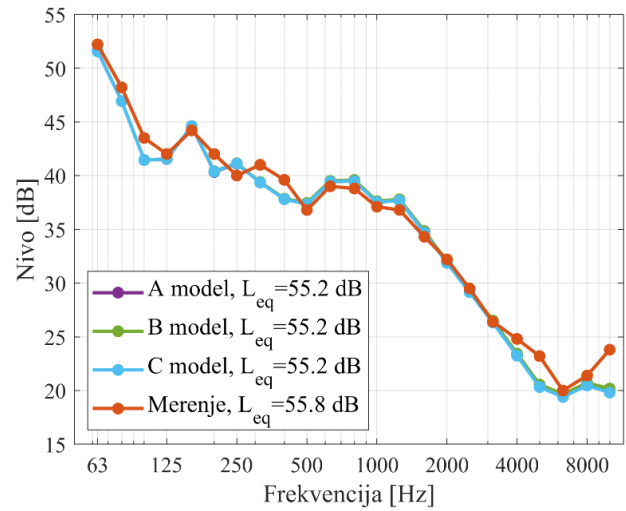
ne razlikuje značajno od modelovanih i može se zaključiti da je modelovano zvučno polje u *SoundPlan*-u verodostojna reprezentacija realnog zvučnog polja koje postoji pod uticajem klima uređaja. Ukupan nivo zvučnog pritiska na mernim pozicijama gde je uračunata ambijentalna buka je prikazan u legendi gde se vidi da se izmerene vrednosti ne razlikuju značajno od modelovanih. Na poziciji M_1 ukupan izmereni nivo je za 1.4 dB, za B i C, odnosno 1.3 za A veći od rezultata modela. Veće odstupanje je na mestu M_2 , gde je izmeren nivo pritiska veći za 2.2 dB od C modela. Na kontrolnoj poziciji M_3 odstupanja rezultata modela u odnosu na rezultat merenja su manja nego na ostalim kontrolnim pozicijama i iznosi 0.6 dB, odnosno 0.8 dB. Na kontrolnoj poziciji M_4 odstupanje rezultata modela po 1/3 oktavnim opsezima od izmerenih vrednosti je najveće. U opsegu od 100 Hz do 1250 Hz apsolutna razlika između ovih vrednost je između 2 dB do 3 dB. Ova razlika nije velika i ekvivalentan nivo zvučnog pritiska modelovanih vrednosti i izmerene se razlikuje za oko 0.7 dB. U praktičnim primenama se ova vrednost opisuje kao dovoljno malo iz čega se zaključuje da su sva tri modela tačna. Kao što se tvrdi na osnovu Sl. 5, tako se i na osnovu Sl. 6 može tvrditi da je opravdano modelovanje ovakvog izvora kao tačkastog.



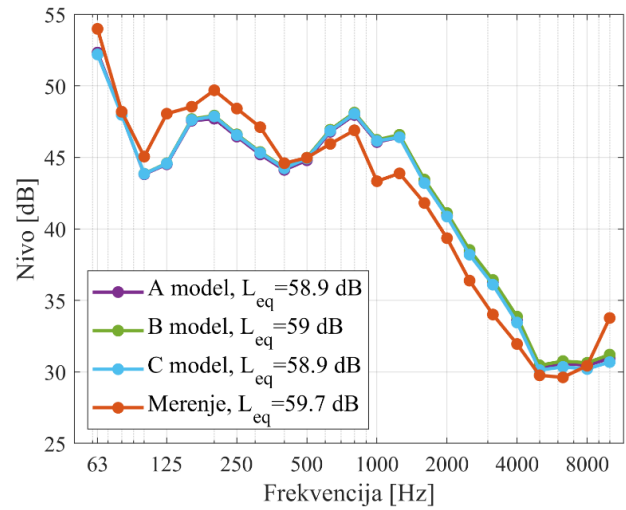
a)



b)



