

Gordana Jurin,
dipl. inž.
Milorad Pavlović,
dipl. inž.
Vazduhoplovni opitni centar,
Beograd

ODREĐIVANJE BUKE RADI SERTIFIKACIJE MLAZNIH AVIONA

UDC: 534.6 : [621.45 : 623.746]

Rezime:

U radu su prikazane osnovne teorijske postavke i matematički modeli koji su značajni za obradu akustičkih i neakustičkih podataka u procesu određivanja buke mlaznih aviona prema međunarodnom standardu ICAO, Annex 16, za potrebe sertifikacije. Proces obuhvata i postupak eliminacije efekata ambijentalnog šuma iz signala avionske buke. Kao primer, data je praktična primena navedenog postupka na rezultate merenja za avion G-2A.

Ključne reči: mlazni avion, avionska buka, ambijentalni šum, metoda merenja, sertifikacija, primena.

PROCEDURES IN THE NOISE CERTIFICATION OF JET AIRCRAFT

Summary:

This paper presents a basic theoretical scheme and a mathematical model that is used to calculate jet aircraft noise level for certification purposes in accordance with the international standard ICAO Annex 16. In this process acoustic and nonacoustic data are used. The process also includes the procedure for eliminating ambient noise effects out of the aircraft noise signal. This procedure was applied in the case of noise measurement results for the G-2A jet aircraft.

Key words: jet aircraft, aircraft noise, ambient noise, noise measurement, certification, application.

Uvod

Porocedura za sertifikaciju svih vazduhoplova u civilnom saobraćaju po pitanju buke, kao uslov za izdavanje plovidbene dozvole, definisana je međunarodnim i nacionalnim standardima. Glavni međunarodni standard je ICAO, Annex 16, Volume I (International Civil Aviation Organization) čiji je potpisnik i naša zemlja, ponovo od 2001. godine. U ovom standardu date su metode merenja pri sertifikaciji vazduhoplova, dozvolje-

ne maksimalne vrednosti i preporuke za način kontrole nivoa buke u okolini aerodroma. Na osnovu ovih preporuka ažuriraju se svi standardi koji se bave ovom problematikom – JAR 36, FAR Part 36 i svi ostali nacionalni standardi.

Prema našim vazduhoplovnim propisima sertifikacija civilnih letelica koja se odnosi na nivo buke je obavezna, ali su merenja ovog tipa kod nas još uvek retka. Za rad je odabrana kompletna procedura merenja buke mlaznih aviona (kategorija Chapter 3) i rezultati merenja za

avion G-2A ostvareni sa PC kompatibilnim mernim sistemom nove generacije za merenje i obradu akustičkih signala

Određivanje nivoa buke mlaznih aviona

Deskriptori avionske buke

Krajem šezdesetih godina prošlog veka ICAO je kao standardnu mernu jedinicu za izražavanje nivoa avionske buke, tj. efektivnog nivoa percipirane buke (*Effective Perceived Noise Level – EPNL*), usvojio EPNdB. Ovaj nivo predstavlja meru subjektivnog doživljaja avionske buke u koji su, osim jačine, inkorporirani i bučnost, njeno iritirajuće dejstvo i vreme trajanja.

Nivo EPNL određuje se proračunom PNL (*Perceived Noise Level*, jedinica PN dB), PNLT (*Perceived Noise Level Tone-Corrected*, jedinica TPN dB) i perioda trajanja buke u toku preleta aviona. PNL uzima u obzir varijaciju čujnosti u funkciji frekvencije, PNLT doprinos tonova ili diskretnih frekvencija često prisutnih u ovako kompleksnom zvuku kao što je avionska buka, a EPNL i period trajanja buke.

Uslovi merenja i merenje

Za potrebe sertifikacije, buka mlaznih aviona se meri u toku faze poletanja

i sletanja, na tri lokacije u okolini aerodroma, sl. 1. Razmeštaj ovih tačaka je sledeći:

– lateralna tačka u fazi poletanja (K1): 450 m bočno od linije poletanja, na poziciji gde je buka maksimalna. Ova tačka se određuje serijom probnih merenja na raznim pozicijama duž merne linije;

– tačka preleta u fazi poletanja (K2): nalazi se na produženoj osi piste na 6,5 km od polazne tačke na pisti;

