

Kvantifikacija zvučne snage komercijalnog drona korišćenjem ISO standarda

Vasilije Kovačević

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, i Inovacioni centar Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu
Beograd, Republika Srbija
vasilije.kovacevic@ic.etf.rs, ORCID ID: 0009-0004-0974-0678

Miloš Bjelić

Laboratorija za akustiku
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Republika Srbija
bjelic@etf.rs, ORCID ID: 0000-0002-5859-1654

Abstract—U poslednjih nekoliko godina, dronovi su postali neizostavan deo različitih aspekata života, uključujući vojne operacije, komercijalnu dostavu, nadzor poljoprivrednih površina, kao i zabavne i rekreativne aktivnosti. Međutim, upotreba dronova donosi i potencijalne negativne efekte, a jedan od ključnih je nivo buke koji proizvode. Buka generisana od strane dronova može otežati slobodno upravljanje njima, posebno u naseljenim područjima. U ovom radu prikazana je metodologija merenja nivoa zvučne snage komercijalnog drona u skladu sa standardom ISO 3744. Za mernu površ izabran je paralelepiped i snimanje vremenskih signala ambijentalne buke i buke drona izvedeno je u 9 tačaka. Izračunate su vrednosti nivoa zvučne snage buke koju proizvodi dron po 1/3 oktavnim opsezima, u dB i dB(A). Ukupni nivo zvučne snage buke koju proizvodi dron iznosi 84.53 dB(A).

Ključne reči—buka, dron, ISO 3744, zvučna snaga

I. UVOD

U poslednjih nekoliko godina, primena dronova postala je prisutna u različitim aspektima života, od vojnih operacija do komercijalne dostave, nadzora nad poljoprivrednim površinama, kao i u zabavnim i rekreativnim aktivnostima [1]. Uz sve prednosti, važno je razumeti i potencijalne negativne efekte koji dolaze sa upotrebom dronova, među kojima je jedan od ključnih: nivo buke koju generišu.

Dronovi ili bespilotne letelice često proizvode veliki nivo akustičke buke, što može otežati slobodno upravljanje nad njima, posebno u naseljenim mestima [2-4]. Ova buka može biti problematična i zavisi od mnogo faktora: veličine drona i njegovih propelera, načina i brzine letenja, poletanja, sletanja i slično [5].

Zvučna snaga je podatak koji opisuje neki zvučni izvor i predstavlja meru ukupne zvučne emisije neke mašine ili uređaja, emitovane u raznim pravcima [6]. Podaci o nivou zvučne snage nekog uređaja su od velikog značaja proizvođačima opreme, ljudima koji je instaliraju, kao i kupcima i korisnicima te opreme. Na osnovu zvučne snage moguće je porediti uređaje u pogledu proizvedenog zvuka, definisati standarde za maksimalnu dozvoljenu buku koju mogu proizvoditi mašine, kao i raditi na tome da se buka koju određeni uređaji proizvode u toku rada smanji [7].

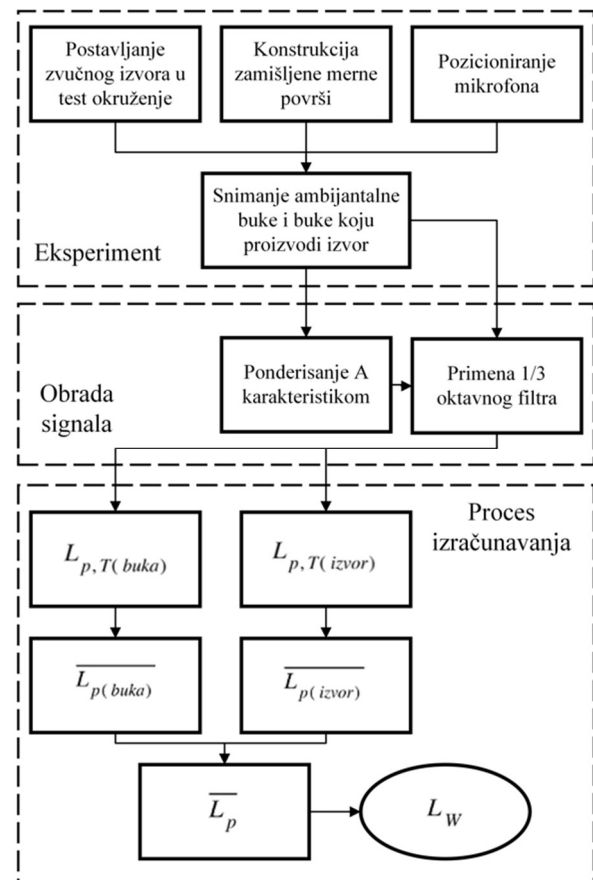
Izmerene vrednosti zvučne snage moguće je koristiti za izračunavanje zvučnog pritiska neke mašine ili grupe mašina u određenoj tački, u određenoj sredini i pri određenim uslovima, kao što su na primer fabrički uslovi, kancelarijski ili kućni uslovi [6].

