

## POSTUPAK KOREKCIJE IZMERENOG NIVOA AVIONSKE BUKE KADA USLOVI MERENJA I REFERENTNI USLOVI NISU IDENTIČNI

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

**Sadržaj** - Rad pokazuje jedan segment merenja buke aviona prema međunarodnom standardu ICAO Annex 16 vezan za korekciju efektivnog percipiranog nivoa buke u odnosu na merenu i referentnu putanju, brzinu aviona i atmosferske uslove u vreme merenja. Poseban problem čini metodologija sinhronizacije zapisa signala buke i putanje aviona, kao i određivanje korekcionih faktora u odnosu na putanju i pravac prostiranja zvuka. Kao primer, prikazani su rezultati merenja buke i korekcionni faktori  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$  za domaći avion G-2A u toku jednog preleta mernog mesta.

### 1. UVOD

Buka vazduhoplova postaje sve izraženija u okolini aerodroma, posebno kad se ima u vidu veoma velika frekvencija saobraćaja [1]. Međunarodni standardi ICAO Annex 16 [2] i FAR [3] ograničavaju nivo buke, pri čemu su granice različite za određene kategorije aviona. Za svaki avion se vrši merenje i sertifikacija aviona u odnosu na zahteve buke.

Standard ICAO Annex 16 [2] propisuje proceduru leta aviona, uslove merenja, karakteristike merne opreme, i postupak analize rezultata. Pri analizi rezultata uzimaju se u obzir različiti uticaji, kao što je nivo ambijentalnog šuma, uslovi atmosfere, putanja i brzina aviona, režim rada motora, masa aviona. Standard propisuje relacije za određivanje korekcionih faktora svakog uticajnog člana. Sem toga, zahteva se merenje buke u tri tačke (bočno od piste na 450 m pri poletanju, prelet preko tačke na 6.5 km od početka piste, i prelet preko tačke pri sletanju aviona), a u svakoj tački minimum šest merenja sa statističkom analizom rezultata. Svi ovi zahtevi čine postupak merenja i analize rezultata buke aviona veoma složenim uz precizno definisanje svakog elementa.



Sl.1. Avion G-2A

U ovom radu je izložen samo deo koji se odnosi na merenje i korekciju rezultata vezanih za putanju aviona u prostoru. Kao ilustracija, pokazan je način merenja putanje aviona sa mlaznim motorom G-2A (Sl. 1) i analiza rezultata.

Pokazani su zahtevi standarda ICAO, način određivanja korekcionih faktora u odnosu na putanju i atmosferske uslove kao i dobijeni rezultati za jedan prelet merne tačke.

### 2. OPIS POSTUPKA KOREKCIJE

Poznato je da nivo slabljenja zvuka pri prostiranju kroz atmosferu zavisi od mnogobrojnih faktora od kojih su najznačajniji: udaljenost izvora, stanje atmosfere, karakteristike podloge, frekvencijski spektar zvuka.

Iz navedenih razloga standardom su definisani referentni uslovi i uslovi u vreme merenja, kao i način korekcije izmerenog nivoa buke, kada uslovi merenja nisu identični referentnim u pogledu stanja atmosfere, putanje leta, relativne brzine u odnosu na merno mesto i parametara motora kao generatora buke. Efekat navedenih odstupanja direktno se odražava na stepen slabljenja i period trajanja buke.

Korekciji se pristupa nakon obrade zapisa signala buke i proračuna efektivnog percipiranog nivoa (Effective Perceived Noise Level - *EPNL*) koji se izražava u *EPNdB* i određivanja vremenskog intervala u kome je buka maksimalna [2], da bi se kao konačan rezultat merenja dobila vrednost koja važi u referentnim uslovima.