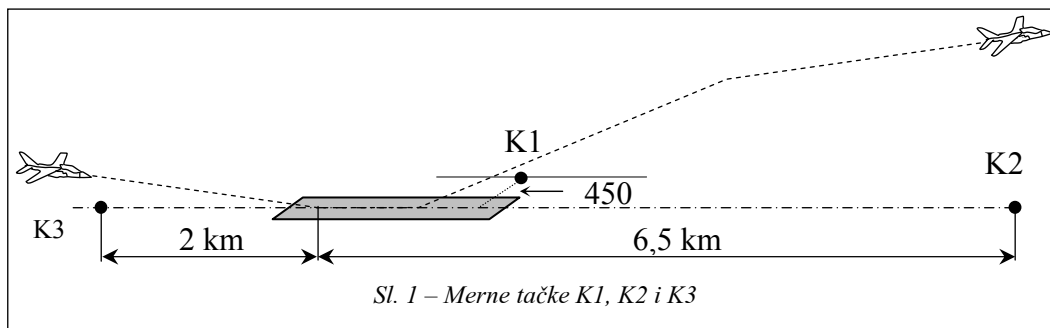
– tačka preleta u fazi sletanja (K3): nalazi se na produženoj osi piste na 2 km od praga piste.

Poletanje se vrši punom snagom motora, a nakon odvajanja aviona od piste prelazi se u penjanje sa konstantnim uglom i brzinom. Po dostizanju visine od 300 m, snaga motora se smanjuje na onu koja obezbeđuje gradijent ugla penjanja od 4%, uz održavanje konstantne brzine. U toku ovog leta konfiguracija aviona se ne menja i jedino je dozvoljeno uvlačenje stajnog trapa.

Sletanje se vrši po standardnoj ILS proceduri. Prelet merne tačke K3 vrši se na visini 120 m, a ugao prilaza je 3° sa dozvoljenim odstupanjem od $\pm 0,5^\circ$.

Merenje zahteva opsežnu pripremu koja obuhvata:

– proračun dozvoljenih maksimalnih vrednosti nivoa buke za sve tri tačke



na osnovu relacija datih u standardu i podataka za masu i broj ugrađenih motora na avionu;

– proračun putanje i parametara leta za referentne i uslove merenja, na osnovu podataka datih u standardu i uputu za avion;

– pronalaženje tačne pozicije lateralne tačke K1;

– određivanje mase i centra mase aviona.

Na navedenim mernim mestima pre i nakon snimanja avionske buke obavezno se snima i ambijentalni šum u trajanju od minimalno 10 sekundi koji se kasnije obrađuje na isti način kao i avionska buka. Pored snimanja akustičkih signala, snimaju se i parametri leta (visina, putna brzina, instrumentalna brzina, snaga na poletanju i pri preletu mernog mesta), putanja leta (X, Y, Z koordinate) i meteorološki podaci u vreme merenja (pritisak, temperatura, relativna vlažnost, brzina i smer vetra). Snimanje svih navedenih grupa podataka je istovremeno, sem meteoroloških za koje se uzimaju petnaestominutne srednje vrednosti.

Merenja se vrše u uslovima bez padavina i temperaturnih inverzija, kada je u prostoru između merne tačke i izvora zvuka temperatura u granicama -10°C do 35°C , a relativna vlažnost 20% do 95%. Dozvoljena prosečna brzina vetra je 5 m/s maksimalno, a bočna komponenta 3 m/s, mereno na visini 10 m iznad tla. Dozvoljeno atmosfersko slabljenje je 12 dB/100 m maksimalno, na frekvenciji 8 kHz. Razlika nivoa avionske buke i ambijentalnog šuma mora da bude veća od 20 PNdB, a u svim posmatranim tercima ne manja od 3 dB u periodu 10 dB ispod nivoa maksimalne buke.

Minimalan broj merenja je 6 za svaku mernu tačku, pri čemu rezultati moraju zadovoljiti statističke uslove. Dozvoljeno odstupanje je $\pm 1,5$ EPN dB za granicu poverenja 90%.

Tercna analiza akustičkih signala

Analiza signala buke i šuma ambijenta vrši se u vremenskom i frekvencijskom domenu.

Za svako merenje zapisi buke se filtriraju tercnim filtrima čije su centralne frekvencije od 50 Hz do 10 kHz, tj. u frekvencijskom opsegu 40 Hz do 11,2 kHz. Ovako filtrirani signali zatim se vode na detektor efektivne vrednosti sa dinamičkom karakteristikom „SLOW“ i linearnom frekvencijskom karakteristikom da bi se dobili signali nivoa zvučnog pritiska *SPL* u funkciji vremena. Zatim se pristupa analizi u vremenskom domenu radi dobijanja podataka o trenutnoj vrednosti *SPL* na svakih 0,5 s, i to za svaku pojedinačnu tercu.