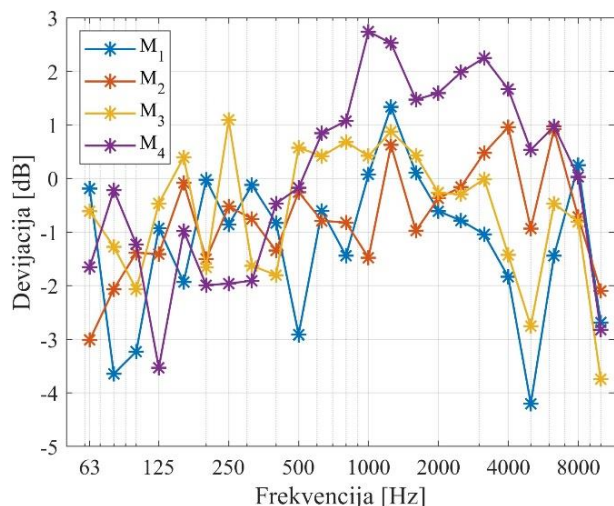
c)



d)

Sl. 6. Nivo zvučnog pritiska na kontrolnim pozicijama, a) M_1 , b) M_2 , c) M_3 i d) M_4

Za svaku mernu poziciju je izračunata razlika izmerenih i izračunatih vrednosti nivoa zvučnog pritiska primenom modela A i prikazana na Sl. 7. Na Sl. 7 ljubičastom bojom je prikazano odstupanje proračunatih i izmerenih vrednosti nivoa zvučnog pritiska na mernoj poziciji M_4 . Na frekventijskim opsezima od 100 Hz do 4000 Hz je odstupanje veće nego na ostalim mernim pozicijama. Ovakav rezultat je opravdan jer se merna pozicija M_4 nalazi u bliskom polju zvučnog izvora. Odstupanja za merne pozicije M_2 i M_3 su u opsegu između -2 dB i 1 dB, što je zanemarljivo malo. Za M_1 odstupanja su malo veća i nalaze se u opsegu od -4.5 dB do 1.5 dB, ali bez jasne veze između frekventijskog opsega i odstupanja. Na osnovu ove analize se može tvrditi da je poređenje rezultata modela i merenja složenije kada se radi o bliskom zvučnom polju izvora. Za složenije izvore buke se mogu očekivati rezultati koji se u bliskom polju značajnije razlikuju u zavisnosti od tipa modelovanja izvora.



Sl. 7. Odstupanje proračunatih vrednosti nivoa zvučnog pritiska primenom modela A i izmerenih vrednosti po frekvencijskim opsezima

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu je pokazan princip merenja i izračunavanja zvučne snage spoljne jedinice klima uređaja, odnosno mašinskog sistema koji stvara buku u okolini. Pokazan je princip modelovanja ovakvog izvora zvuka u softveru *SoundPlan* uz uprošćavanje modela izvora zvuka. Poređenjem izmerenih nivoa buke na kontrolnim tačkama sa nivoom buke koji se izračunava pomoću modela je pokazano je da su sva tri model izvora zvuka dovoljno precizna. Ovakvi modeli se koriste u projektima zvučne zaštite i ideja je da oni budu što sličniji stvarnim situacijama. U ovakvim projektima postoji mnogo izvora buke koje je potrebno modelovati. Da bi se uštedelo vreme i resursi bitno je uprostiti modele, odnosno modelovati izvore tako da su što jednostavniji. U ovom radu je pokazano kako adekvatno uprošćavati model. U modelu je izračuna nivo buke kada se modeluje klima uređaj kao prostorni, površinski i tačkasti izvor zvuka. Za ovakvu vrstu klima uređaja početna hipoteza je glasila da je adekvatno modelovati izvor zvuka kao tačkasti izvor što je i pokazano prikazanim rezultatima u radu. Klima uređaj koji je testiran je malih dimenzija i ne vidi se razlika u formiranom zvučnom polju u zavisnosti od tipa modelovanja. U daljim istraživanjima princip prikazan u ovom radu će biti testiran na većim industrijskim klimama i sistemima za hlađenje koji se nalaze na vrhu objekata. Očekuje se da se zvučno polje razlikuje u odnosu na tip modela izvora, naročito u bliskom polju. U daljim istraživanjima treba pokazati da li je opravdano ovakve sisteme modelovati kao tačkaste izvore.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, pod brojem ugovora 451-03-47/2023-01/200103.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] G. Pavić, „Measurement of sound intensity“, *Journal of Sound and Vibration* 51(4):533-545, April 1977.
- [2] M. Bjelić, N. Knežević, K. Jovanović, „Automatizovano merenje intenziteta zvuka pomoću robota i intenzitetske sonde“, *INFOTEH-JAHORINA*, 21-23 March 2018.
- [3] V. Wittstock, S. Brezas, F. Heisterkamp, „Sound power determination by intensity—Are field indicators and criteria in ISO 9614 meaningful?“, *J. Acoust. Soc. Am.* 155, 588–599 (2024).