Izračunati korekcionni faktori algebarski se sabiraju sa *EPNL* vrednošću, izračunatom na osnovu izmerenih podataka, prema relaciji (1).

$$EPNLr = EPNL + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \quad (1)$$

gde je:

*EPNLr* - efektivni percipirani nivo buke u referentnim uslovima

*EPNL* - efektivni percipirani nivo buke u uslovima merenja

$\Delta_1$  - korekcionni faktor za meteo uslove

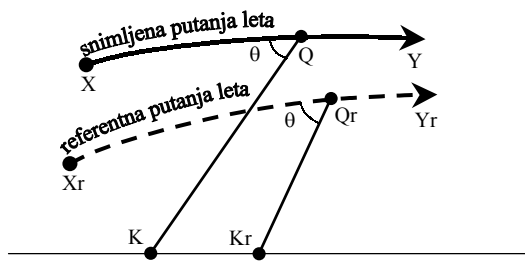
$\Delta_2$  - korekcionni faktor za period trajanja pojave

$\Delta_3$  - korekcionni faktor za motor kao izvor buke

Ovaj postupak se primenjuje za svako pojedinačno merenje.

Za određivanje vrednosti  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$ , potrebno je odrediti rastojanje između izvora i tačke prijema u momentu detekcije maksimalne buke, i to i u uslovima merenja i referentnim uslovima.

Na Sl. 2 je dat šematski prikaz snimljene i referentne putanje leta, kao i položaj aviona (Q) u odnosu na merno mesto (K) u vreme kada je buka maksimalna, za tačku preleta. Udaljenosti  $QK$  i  $QrKr$  predstavljaju propagacione puteve zvučnih talasa u uslovima merenja i referentnim uslovima, respektivno. Kod proračuna ovih udaljenosti, polazi se od pretpostavke da  $QK$  i  $QrKr$  formiraju iste uglove sa respektivnim putanjama leta, ugao  $\theta$ .



sl. 2 Šematski prikaz snimljene i referentne putanje leta i položaj aviona u odnosu na merno mesto u vreme kada je buka maksimalna, za tačku preleta

Korekcionim faktorom  $\Delta_1$  obuhvaćen je uticaj atmosferskih uslova i odstupanje putanje leta od referentne putanje. Navedena korekcija se primenjuje na vrednosti nivoa zvučnog pritiska -  $SPL(i)$  u svim tercama u opsegu od 40 Hz do 12.5 KHz i to samo u trenutku detekcije maksimalne buke (maksimum tonski korigovane vrednosti percipiranog nivoa buke -  $PNLTM$ ). Korekcija se ne primenjuje na vrednosti  $SPL(i)=0$ , i uzima se da je i korigovana vrednost  $SPL(i)_c=0$ .

Korekcija navedenih  $SPL(i)$  vrednosti se vrši prema relaciji (2). Drugi član ove relacije se odnosi na efekat promene koeficijenta atmosferskog slabljenja, treći na efekat promene dužine propagacionog puta i četvrti na zakonitost da je nivo buke obrnuto srazmeran kvadratu rastojanja.:

$$SPL(i)_c = SPL(i) + 0.01 \cdot [\alpha(i) - \alpha(i)_0] \cdot QK + 0.01 \cdot \alpha(i)_0 \cdot (QK - QrKr) + 20 \cdot \log\left(\frac{QK}{QrKr}\right) \quad (2)$$

gde je:

$i$  - redni broj terce

$SPL(i)_c$  - korigovani nivo zvučnog pritiska

$SPL(i)$  - izmereni nivo zvučnog pritiska

$\alpha(i)$  - koeficijent atmosferskog slabljenja u uslovima merenja u dB/100m

$\alpha(i)_0$  - koeficijent atmosferskog slabljenja u referentnim uslovima u dB/100m

$QK(m)$  - udaljenost aviona od merne tačke

$QrKr(m)$  - referentna udaljenost aviona od merne tačke

Koeficijenti atmosferskog slabljenja  $\alpha(i)$  i  $\alpha(i)_0$  se izračunavaju za svaku pojedinačnu tercu na osnovu relacija (3) i (4) i podataka datih u [2], pri čemu se za ulazne podatke uzimaju temperatura ( $\theta$ ) izražena u  $^{\circ}C$  i relativna vlažnost vazduha ( $H$ ) u procentima u vreme merenja i referentnim uslovima, respektivno.