Isti postupak obrade primenjuje se na vremenski zapis signala avionske buke i ambijentalnog šuma.

Proračun EPNL

Proračun nivoa *EPNL* vrši se po *simplified* ili *integrated* metodi. Po prvoj metodi, koja je u ovom radu prezentirana, normalizovanje na standardne operative i atmosferske uslove (referentni uslovi) vrši se samo u tački detekcije maksimalne buke, nivo *PNLTM*, a po drugoj u svim vremenskim intervalima izračunatog nivoa *PNLTK*.

Prvi korak u proračunu *EPNL* je konverzija dobijenih *SPL(i,k)* vrednosti u percipiranu bučnost – *n(i,k)* [noy] preko matematičkih relacija ili tabela datih u standardu. Za svaki vremenski snimak ove vrednosti se kombinuju za sve tercne opsege po formuli:

$$N(k) = n(k) + 0,15 \cdot \left[\sum_{i=1}^{24} n(i,k) - n(k) \right] \quad (1)$$

gde je:

i – redni broj frekvencijskog opsega (1, 2, ..., 24),

k – redni broj vremenskog intervala,

n(k) – maksimalna vrednost u *k*-tom vremenskom intervalu,

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

Ukupna percipirana bučnost *N(k)* zatim se konvertuje u nivo percipirane buke, *PNL(k)*, preko jednačine:

$$PNL(k) = 40,0 + \frac{10}{\log_{10} 2} \cdot \log_{10} N(k) \quad (2)$$

Za spektar avionske buke karakteristična je pojava spektralnih neregularnosti, odnosno izraženih diskretnih tonova čije prisustvo izaziva dodatnu subjektivnu smetnju. Uticaj ovih neregularnosti određuje se u procesu koji se naziva tonska korekcija. Njen koncept zasniva se na analizi nagiba amplituda između susednih terci u posmatranom spektru radi pronalaženja tona sa maksimalnom amplitudom. Identifikacija spektralnih neregularnosti je još jedna ekstremno kompleksna procedura, a dobijeni faktor tonske korekcije *C(k)* koji je frekvencijski zavisian dodaje se vrednosti *PNL(k)*, čime

se dobija tonski korigovani percipirani nivo buke *PNLT(k)* i izražava u TPNdB, relacija (3):

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

Tonska korekcija primenjuje se samo na tonske neregularnosti koje potiču od posmatranog izvora – aviona, pa se zbog toga vrše dodatna testiranja, koja obuhvataju identifikaciju izvora ovih neregularnosti i njihovu eliminaciju kada izvor nije avion.

U okviru procesa tonske korekcije proverava se i da li je identifikovani diskretni ton istovremeno prisutan u dva opsega. To se događa kada je frekvencija tona granična frekvencija dva opsega, usled čega se njegova energija proširuje na oba opsega, a posledica je prigušeni pik. Ova provera se primenjuje samo u intervalu u kojem je detektovana maksimalna buka, nivo *PNLTM*. Problem se rešava zamenom prvobitno izračunatog *C(k)* sa usrednjenom vrednošću za 5 uzastopnih intervala, dva pre i dva posle maksimuma.

Kako ukupan subjektivni osećaj jačine buke vazduhoplova zavisi ne samo od maksimalnog nivoa i spektralnog sastava, već i od njenog trajanja, uvodi se i uticaj vremena. Ukupni subjektivni osećaj jačine buke vazduhoplova označava se 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 intervalu $t_1 - t_2$ u kojem je nivo $PNLT(k) \geq PNLTM - 10$ dB.

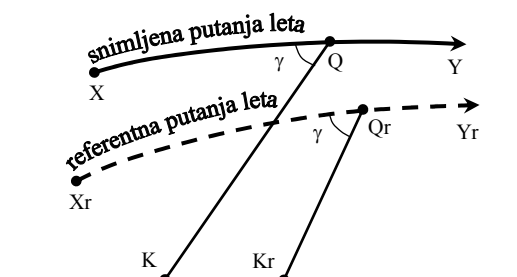
Najzad se, uz korišćenje podataka o temperaturi, vlažnosti, pritisku i ostalih

neakustičnih podataka, vezanih za putanju i parametre leta, izračunata vrednost *EPNL* normalizuje na standardne operativne i atmosfere uslove. Ovaj postupak naziva se korekcija.