Za razliku od zvučne snage, zvučni pritisak je različit u različitim tačkama jer zavisi od brojnih parametara vezanih za sredinu i uslove u kojima se uređaj nalazi.

Ovaj rad se bazira na standardu EN ISO 3744 [7] koji opisuje korišćenje mernih površina za računanje nivoa zvučne snage izvora. U drugom poglavlju prikazana je celokupna metodologija rada, koja uključuje postavku eksperimenta, jednačine definisane standardom i obradu signala. U trećem poglavlju prikazani su rezultati i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju izneti su zaključci do kojih se došlo u ovom istraživanju.

II. METODOLOGIJA

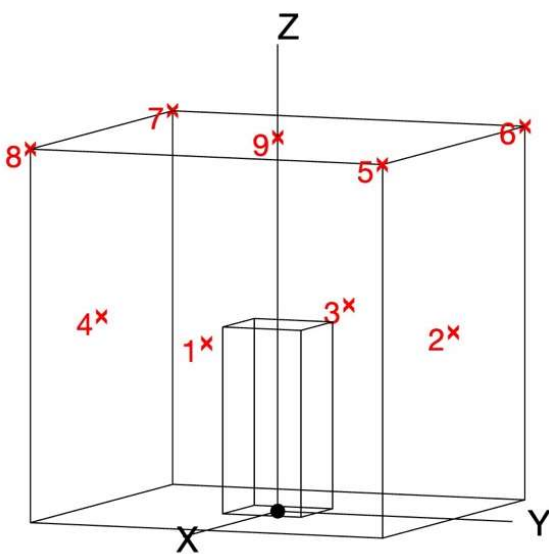
Metodologija ovog rada uključuje sprovođenje merenja zvučnog pritiska generisanog od strane propelera drona na otvorenom prostoru, u skladu sa standardom. Na Sl. 1 prikazana je metodologija rada.



Sl. 1 Postupak izračunavanja zvučne snage

A. Eksperiment

Kako bi se izvršilo određivanje zvučne snage koju proizvode propeleri drona u toku leta, izvršeno je merenje na otvorenom u saglasnosti sa standardom EN ISO 3744 za merenje zvučnog pritiska primenom merne površi. Pored pravilnog postavljanja zvučnog izvora u test okruženje, potrebno je izvršiti i pozicioniranje mikrofona tako da se oni nalaze u određenim tačkama specifične zamišljene merne površi. Mikrofon koji se koristi služe za akviziciju signala kako izvora tako i ambijentalne buke. Izabrana merna površina predstavlja paralelepiped. Pozicija i broj (N_M) mikrofona koji se koriste pri merenju korišćenjem paralelepipeda kao merne površine zavise od dimenzija referentne kutije kao i merne udaljenosti d . Egzaktna procedura kojom se određuju svi parametri eksperimentalne postavke opisana je u Annexu C EN ISO 3744 standarda [8]. Na Sl. 2 predstavljena je merna površ (spoljašnji kvadar), referentna kutija (unutrašnji kvadar) kao i pozicije mikrofona (obeležene crvenim brojevima) u koordinatnom sistemu.



Sl. 2 Prikaz merne površi, referentne kutije i pozicije mikrofona u prostoru

Kao zvučni izvor korišćen je komercijalni dron na osnovu čijih dimenzija je napravljena referentna kutija, koja predstavlja uprošćeni model samog izvora. Kutija je modelovana kao kvadar dimenzija $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Kako se dron nalazio na jednoj reflektujućoj površi, imamo da je površina merne površi data jednačinom:

$$S = 4(ab + bc + ca) \quad (1)$$

gde su vrednosti parametara (1) date izrazima:

$$a = 0,5l_1 + d \quad (1.1)$$

$$b = 0,5l_2 + d \quad (1.2)$$

$$c = l_3 + d \quad (1.3)$$

Na ovaj način izračunata je površina $S = 23.0625 \text{ m}^2$. Izabrani broj pozicija mikrofona potrebnih za snimanje je 9 i te pozicije date su u Tabeli 1.