$$\alpha(i) = 10^{-\left[2.05 \log\left(\frac{f_0}{1000}\right) + 1.1394 \cdot 10^{-3} \cdot \theta - 1.916984\right] + \eta(\delta) \cdot 10^{\left[\log(f_0) + 8.42994 \cdot 10^{-3} \cdot \theta - 2.755624\right]}} \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1010}{f_0}} \cdot 10^{(\log H - 1.328924 + 3.179768 \cdot 10^{-2} \cdot \theta)} \times 10^{(-2.173716 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 + 1.7496 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3)} \quad (4)$$

Nakon izvršene korekcije  $SPL(i)$  vrednosti, pristupa se ponovnom proračunu maksimalne buke ( $PNLTr$ ) i to sa novim korigovanim vrednostima  $SPL(i)_c$ . Razlika nivoa  $PNLTr$  i  $PNLTM$  predstavlja vrednost korekcionog faktora  $\Delta_1$  u (1):

$$\Delta_1 = PNLTr - PNLTM \quad (5)$$

Ukoliko postoji više pikova čiji se nivoi razlikuju do 2 dB od  $PNLTM$  u periodu kada je nivo buke 10 dB ispod maksimuma ( $PNLTr \geq PNLTM - 10dB$ ), tada se korekcija primenjuje i na  $SPL(i)$  vrednosti i u tim pikovima. Za korekciju  $EPNL$  se uzima maksimalna dobijena vrednost za faktor  $\Delta_1$ .

Korekcionni faktor  $EPNL$  za period trajanja pojave ( $\Delta_2$ ) se izračunava ukoliko se putanja leta i putna brzina (*ground velocity*) razlikuju od referentnih podataka. Proračun se vrši samo za podatke u tački maksimuma, tj. kada je ostvaren  $PNLTM$  nivo, prema relaciji:

$$\Delta_2 = -7.5 \cdot \log(QK / QrKr) + 10 \cdot \log(V / Vr) \quad (6)$$

gde je:

$V$  (km/h) - putna brzina aviona u vreme merenja

$Vr$  (km/h) - putna brzina aviona u referentnim uslovima

Korekcionim faktorom  $\Delta_3$  obuhvaćen je uticaj emisijonog parametra motorske buke  $\mu$ , kao i svih relevantnih parametara (masa aviona, brzina i visina, spoljna temperatura) koji imaju uticaja na motor kao izvor buke, ukoliko značajno odstupaju od referentnih vrednosti. Dozvoljeni premašaj brzine je do 28 km/h, a za masu 1 EPNdB na poletanju i 2 EPNdB na sletanju, maksimalno.

Korekcija  $EPNL$  za masu se izračunava na osnovu relacija i podataka datih u [2], pri čemu izbor relacije zavisi od broja ugrađenih motora i mase aviona za koju se traži sertifikat za buku. Korekcija se ne primenjuje na avione čija je masa manja od 35000 kg.

### 3. MERENJE

Buka aviona G-2A je snimana u toku standardizovane procedure poletanja i to u laterarnoj tački - 450 m bočno od linije poletanja i u toku preleta iste, i to u penjanju sa parametrima koji odgovaraju poziciji aviona na odstojanju 6.5 km od praga piste, u standardnom poletanju-penjanju. Spajanje dva merna mesta u jedno je urađeno iz organizacionih razloga. Merenja su realizovana u vreme kada u zoni ispitivanja nije bilo letenja, niti pokretanja motora vazduhoplova, tako da ni jedan neželjeni izvor zvuka nije uticao na kvalitet snimka buke.

Za potrebe ovog merenja korišćena je oprema firme Bruel & Kjaer: mikrofoni tip 4134 sa štitnikom od vetra tip UA0237, mikrofonski pretpojačavač tip 2639, fleksibilni mikrofonski adapter tip UA0196, stalak za mikrofoni, tip UA0026. Buka i ambijentalni šum su snimani analognim instrumentacionim magnetofonom NAGRA NTI-A4. AD konverzija i analiza je rađena sa profesionalnom računarskom opremom i softverom Sound Quality verzija 3.1.1 (Structural Dynamics Research Corporation, USA).