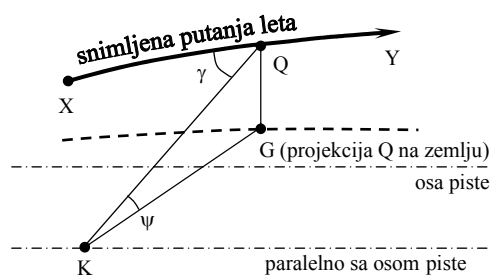
Korekcija

Nivo slabljenja zvuka pri prostiranju kroz atmosferu zavisi od mnogobrojnih faktora koji se različito odražavaju na njegov spektralni sadržaj. Među njima su najznačajniji udaljenost izvora, stanje atmosfere, karakteristike podloge. Iz navedenih razloga standardom su definisani referentni uslovi i uslovi merenja, kao i način korekcije izmerenog nivoa buke, kada navedeni uslovi nisu identični u pogledu stanja atmosfere, putanje leta, relativne brzine aviona u odnosu na merno mesto i parametara motora kao generatora buke. Efekat navedenih odstupanja direktno se odražava na stepen slabljenja i period trajanja buke.

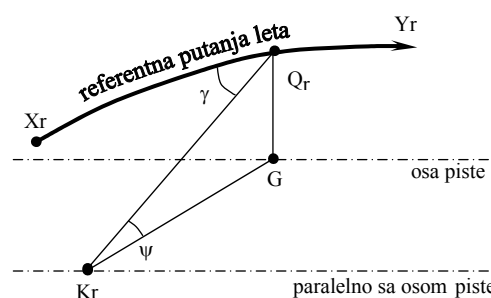
Korekciji se pristupa nakon obrade zapisa signala buke i proračuna *EPNL* u uslovima merenja. Postupak obuhvata izračunavanje korekcija koje se algebarski dodaju na *EPNL*, da bi se kao rezultat dobila vrednost *EPNL* u referentnim operativnim i atmosferskim uslovima, relacija (4):



Sl. 2 – Šematski prikaz putanja leta i pozicija aviona u trenutku detekcije maksimalne buke, za tačku K2 ili K3



a) putanja leta u uslovima merenja



b) referentna putanja leta

Sl. 3 – Šematski prikaz putanja leta i pozicija aviona u trenutku detekcije maksimalne buke za lateralnu tačku KI

$$EPNLr = EPNL + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \quad (5)$$

gde je:

EPNLr – nivo buke u referentnim uslovima,

EPNL – nivo buke u uslovima merenja,

Δ_1 – korekcija za meteorološke i propagacione uslove,

Δ_2 – korekcija za period trajanja pojave,

Δ_3 – korekcija za motor kao izvor buke.

Ovaj postupak se primenjuje za svako pojedinačno merenje.

Za proračun korekcija Δ_1 i Δ_2 potrebno je prethodno odrediti udaljenost izvora od tačke prijema u momentu detekcije maksimalne buke, i u uslovima merenja i referentnim uslovima. Na sl. 2 i sl. 3 dat je šematski prikaz snimljene i referentne putanje leta, kao i položaj avi-

ona (Q) u odnosu na merno mesto (K) u vreme kada je buka maksimalna, za tačku preleta K2 ili K3 i lateralnu tačku K1, respektivno. 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 putanjama leta, ugao γ . To važi za sva merna mesta, dok se u slučaju lateralnog merenja buke uzima da QK i $QrKr$ formiraju i iste uglove sa površinom zemlje – ψ .

Korekcijom Δ_1 obuhvaćen je uticaj atmosferskih uslova i putanje leta, tj. njihova odstupanja od referentnih uslova. Navedena korekcija se primenjuje na vrednosti nivoa zvučnog pritiska – $SPL(i)$ u svim tercama u opsegu od 40 Hz do 12,5 kHz u intervalu u kome je detektovana maksimalna buka, nivo $PNLTM$. Proračun se vrši prema relaciji (5). Drugi član ove relacije odnosi se na efekat promene koeficijenta atmosferskog slabljenja, treći na uticaj standardnog atmosferskog slabljenja na promenu dužine propagacionog puta i četvrti na zakonitost da je nivo buke obrnuto srazmeran kvadratu rastojanja.

$$SPL(i)_C = SPL(i) + 0,01 \cdot [\alpha(i) - \alpha(i)_0] \cdot QK + 0,01 \cdot \alpha(i)_0 \cdot (QK - QrKr) + 20 \cdot \log \left(\frac{QK}{QrKr} \right) \quad (6)$$

gde je:

i – redni broj terce,

$SPL(i)_C$ – korigovani nivo zvučnog pritiska,

$SPL(i)$ – izmereni nivo zvučnog pritiska,

$\alpha(i)$, $\alpha(i)_0$ – koeficijent atmosferskog slabljenja u uslovima merenja i referentnim, respektivno, u dB/100m,

QK , $QrKr$ – udaljenost avion – mikrofona u uslovima merenja i referentnim, respektivno, u metrima.