Nakon postavke eksperimenta, najpre se na svakoj poziciji mikrofona snima vremenski signal ambijentalne buke, a zatim

vremenski signal zvučnog izvora, odnosno drona. Snimanje signala se, na svakoj poziciji mikrofona, i za ambijentalnu buku i za testirani izvor zvuka, obavlja u vremenskom intervalu od 10 s.

TABELA I. KOORDINATE POZICIJA MIKROFONA

Poz.	x – koordinata* [m]	y – koordinata* [m]	z – koordinata* [m]
1	1,125	0	1
2	0	1,125	1
3	-1,125	0	1
4	0	-1,125	1
5	1,125	1,125	2
6	-1,125	1,125	2
7	-1,125	-1,125	2
8	1,125	-1,125	2
9	0	0	2

* vrednosti u tabeli predstavljaju distance u odnosu na koordinatni početak

Na Sl. 3 prikazana je postavka eksperimenta u prvoj u nizu prethodno određenih pozicija mikrofona.



Sl. 3 Postavka eksperimenta

B. Obrada signala

U toku izvođenja eksperimenta izvršeno je merenje pomoću mikrofona u 9 pozicija u dve eksperimentalne postavke čime je dobijeno 18 audio signala. Ovi signali su podvrgnuti filtriranju koristeći filter sa A karakteristikom, koji se često koristi za frekvencijsku ponderaciju. Kroz ovaj proces, dobijena su četiri seta signala. Dva seta signala koriste se za izračunavanje nivoa zvuka na kraju u decibelima (dB), dok se druga dva seta koriste za izračunavanje nivoa zvuka u decibelima ponderisanim A karakteristikom (dB(A)).

A-weighting, odnosno ponderisanje A karakteristikom, često se koristi i predstavlja korekciju koja uzima u obzir ljudsku percepciju zvuka i nivoa zvučnog pritiska, pa u skladu sa tim koriguje izmerene nivoe kako zvučnog pritiska tako i zvučne snage [9]. Time se u obzir uzima relativni nivo buke koju ljudsko uvo registruje, jer ono poseduje manju osetljivost na zvukove nižih frekvencija. Najčešće se za ponderisanje A karakteristikom na izmereni zvučni pritisak koristi familija krivih definisana standardom IEC 61672-2:2013 [10].

Nakon ovog koraka, svi signali propušteni su kroz 1/3 oktavnu banku filtara kako bi se dobile kao krajnji rezultat dobile

vrednosti nivoa snage po opsezima. Ostatak obrade je proces koji se sprovodi prema jednačinama koje su predstavljene u narednom delu.

C. Proces izračunavanja nivoa snage zvuka

Zvučni pritisak predstavlja razliku između trenutnog pritiska zvuka i statičkog pritiska okoline. Kada se posmatraju snimljeni vremenski oblici signala, posmatra se način na koji se zvučni pritisak menja u vremenu. Za izračunavanje nivoa snage zvuka najpre treba izračunati vremenski usrednjeni nivo zvučnog pritiska pomoću jednačine:

$$L_{p,T} = 10 \log_{10} \left| \frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{p_0^2} \right| \quad (2)$$

gde je T vreme trajanja signala, $p(t)$ predstavlja trenutni zvučni pritisak a p_0 je referentnu vrednost pritiska i iznosi $20 \mu\text{Pa}$. Svaka od jednačina prikazana u ovom odeljku koristi se i za signale ambijentalne buke i za signale zvučnog izvora.

