

## MERENJE BUKE VAZDUHOPLOVA PREMA STANDARDU ICAO Annex 16

Vojkan Bošković, Vladimir Zeljković, LOLA Institut  
Gordana Jurin, Vazduhoplovni opitni centar, Beograd

**Sadržaj** – Rad prikazuje deo procedure merenja buke vazduhoplova prema međunarodnom standardu ICAO Annex 16 vezan za merenje i proračun akustičkih parametara: buke vazduhoplova i ambijentalne buke. U radu su prikazani rezultati merenja buke aviona G-2A u toku jednog preleta mernog mesta.

### 1. UVOD

Osnovna tri razloga razmatranja buke vazduhoplova su: zvučna snaga aviona kao izvora buke, operativna procedura kojom se može kontrolisati snaga tog izvora i planiranje novih ili proširenje već postojećih aerodroma. Prva dva razloga su detaljno pokrivena internacionalnim standardima tipske sertifikacije svakog novog ili svakog bitno modifikovanog vazduhoplova. Međunarodni standardi koji tretiraju ovaj problem su ICAO annex 16, ISO 3891 i FAR Part 36. Ovi standardi detaljno definišu, za različite tipove vazduhoplova, poletno-sletne procedure, pozicioniranje i specifikaciju merne opreme, atmosferske uslove, kao i čitav niz drugih parametara koji utiču na generaciju i propagaciju buke, neophodnih za normalizaciju merenja na standardne operativne i atmosferske uslove. Velike razlike između aerodroma u pogledu temperature, pritiska i vlažnosti nalažu ekstremno komplikovanu proceduru merenja i obrade izmerenih veličina, pošto atmosferski uslovi bitno utiču i na performanse letelice i na prostiranje zvuka kroz atmosferu, a samim tim i na intenzitet buke percipirane u mernoj tački.

### 2. METODOLOGIJA PRORAČUNA BUKE

Za potrebe sertifikacije vazduhoplova standardi nalažu analizu buke i u vremenskom i u frekvencijskom domenu, preko percipiranog nivoa buke  $PNL$ .  $PNL$  (*Perceived Noise Level*) je veličina koja opisuje pojedinačne avionske prelete a nastala je kao rezultat eksperimenata na određivanju veze između subjektivne percepcije i fizičkih karakteristika avionske buke. Procedura nalaže da se za svako merenje vremenski signali filtriraju tercnim filtrima čije su centralne frekvencije od 50Hz do 10kHz, tj. u frekvencijskom opsegu 40Hz – 11.2kHz. Nivoi zvučnog pritiska po tercama i sa SLOW dinamičkom karakteristikom detektora se, u intervalima od 0.5 sec ili manjim, konvertuju u percipiranu bučnost –  $n(i,k)$  [noy] preko tabela ili matematičkih relacija. Za svaki vremenski snimak se ove vrednosti kombinuju za sve terčne opsege po formuli:

$$N(k) = n(k) + 0.15 \cdot \left[ \sum_{i=1}^{24} n(i,k) - n(k) \right] \quad (1)$$

$i$  – redni broj frekvencijskog opsega (1,2,...,24)  
 $k$  – redni broj vremenskog intervala  
 $n(k)$  – maksimalna vrednost u  $k$ -tom vremenskom intervalu

$$\sum_{i=1}^{24} n(i,k) - \text{suma vrednosti u svim opsezima.}$$

Ukupna percipirana bučnost  $N(k)$  se zatim konvertuje u percipirani nivo buke,  $PNL(k)$ , bilo preko tablice ili jednačine:

$$PNL(k) = 40.0 + \frac{10}{\log 2} \log N(k) \quad (2)$$

Ukoliko spektar sadrži neregularnosti (izraženi diskretni tonovi i sl.), te će neregularnosti izazivati veću subjektivnu smetnju, pa je neophodno primeniti korekciju koja se naziva tonska korekcija  $C(k)$ . Koncept tonske korekcije je analiza nagiba amplituda između susednih terci. Identifikacija spektralnih neregularnosti je još jedna ekstremno kompleksna procedura, a dobijena tonska korekcija (koja je frekvencijski zavisna) se dodaje na vrednost  $PNL(k)$ , čime se dobija tonski korigovani percipirani nivo buke  $PNLT(k)$  i izražava u TPNdB.

$$PNLT(k) = PNL(k) + C(k) \quad (3)$$

Kako ukupan subjektivni efekat buke vazduhoplova zavisi ne samo od maksimalnog nivoa i spektralnog sastava, već i od trajanja buke, uvodi se i uticaj vremena. Ukupni subjektivni efekat buke vazduhoplova se označava kao efektivni percipirani nivo buke  $EPNL$  i definiše kao:

$$EPNL = 10 \log \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{PNLT}{10}} \cdot dt \quad (4)$$

Integracija se vrši u vremenskom intervalu  $t_2-t_1$ , gde su  $t_1$  i  $t_2$  dati kao trenuci postizanja nivoa 10 TPNdB nižeg od maksimalnog i opadanja ispod tog nivoa, respektivno. Oblast integracije je tamnije osenčena na sl.3.