- [4] R. E. Halliwell, A. C. C. Warnock, „Sound Transmission Loss: Comparison of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques“, *J. Acoust. Soc. Am.* 77, 2094-2103 (1985).
- [5] S. Gade, „Sound Intensity (Part 2 Instrumentation and Applications)“, *Brüel & Kjær Technical Review* 4, 3-32 (1982).
- [6] S. Gade, „Sound Intensity (Part 1 Theory)“, *Brüel & Kjær Technical Review* 3, 3-39 (1982).
- [7] M. Bjelić, M. Mijić, M. Stanojević, B. Juranović, „Detekcija nebalansiranosti usisnih grana pomoću intenzitetske sonde“, *Kladovo jun 2017, AKI 2.1.1-AKI 2.1.6*, ISBN: 978-86-7466-692-0
- [8] M. J. Crocker, J. P. Arenas, R. E. Dyamannavar, „Identification of noise sources on a residential split-system air-conditioner using sound intensity measurements“, *Applied Acoustics* 65 (2004) 545–558.
- [9] M.S.M.Sani, M.H.A. Rasid, M.R.M.Rejab, M.M.Noor, K.Kadrigama & M.M.Rahman, „Experimental Study on Noise Source Identification of Split Unit Air Conditioner System“, *International Conference on Advance Mechanical Engineering (ICAME09)* 22~25 Jun 2009.
- [10] „Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity –Part 1: Measurement at discrete points“, *ISO 9614-1*, 2009.
- [11] SoundPLAN LLC, *SoundPLAN® User's Manual* (Braunstein + Berndt GmbH/SoundPLAN LLC) 2005.
- [12] Brüel & Kjær Technical Review, *Sound Intensity, The Fundamentals of Sound Intensity Measurement*.
- [13] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <https://www.manuals.midea/r410a/manual>, pristupano 10.1.2024.
- [14] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/sound-intensity-probes/3599>, pristupano 15.1.2024.
- [15] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/lan-xi-daq-system>, pristupano 15.1.2024.
- [16] „Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors“, *ISO 9613*, 1993.
- [17] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <https://www.norsonic.ch/wordpress/wp-content/uploads/nor140-brochure-en.pdf>, pristupano 15.1.2024.

ABSTRACT

This paper demonstrates the principle of modeling the outdoor unit of air conditioners (AC) as a sound source for the needs of sound protection projects. Modeling of the source and the sound field is necessary to accurately predict the noise level in real-world conditions. In engineering practices, sound power is generally used as input data for modeling sound sources. In this paper, the sound power was determined by measuring sound intensity using an intensity probe. Models should strike a balance between resembling real conditions and simplicity to save calculation time and computer resources. The outdoor AC unit was modeled using *SoundPlan* software in three different ways. The first model assumes that all sides emit sound power, where each side is described by a power determined by measuring sound intensity. The second model assumes that only the front side of the AC emits the total sound power, and the third model assumes that the AC is described as a point source. This paper demonstrates that modeling such a source as a point source is adequate. The demonstrated principle can be realized on large roof-mounted air conditioning systems and mechanical systems located on the roofs or facade walls of buildings for the needs of sound protection projects.

Determining sound power of outdoor air conditioning units for sound source modeling purposes

Marija Ratković, Miloš Bjelić