Zatim, na osnovu dobijenih rezultata, za N_M pozicija mikrofona na mernoj površi srednja vrednost vremenski usrednjenih nivoa zvučnog pritiska na mernoj površi računa se prema jednačini:

$$\overline{L_{p(\text{izvor})}} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0.1 L_{p,T,i(\text{izvor})}} \right] \text{ dB} \quad (3.1)$$

$$\overline{L_{p(\text{buka})}} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0.1 L_{p,T,i(\text{buka})}} \right] \text{ dB} \quad (3.2)$$

Nakon prethodno izračunatih srednjih vrednosti vremenski usrednjenih nivoa zvučnih pritisaka na pozicijama mikrofona, za testirani zvučni izvor i ambijentalnu buku korekcija K_1 ambijentalne buke računa se na sledeći način:

$$K_1 = -10 \log_{10} \left(1 - 10^{-0.1 \Delta L_p} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

gde ΔL_p predstavlja razliku usrednjenih nivoa zvučnih pritisaka. U zavisnosti od te vrednosti, određivanje korekcije ambijentalne buke svodi se na tri slučaja:

1. Ako je $\Delta L_p > 15 \text{ dB}$, onda pretpostavljamo da je $K_1 = 0$, te se korekcija za ambijentalnu buku ne primenjuje;
2. Ako je $15 \text{ dB} > \Delta L_p > 6 \text{ dB}$, korekcija se računa prema (4);
3. Ako je $6 \text{ dB} > \Delta L_p >$ preciznost rezultata može biti smanjena pa se za ovaj slučaj uzima $K_1 = 1,3 \text{ dB}$.

Kada su izračunate vrednosti za $L_{p(\text{buka})}$, $L_{p(\text{izvor})}$ i K_1 , površinski vremenski usrednjeni nivo zvučnog pritiska dobija se korekcijom srednje vrednosti vremenski usrednjenih nivoa zvučnog pritiska na svim pozicijama mikrofona na mernoj površi, L_p , za uticaj ambijentalne buke K_1 i za uticaj okruženja K_2 prema sledećoj jednačini:

$$\overline{L_p} = \overline{L_{p(\text{izvor})}} - K_1 - K_2 \quad (5)$$

Kada se izvor zvuka koga testiramo nalazi na otvorenom, na asfaltu ili betonu i kada na udaljenosti deset puta većoj od one između geometrijskog centra izvora i merne površi nema

objekata koji bi mogli da reflektuju zvuk, koeficijent K_2 se zanemaruje.

Pomoću prethodno izračunatog površinskog vremenski usrednjenog nivoa zvučnog pritiska, nivo snage zvuka, L_w , za meteorološke uslove u vremenu vršenja merenja i na lokaciji na kojoj se merenja vrše, računa se po jednačini:

$$L_w = \overline{L_p} + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} \text{ dB} \quad (6)$$

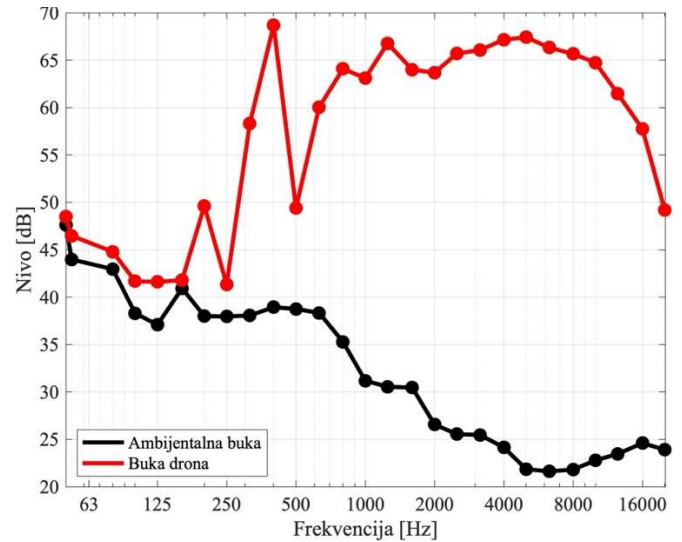
gde je S izračunata pomoću jednačine 1, dok je $S_0 = 1 \text{ m}^2$.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati prethodno opisane metodologije su vrednosti nivoa zvučne snage drona po opsezima, izraženi u dB i u dB(A).

A. Snimljeni signali

Bazu snimaka činili su snimci ambijentalne buke kao i izvora, odnosno drona, snimljeni u 9 tačaka. Na narednoj slici su spektri signala, snimljeni u poziciji 9, prikazani u dB zapisu i po opsezima za signal ambijentalne buke i za signal buke koju proizvodi dron. Na Sl. 4 se mogu uvideti razlike u nivoima signala buke drona i ambijentalne buke devete pozicije na frekvencijskim opsezima od važnosti za ljudsko uvo.