Najzad se, uz korišćenje podataka o temperaturi, vlažnosti i pritisku vrednosti  $EPNL$  svode na referentne uslove.

### 3. METODOLOGIJA MERENJA BUKE

Buka vazduhoplova se meri u tri tačke:

1. Lateralna tačka u fazi poletanja: tačka na liniji paralelnoj sa osom piste na rastojanju od 450m od poletne linije, u tački koja se nalazi na mestu gde je buka maksimalna u toku poletanja. Ova tačka se određuje serijom probnih merenja na raznim pozicijama duž merne linije.

2. Tačka preleta u fazi poletanja: tačka koja se nalazi na produženoj osi piste na 6.5km od polazne tačke na pisti.

3. Tačka preleta u fazi sletanja: tačka na produženoj osi piste na rastojanju od 2 km od praga piste.

Merenja se obavljaju pri ambijentalnim uslovima: bez padavina, pri temperaturama od 10°C – 35°C, relativnoj vlažnosti 20%–95%, bez temperaturnih inverzija i sa prosečnom brzinom vetra manjom od 5m/s. Za svaku mernu tačku je neophodno izvršiti šest merenja koja moraju zadovoljiti statističke uslove.

#### 4. BUKA AVIONA G2A I AMBIJENTALNA BUKA

Merenje buke aviona G2A je izvedeno zapisivanjem signala buke na analogni magnetofon NAGRA NTI-A4, akvizicijom signala na SGI (Silicon Graphics) radnoj stanici Indigo 2 i procesiranjem signala u softveru Sound Quality (SDRC). Frekvencijska analiza je vršena filtriranjem digitalnim filtrima u off-line postupku. Dobijeni podaci nivoa buke po tercama sa SLOW dinamičkom karakteristikom u ekvidistantnim razmacima od 0.5 sec su obrađivani u MATLAB paketu.

Vremenski zapisi su snimani sa istim mikrofonskim sistemom na dva magnetofonska kanala simultano, čime je dinamički opseg avionske buke prilagođen dinamičkom opsegu magnetofona.

Ambijentalna buka, uključujući i akustičku buku i električni šum koji potiče od instrumentacije za snimanje i analizu mogu maskirati buku vazduhoplova na delovima frekvencijskog opsega od interesa za izračunavanje *EPNL*.