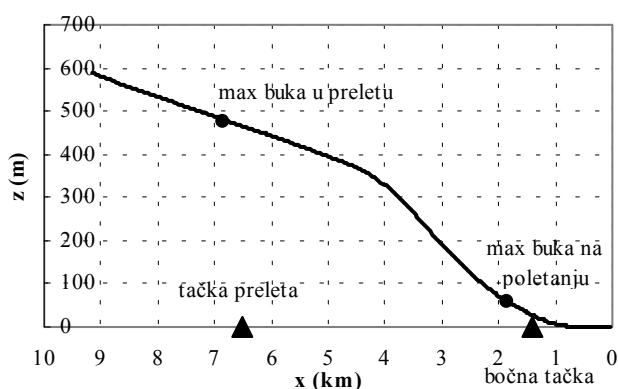
Prema zahtevima standarda [2], pored buke i ambijentalnog šuma snimana je i putanja aviona sa optoteodolitskim sistemom "SKYTRACK", firme Contraves iz Švajcarske [4]. Navedeni sistem čine 2 teodolitske stanice

koje su postavljene na uređenim i pripremljenim stajnim tačkama, na međusobnom rastojanju od 2 km i bočno 870 m od linije poletanja. Postupak merenja se zasniva na merenju uglova azimuta i elevacije praćenog objekta, odnosno geometrijskih osa objektiva teodolita i izračunavanju koordinata, rešavanjem mreže trouglova metodom triangulacije. Ovaj postupak zahteva sinhronizovani rad teodolitskih stanica. Za obradu snimljenih podataka se koristi profesionalna studijska oprema i specijalizovani softverski paketi. Rezultat merenja i obrade su prostorne koordinate aviona u lokalnom koordinatnom sistemu i njegove brzine na putanji, u realnom vremenu, sa željenim korakom obrade, u ovom slučaju 0.5 s. Nula navedenog koordinatnog sistema je sredina praga piste, X-osa je osa piste, Y-osa je orjentisana u azimutu  $40^\circ$  a Z-osa na gore.

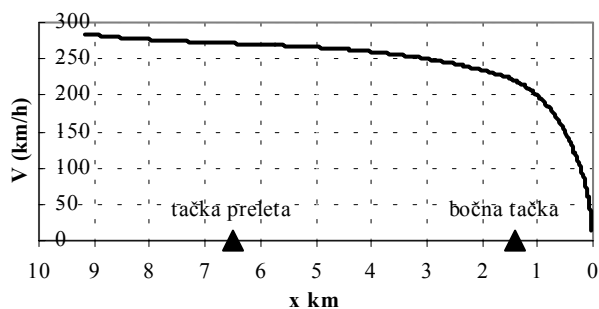
Meteorološki podaci u vreme merenja, pritisak, temperatura, relativna vlažnost i podaci za vetar, mereni 10m iznad tla u neposrednoj blizini merne tačke, preuzeti su od aerodromske meteo službe.

Snimanje avionske buke sinhronizovano je sa snimanjem putanje leta.

Pre pristupanja navedenom merenju proračunati su parametri leta na osnovu podataka datih u [2] i uputstvu za upravljanje avionom. Nakon ovog, teodolitskim sistemom je snimljena putanja aviona. Dobijeni podaci računskim putem su svedeni na uslove standardne atmosfere koja podrazumeva atmosferu bez slabljenja: pritisak na nivou mora 1013.25 mbar, temperatura  $25^\circ\text{C}$ , relativna vlažnost 70 % i vetar 0 m/s. Navedene uslove standard propisuje kao referentne atmosferske uslove. Na ovaj način su dobijene prostorne koordinate referentne putanje leta i referentni parametri leta (visina i putna brzina) sa propisanim korakom 0.5 s, Sl. 3.



a) putanja u ravni XZ



b) brzina

Sl.3. Referentna putanja i brzina aviona G-2A u preletu,

#### 4. REZULTATI MERENJA - KOREKCIONI FAKTORI $\Delta_1$ i $\Delta_2$ ZA AVION G 2A

U radu su prezentirani podaci za korekzione faktore  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$ , koji su dobijeni u prvom letu G-2A pri preletu mernog mesta.