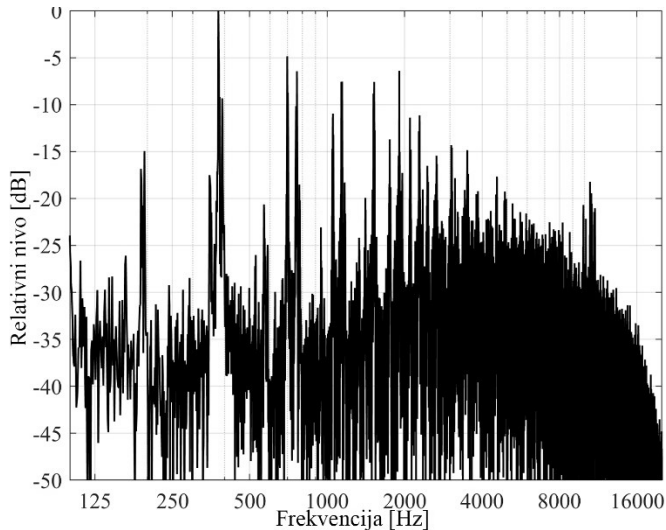
Sl. 4 Nivoi ambijentalne buke i buke drona po 1/3 oktavnim opsezima

Na niskim frekvencijama, iako je nivo buke drona od veći od nivoa ambijentalne buke, razlika je značajno manja od razlike u opsezima sa višom frekvencijom. Razlika između nivoa ambijentalne buke i izvora po standardu bi trebala da bude 15 dB a minimalno 6 dB što je i ispunjeno u konkretnom slučaju u opsezima od značaja.

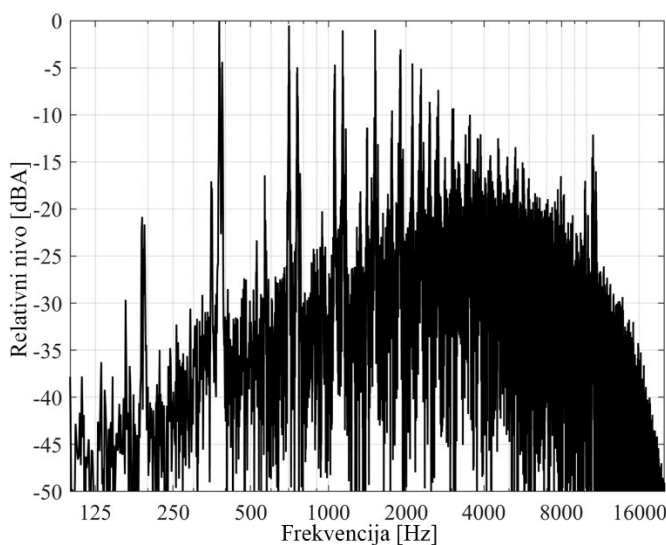
Najdominantniji izvor buke tipičnog drona predstavlja pogonski sistem, odnosno kombinacija buke koju stvara motor drona i buke koju stvaraju propeleri [5]. Buka propelera sastoji se od tonalnih i širokopojasnih komponenti. Najveći deo buke, u smislu usmerenosti, nalazi se u ravni propelera. Osnovna frekvencija buke koju proizvode propeleri računa se kao:

$$f_1 = \frac{N_{RPM} N_P}{60} \quad (7)$$

gde N_{RPM} predstavlja rotacionu brzinu propelera, odnosno broj rotacija u minuti, a N_p predstavlja broj propelera. Korišćeni dron poseduje četiri propelera i leteo je u toku izvođenja eksperimenta sa rotacionom brzinom koja je iznosila okvirno 6000 rotacija u minuti, što znači da osnovna frekvencija iznosi 400 Hz. Na Sl. 4, kao i na Sl. 5 i 6 koje predstavljaju spektralne prikaze buke drona na šestoj poziciji, može se uočiti lokalni maksimum na izračunatoj osnovnoj frekvenciji.