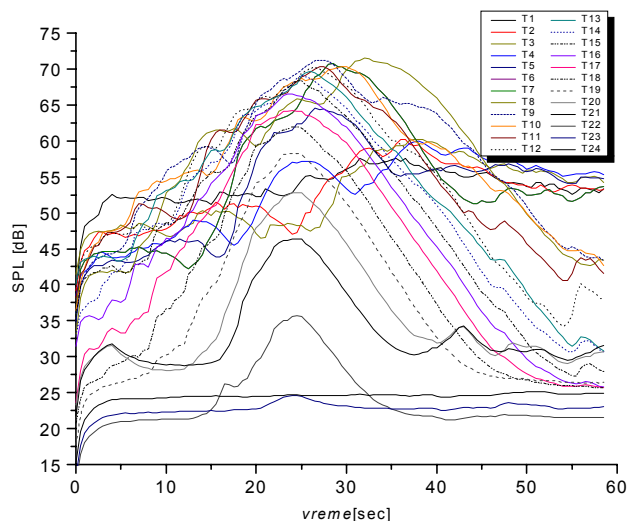


sl.1 Dispozicija mernog mesta: lateralna merna tačka

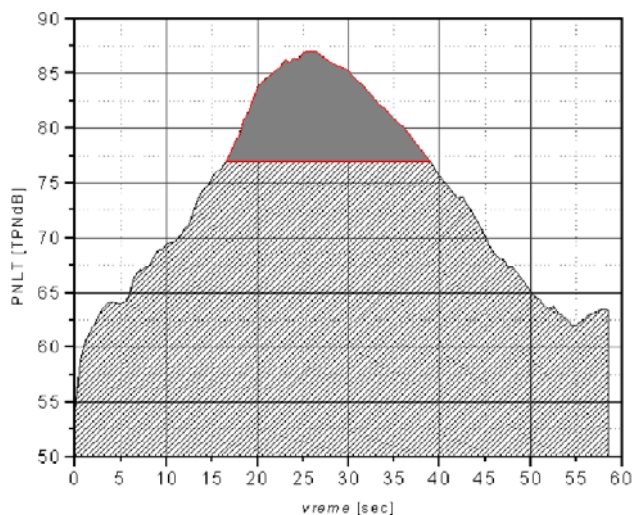
Procedura validacije ambijentalne buke je identična proceduri proračuna buke aviona, čime se i onako dugotrajna obrada merenja udvostručava. Ambijentalna buka se snima na mernom mestu sa istim pojačanjem sistema koje je korišćeno i za snimanje buke vazduhoplova. Snimljena buka vazduhoplova se može smatrati validnom samo ukoliko su nivoi ambijentalne buke, analizirani na isti način kao i buka vazduhoplova, i izraženi kao *PNL*, bar za 20 PNdB ispod maksimalnog *PNL* vazduhoplova. Dodatni uslov je da nivoi zvučnog pritiska vazduhoplova u vremenskom intervalu od  $t_1$  do  $t_2$  moraju biti bar 3 dB iznad ambijentalne buke u svakoj terci. Ukoliko ovi uslovi nisu zadovoljeni, neophodno je primeniti neki od metoda za korekciju.

Na sl.2 su prikazani nivoi buke aviona G2A po tercama za jedan prelet (merna tačka 2 – prelet u fazi poletanja), a na sl.3 odgovarajući dijagram subjektivne jačine tonski korigovane buke *PNLT* za isti prelet. Sa grafika na sl.3

se vidi da je maksimalna vrednost  $PNLT=87.0$  PNdB na 26.5 sec, kao i da su vremena dostizanja nivoa  $PNLT_{max}-10$  TPNdB i  $PNLT_{max}+10$  TPNdB 17sec i 39 sec, respektivno.



sl.2. Nivoi zvučnog pritiska po tercama za prelet



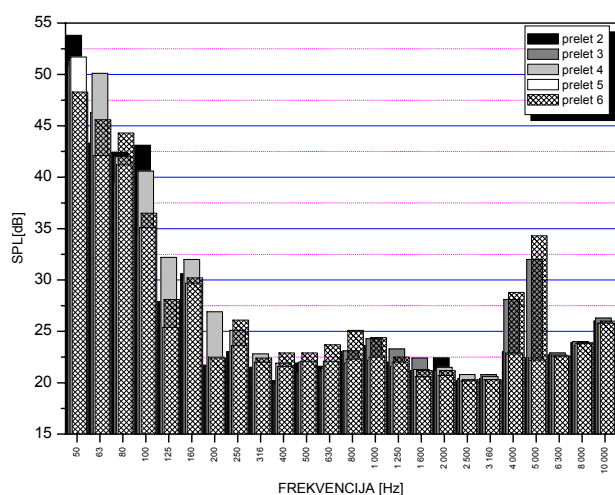
sl.3 Nivo tonski korigovane percipirane buke za prelet

Na sl.4 su prikazani nivoi šuma ambijenta za prelete, a na sl.5 nivoi električnog šuma magnetofona sa otvorenim ulazom i magnetofona sa mikrofonskim predpojačavačem. Teoretski, šum mikrofonске kاپisle raste sa porastom frekvencije, čime bi se nivoi instrumentacionog šuma malo povećali na visokim frekvencijama.

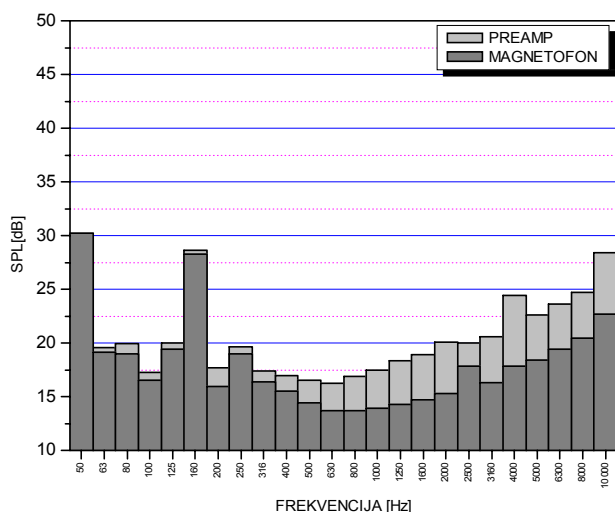
Upoređivanjem nivoa po tercama se može videti da je ambijentalna buka iznad nivoa šuma instrumentacije na niskim frekvencijama i na 4kHz i 5Khz. Povećanje nivoa buke na niskim frekvencijama potiče od kompresorskog agregata instaliranog na preko 400 m rastojanja od merne tačke, a buka u tercama na 4kHz i 5kHz potiče od cvrčaka u neposrednoj okolini mikrofona. Kako je u vreme merenja bila sezona poljskih radova, traktori na okolnim poljima, mada veoma udaljeni su sigurno imali udela u niskofrekvencijskom delu spektra.