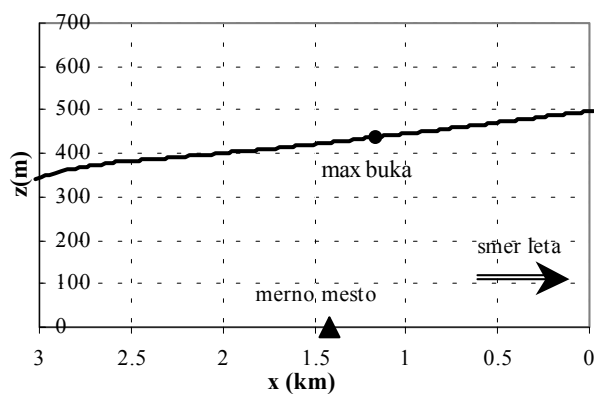
Za određivanje korekcija  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$ , sem podataka o temperaturi i relativnoj vlažnosti vazduha u vreme merenja, potrebno je prethodno odrediti maksimalni nivo buke, geometrijske veličine  $QK$  (za merenu putanju aviona),  $QrKr$  (za referentnu putanju), prostorne uglove prostiranja zvuka u tačkama maksimalne buke, kao i brzine aviona na referentnoj i merenoj putanji,  $Vr$  i  $V$ . Potrebne geometrijske veličine su određivane korišćenjem razvijenog softverskog programa sa relacijama iz standarda i ulaznim podacima iz teodolitskog sistema.

Merena putanja aviona G-2A i putna brzina, prikazane su na Sl. 4.

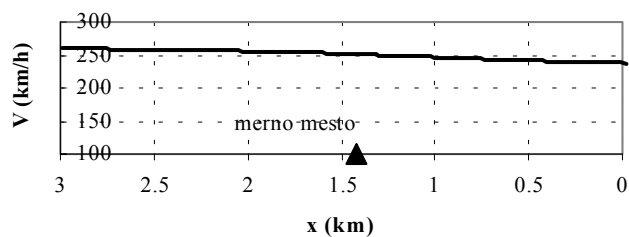
Rezultat merenja i obrade signala buke i putanje su maksimalni nivo buke (PNLTM) koji iznosi 87.8 EPNdB i podaci za poziciju aviona u tom trenutku. Koordinate aviona u navedenom lokalnom koordinatnom sistemu i njegove brzine na referentnoj i merenoj putanji u trenutku detekcije maksimalne buke su:

$Qrx=1095\text{m}$ ;  $Qry=-444\text{ m}$ ;  $Qrz= 479.7\text{ m}$ ;  $Vr=272.3\text{ km/h}$   
 $Qx=1168.7\text{ m}$ ;  $Qy=-308.4\text{ m}$ ;  $Qz= 436.9\text{ m}$ ;  $V=248.5\text{ km/h}$

Izračunate vrednosti za udaljenost aviona od mernog mesta u uslovima merenja i referentnim uslovima iznose:  $QK=522.8\text{ m}$  i  $QrKr=569.5\text{ m}$ . Atmosferski uslovi pri merenju buke su bili: temperatura  $\theta=33^\circ\text{C}$  i relativna vlažnost  $H=36\%$ , uz napomenu da je prosečna brzina vetra iznosila 1m/s.



a) putanja u ravni XY



b) brzina

Sl.4. Merena putanja i brzina aviona G 2A u 1. preletu

Na bazi prethodnih vrednosti, prema relaciji (2) su korigovane vrednosti merenog nivoa zvučnog pritiska  $SPL(i)$

za svaku tercu, u intervalu kada je detektovana maksimalna buka, tabela 1.