Sl. 5 Spektralni prikaz buke drona izražen u dB

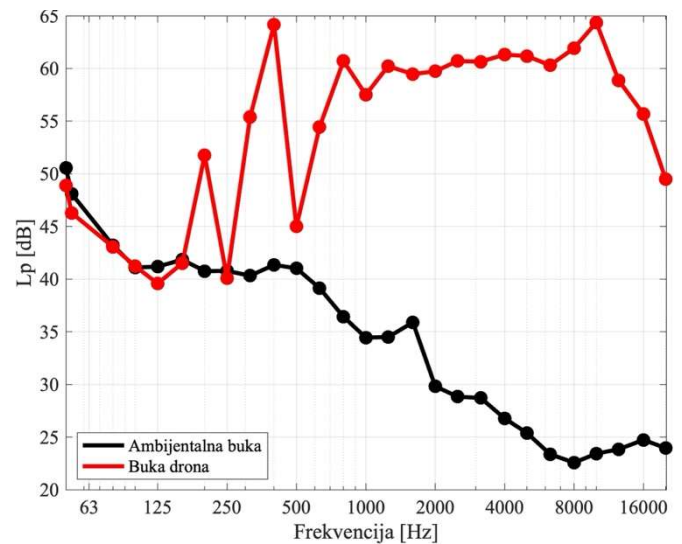


Sl. 6 Spektralni prikaz buke drona izražen u dB(A)

Sa druge strane, doprinos buci koju stvara dron potiče i od buke koju stvara električni motor drona [11]. Motori imaju KV obeležje koje se odnosi na brzinu rotacije pri određenom naponu. Električni motori za napajanje dronova rade pri prilično visokim obrtajima u minutu (RPM) [12], konkretno motor korišćenog drona radi sa 12000 obrtaja u minutu.

B. Računanje nivoa zvučne snage izvora

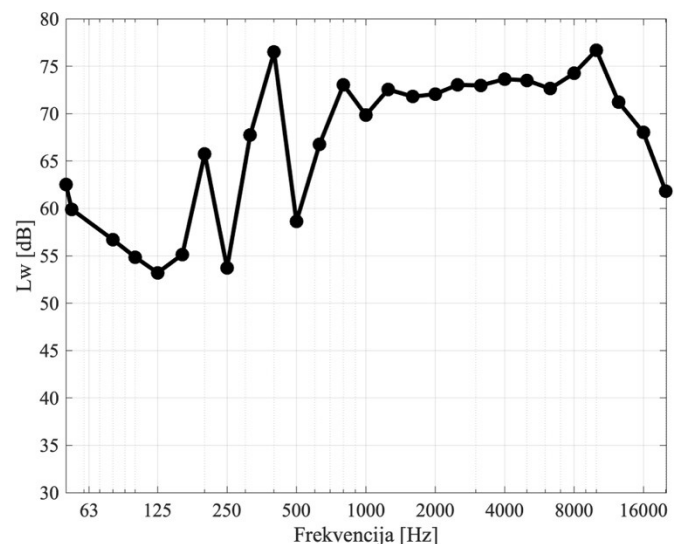
Za računanje nivoa zvučne snage najpre je neophodno izračunati usrednjene nivoe zvučnog pritiska po opsezima. Za p_0 , što predstavlja referentnu vrednost uzeto je $20 \mu\text{Pa}$. Izračunate vrednosti usrednjelog nivoa zvučnog pritiska buke drona i ambijentalne buke predstavljene su na Sl. 7.



Sl. 7 Izračunati usrednjeni nivoe zvučnih pritisaka signala izražen u dB po 1/3 oktavnim opsezima

Na niskim frekvencijama usrednjeni nivo zvučnog pritiska buke drona je niži od usrednjelog nivoa zvučnog pritiska koji proizvodi ambijentalna buka. Do toga dolazi zbog spoljašnjih faktora prostora u kojima je izveden eksperiment. Naime, ti spoljašnji faktori su saobraćajnice u blizini, od kojih su neke visokog intenziteta, postojanje podzemne železničke stanice i železničkog a i tramvajskog saobraćaja i tome slično. Lokacija na kojoj je snimana ipak predstavlja zavetrinu, kako vetar ne bi dodatno uticao na snimanje i let drona.

Nakon računanja korekcionog faktora po opsezima, dobijene su vrednosti za usrednjen nivo zvučnog pritiska na svim pozicijama, koji je dalje od koristi za računanje nivoa zvučne snage. Na Slici 8 prikazan je nivo zvučne snage buke drona izražen u dB po 1/3 oktavnim opsezima.