Na osnovu dobijenih vrednosti za nivo buke aviona  $SPL(i,k)$  i ambijentalni šum, izvršen je proračun efektivne vrednosti percipiranog nivoa buke – *EPNL*. Proračun

korekcije putanje i svodenje merenja na referentne uslove je detaljnije opisano u radu [5].



sl.4 Nivoi ambijentalne buke u toku merenja



sl 5. Nivoi elektronskog šuma

Naše iskustvo sa merenja buke aviona G2A pokazuje da standard ICAO Annex 16 veoma kompleksno postavlja zahteve i merne procedure i korišćene merne opreme. Pri merenju na otvorenom prostoru je teško ostvariti gotovo idealne uslove koji se standardom zahtevaju, zbog uticaja neželjenih izvora buke: mašina koje je nemoguće eliminisati, životinja, vetra itd. Iako je prilikom merenja i obrade korišćena vrhunska profesionalna oprema sa veoma malim sopstvenim šumom, pokazalo se da su zahtevi standarda takvi da ih je veoma teško zadovoljiti. Odnos nivoa ambijentalne buke i buke aviona je različit za razne tipove aviona, kao i za različita merna mesta za isti avion, u zavisnosti je od rastojanja merne tačke kao i od opterećenja motora aviona. Klipnoelisne pogonske grupe daju buku u nižem delu spektra, dok je buka mlaznih motora pomerena ka višim frekvencijama. U radu je prezentirano merenje preleta aviona preko merne tačke (merna tačka 2), kada je avionska buka manja nego u poletanju (merna tačka 1), pa je samim tim i ambijentalni šum izraženiji.

## 5. ZAKLJUČAK

Međunarodni standardi ograničavaju nivo buke vazduhoplova u cilju zaštite životne okoline, što je naročito kritično u naseljima u okolini aerodroma, zbog čega je neophodno poznavanje buke svakog tipa vazuhoplova. Merenje buke vazduhoplova i obrada izmerenih veličina u skladu sa standardom ICAO Annex 16 je veoma kompleksna procedura. Naše iskustvo sa merenja buke aviona G2A pokazuje veoma precizne zahteve standarda u pogledu procedure leta, postavljanja mernih tačaka, ambijentalnih uslova, merne procedure i zahtevanih karakteristika merne opreme, kao i načina merenja putanje i sinhronizacije merenja putanje i zapisa merenja zvučnog pritiska. U radu je posebno istaknut problem ambijentalne buke. Zahtev standarda za razliku od 20 PNdB između percipiranog nivoa buke i ambijentalne buke je lakše ispuniti nego drugi uslov, da nivo buke aviona bude za 3 dB iznad ambijentalne buke u svakoj terci (od  $t_1$  do  $t_2$ ). Ovaj drugi uslov zahteva dodatnu analizu u tercama u kojima nivo avionske buke najčešće neznatno utiče na krajnji rezultat.

**NAPOMENA:** Projekat izveden uz pomoć Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj republike Srbije broj: MIS.3.06.0223.B

## LITERATURA

- [1] D. Radović, G. Jurin, Z. Filipović, "Metodologija određivanja spoljašnje buke mlaznih aviona", XLV Konferencija za ETRAN, Bukovička Banja, Sveska II, str. 311-313, jun 2001. god.
- [2] ICAO Annex 16, Environmental Protection, Volume I - Aircraft Noise, Thrid Edition, 1993.
- [3] FAR, Part 36 - Noise Standards: Aircraft Type and Airworthiness Certification, 1999.
- [4] J.R. Hassall, K. Zaveri, *Acoustic Noise Measurements*, 1979
- [5] Vladimir Zeljković, Vojkan Bošković, Gordana Jurin, Postupak korekcije izmerenog nivoa avionske buke kada uslovi merenja i referentni uslovi nisu identični, Konferencija za ETRAN, Teslić, jun 2002. god.
- [6] V. Zeljković, M. Vojnović, M.Mijić, N. Zeljković Vazduhoplovni propisi za buku-merenje buke aviona UTVA-75, *Vazduhoplovstvo '97*, Beograd, 1997

**Abstract** – This paper presents the procedure for aircraft noise measurement in accordance with international standard ICAO Annex 16, related to measurement and calculation of acoustic parameters: aircraft noise and ambient noise. In the example, the measurement of G2A aircraft noise during the flyover noise measurement point, and ambient noise are presented.

## MEASUREMENT OF AIRCRAFT NOISE ACCORDING TO ICAO ANNEX 16

Vojkan Bošković, Vladimir Zeljković, Gordana Jurin