Na osnovu merenih i korigovanih vrednosti  $SPL(i)$ , i dobijenih podataka za nivo maksimalne buke u uslovima merenja -  $PNLTM$  i referentnim uslovima -  $PNLTr$ , određen je faktor  $\Delta_1$ :

$$\Delta_1 = PNLTr - PNLTM = 87.3 - 87.8 = -0.5 \text{ EPNdB}$$

Tabela 1. Merene i korigovane vrednosti nivoa zvučnog pritiska u preletu br.1 aviona G-2A

red. br. terce	SPL - mereno (dB)	SPL - korigovano (dB)
1	59.0998	58.8562
2	60.7986	60.6064
3	65.8866	65.7617
4	67.4368	66.7676
5	68.0396	67.4695
6	67.8963	67.4651
7	68.2582	67.9859
8	69.8972	69.8240
9	70.2642	69.8269
10	73.8194	73.7223
11	77.5650	77.2461
12	79.7222	79.3045
13	82.3112	81.9603
14	81.5696	81.4135
15	79.3760	79.6287
16	75.6017	75.4472
17	78.7255	79.0220
18	73.9398	74.5276
19	69.9844	70.9546
20	64.9622	66.1825
21	58.8695	60.3232
22	49.4948	53.2767
23	38.8536	44.5673
24	32.4522	33.6793

Faktor korekcije  $\Delta_2$  je određen prema relaciji (6), na osnovu podataka za brzine  $V$  i  $Vr$  u tački maksimuma, kao i rastojanja  $QK$  i  $QrKr$  i iznosi 0.05 EPNdB.

Uzimajući u obzir navedene korekcije, dolazi se do efektivne vrednosti percipiranog nivoa buke u referentnim uslovima koji iznosi 87.3 EPNdB za razmatrani prelet aviona G-2A iznad merne tačke na 6.5 km od početka piste. Prema međunarodnom standardu ICAO Annex 16 za jednomotorne dozvučne mlazne avione mase do 35000 kg, maksimalno dozvoljeni nivo buke u navedenoj tački je 89 EPNdB. Navedeni zahtev se odnosi na srednju vrednost od minimalno šest merenja.

## 5. ZAKLJUČAK

Primena međunarodnih standarda za ograničenje nivoa buke vazduhoplova jeste obaveza u svetu, pa će primena ovih standarda kod nas takođe biti obavezujuća.

U radu je izložen deo rezultata dobijen pri merenju buke aviona G-2A (merenje buke aviona G-2A je kompletno urađeno) prema međunarodnom standardu ICAO Annex 16. Posebno je opisan deo opreme za precizno merenje putanje i način određivanja korekcionih faktora u zavisnosti od razlike realno merene i referentne putanje aviona. Za navedeno merenje ovaj doprinos iznosi -0.45 EPNdB. Ove korekcije su obavezne i mogu biti odlučujuće pri izdavanju sertifikata za buku.

Iako su metodologija i procedure veoma složeni, pokazuje se da kod nas postoji raspoloživa merna oprema, da se može sprovesti zahtevana procedura leta, obezbediti zapisi buke aviona i putanje aviona, kao i njihova kompletna obrada i analiza. Ovo otvara mogućnost šire primene ovog standarda kod nas u cilju zaštite okoline, posebno prostora oko aerodroma. Na ovom problemu svakako treba uključiti Savezno Ministarstvo za Saobraćaj, kao i sve domaće avio prevoznike.

## 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, Environmenta Protection, Volume I - Aircraft Noise, Thrid Edition, 1993.
- [3] FAR, Part 36 - Noise Standards: Aircraft Type and Airworthiness Certication, 1999.
- [4] P. Dobrota, D. Basarić- Savremeni optoteodolitski sistemi za trajektografska merenja i snimanja, Međunarodni naučno stručni skup Vazduhoplovstvo 93, Zbornik radova, str. A188-A200, Beograd 1993. god.

**Abstract** - This paper presents the aircraft noise measurement in accordance with ICAO Annex 16, particularly one part related to Effective Perceived Noise Level (EPNL) corrections, taking into account the difference between measured and reference path, velocity and ambient conditions. For those corrections, the synchronization in sound pressure and flight path records is necessary. The results of noise measurements for the domestic trainer aircraft G-2A are presented in a form of EPNL and correction factors  $\Delta_1$  and  $\Delta_2$  for one flyover measurement point.

## CORRECTIONS OF THE MEASURED AIRCRAFT NOISE VALUES WHEN TEST CONDITIONS ARE NOT IDENTICAL TO REFERENCE CONDITIONS

Vladimir Zeljković, Vojkan Bošković, Gordana Jurin