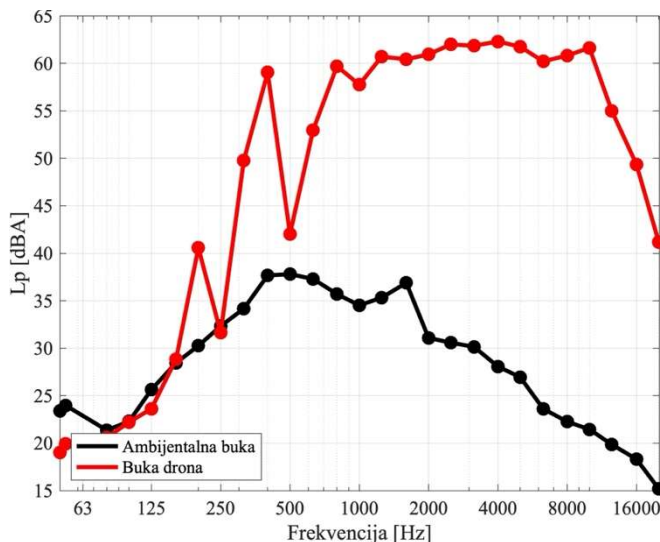
Sl. 8 Nivo zvučne snage buke drona izražen u dB po 1/3 oktavnim opsezima

Na slici se može uočiti već ustanovljen trend nižih nivoa na niskim frekvencijskim opsezima, međutim za frekvencijske opsege od značaja za ljudski sluh, vrednosti nivoa zvučne snage prelaze i 75 dB. Na kraju, po standardu nivo zvučne snage nekog

izvora definisan je kao jedan broj, koji u ovom slučaju iznosi $L_w = 85,42$ dB.

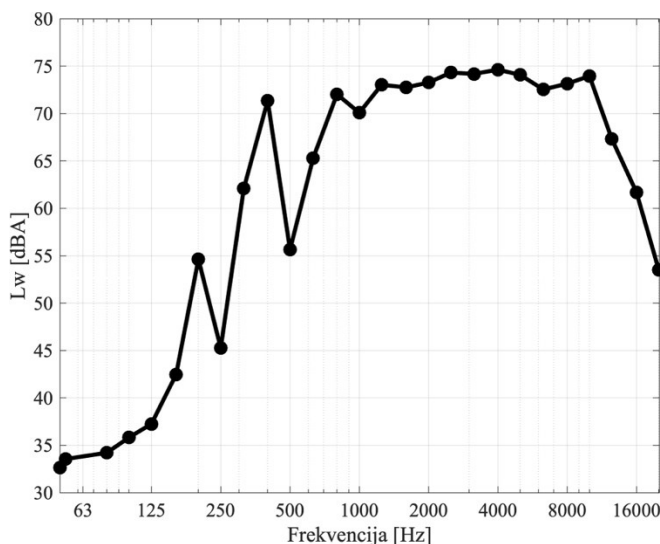
C. Računanje nivoa zvučne snage izvora ponderisanjem A karakteristikom

Način na koji se dolazi do nivoa zvučne snage po opsezima nakon primene A filtra je identičan kao u prethodnom delu. Najpre se izračunavaju nivoi zvučnih pritisaka za obe grupe signala, koji su prikazani na Sl. 9.



Sl. 9 Izračunati usrednjeni nivoi zvučnih pritisaka signala izraženi u dB(A) po 1/3 oktavnim opsezima

Kao što se može primetiti na slici, vrednosti nivoa na niskim frekvencijama dodatno su niže zbog primene A filtra. Na Sl. 10 prikazane su dobijene vrednosti nivoa zvučne snage buke drona po 1/3 oktavnim opsezima izražene u dB(A).



Sl. 10 Nivo zvučne snage buke drona izražen u dB(A) po 1/3 oktavnim opsezima

Po standardu izračunati ukupni nivo zvučne snage iznosi $L_w = 84,53$ dB(A). Za potrebe poređenja izračunata zvučna snaga jedne klima komore iznosi u proseku 75 dB(A), što po dimenzijama predstavlja mnogo veći izvor buke od komercijalnog drona za svakodnevnu upotrebu [13].

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu izmeren je nivo zvučne snage komercijalnog drona malih dimenzija primenom metodologije propisane standardom EN ISO 3744. Eksperiment zarad prikupljanja podataka izvršen je na otvorenom u dva scenarija primenom mikrofona postavljenog u 9 različitih pozicija u okviru merne površi oblika paralelopipeda. Kada se analizira zvuk koji proizvodi dron, primetno je da se njegova buka ne uklapa u uobičajene obrasce tipičnih zvučnih izvora. Na primer, u određenim 1/3 frekvencijskim opsezima, konkretno oko 400 Hz, dron pokazuje povećani nivo buke, dok je za susedne opsege nivo značajno manji. Ovo je neobično jer tipični zvučni izvori obično imaju monotono opadajuću ili rastuću distribuciju nivoa buke po frekvencijama. Izmerena vrednost ukupne zvučne snage drona iznosi 84,53 dB što je više nego što proizvodi prosečna spoljna jedinica klima uređaja. Informacija o nivou zvučne snage drona jako je bitna kako bi primena dronova mogla da bude u skladu sa regulativama o dozvoljenim nivoima zvučne snage uređaja prilikom primena u raznim okruženjima. U daljem radu potrebno je ispitati vrednosti ukupne zvučne snage raznih komercijalnih i profesionalnih dronova kako bi se u potpunosti okarakterisao zvučni uticaj drona na okolinu i kako bi se upotpunilo projektovanje sistema koji uključuju dronove. Takođe, izmereni nivo zvučne snage može se koristiti kao ulazni podatak prilikom modelovanja zvučnog polja u raznim softverima za komercijalne upotrebe.

ZAHVALNICA

Zahvaljujemo se dr Vladislavi Krsmanović na podršci tokom pripreme ovog rada, kao i Bojani Bjelici na ustupanju drona korišćenog u eksperimentu ovog rada.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] B. Schäffer, R. Pieren, K. Heutschi, J. M. Wunderli, and S. Becker, "Drone Noise Emission Characteristics and Noise Effects on Humans—A Systematic Review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 11, p. 5940, Jan. 2021.
- [2] N. Intaratep, W. N. Alexander, W. J. Devenport, S. M. Grace, and A. Dropkin, "Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions," *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, May 2016.
- [3] F. Christiansen, L. Rojano-Doñate, P. T. Madsen, and L. Bejder, "Noise Levels of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles with Implications for Potential Underwater Impacts on Marine Mammals," *Frontiers in Marine Science*, vol. 3, Dec. 2016.
- [4] F Alton Everest and K. C. Pohlmann, *Master handbook of acoustics*. New York Mcgraw Hill Professional, 2011.
- [5] D. Miljkovic, "Methods for attenuation of unmanned aerial vehicle noise," *International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, May 2018.
- [6] N. Stanković, "Realizacija softvera za merenje zvučne snage izvora" Master rad, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2022.
- [7] EN ISO 3744 Standard. Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane, ISO 3744:2010, 2010.
- [8] Annex C (normative) Microphone arrays on a parallelepiped measurement surface, EN ISO 3744 Standard, ISO 3744:2010, 2010.
- [9] D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, "Elektroakustika", Beograd: Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2017.
- [10] IEC 61672-2:2013 Electroacoustics - Sound level meters - Part 2: Pattern evaluation tests

- [11] M. Brackley and C. Pollock, "Analysis and reduction of acoustic noise from a brushless DC drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 3, pp. 772–777, 2000.
- [12] D. Miljković, "Active Noise Control in Light Aircraft Cabin Using Multichannel Coherent Method," *Automatika*, vol. 57, no. 4, pp. 1056–1069, Oct. 2016.
- [13] S. Lind, "Uncertainty of sound power levels determined following Air Conditioning Heating and Refrigeration Institute Standard 220," *Proceedings of meetings on acoustics*, Jan. 2010.

ABSTRACT

In the last few years, drones have become an integral part of various aspects of life, including military operations, commercial delivery, agricultural field monitoring, as well as entertainment and recreational activities. However, the use of drones also brings

potential negative effects, with one of the key concerns being the level of noise they produce. The noise generated by drones can hinder their free operation, especially in populated areas. This paper presents the methodology for measuring the sound power level of a commercial drone in accordance with ISO 3744 standard. A parallelepiped is chosen as the measurement surface, and the recording of time signals of ambient noise and drone noise is conducted at 9 points. The values of the sound power level produced by the drone per 1/3-octave bands are calculated in dB and dB(A). The total sound power level produced by the drone is 84.53 dB(A).

Quantification of the sound power of a commercial drone using the ISO standard

Vasilije Kovačević, Miloš Bjelić