Koeficijenti atmosferskog slabljenja $\alpha(i)$ i $\alpha(i)_0$ izračunavaju se za svaku pojedinačnu tercu na osnovu relacija (7) i (8) i podataka datih u standardu, pri čemu se za ulazne podatke uzimaju temperatura (θ) izražena u °C i relativna vlažnost vazduha (h) u procentima u vreme merenja i referentnim uslovima, respektivno.

$$\alpha(i) = 10^{\left[2,05 \log \left(\frac{f_0}{1000} \right) + 1,1394 \cdot 10^{-3} \cdot \theta - 1,916984 \right]} + \eta(\delta) \cdot 10^{\left[\log(f_0) + 8,42994 \cdot 10^{-3} \cdot \theta - 2,755624 \right]} \quad (7)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1010}{f_0}} \cdot 10^{\left(\log h - 1,328924 + 3,179768 \cdot 10^{-2} \cdot \theta \right)} \times 10^{\left(-2,173716 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 + 1,7496 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3 \right)} \quad (8)$$

Nakon izvršene korekcije ponovo se izračunava nivo maksimalne buke ($PNLTr$) sa novim korigovanim vrednostima $SPL(i)_C$. Razlika nivoa $PNLTr$ i $PNLTM$ predstavlja vrednost korekcije Δ_1 u (4):

$$\Delta_1 = PNLTr - PNLTM \quad (9)$$

Pri primeni ove metode (simplified), da bi se izbegle moguće greške u određivanju $EPNL$ nivoa u referentnim uslovima, primenjuju se i dodatne Δ_1 korekcije na sve pikove nivoa $PNLTM$ – 2 dB u intervalu $PNLTM$ – 10 dB. U svim ovim pikovima vrši se korekcija $SPL(i, k_{pik})$, nakon čega se izračunavaju

$PNLTr(k_{pik})$ vrednosti. Ukoliko je korigovani $PNLTr(k_{pik})$ veći od korigovanog $PNLTr$ u maksimumu, tada se ta razlika dodaje izmerenom nivou $EPNL$. Kada ima više pikova uzima se maksimalna razlika.

Iznos Δ_2 predstavlja korekciju za razliku u dužini trajanja pojave u uslovima merenja i referentnim uslovima, što je posledica odstupanja putanje leta i putne brzine od referentnih vrednosti. Proračun se vrši samo za podatke u tački maksimuma, tj. kada je ostvaren $PNLTM$ nivo, prema relaciji:

$$\Delta_2 = -7,5 \cdot \log(QK/QrKr) + 10 \cdot \log(V/Vr) \quad (10)$$

gde je:

V (km/h) – putna brzina aviona u vreme merenja,

Vr (km/h) – putna brzina aviona u referentnim uslovima.

Korekcija Δ_3 obuhvata uticaj emisisonog parametra motorske buke μ , kao i svih relevantnih parametara (masa aviona, brzina i visina, spoljna temperatura) koji utiču na motor kao izvor buke, ukoliko znatno odstupaju od referentnih vrednosti. Maksimalno dozvoljena odstupanja su: 28 km/h za brzinu, 1 EPNdB za masu na poletanju i 2 EPNdB za masu na sletanju.

Eliminacija efekata ambijentalnog šuma

Podaci o nivou ambijentalnog šuma u vreme merenja avionske buke izuzetno su značajni za ocenu validnosti rezultata merenja. Rezultati se smatraju validnim samo kada je ambijentalni šum najmanje za 20 PN dB ispod maksimuma avionske

buke i kada je nivo zvučnog pritiska avionske buke u svim tercama (50 Hz do 10 kHz) i u svim vremenskim intervalima (korak 0,5 s) za period 10 dB ispod maksimuma avionske buke ($PNLTM$ nivo) bar 3 dB iznad srednje vrednosti ambijentalnog šuma. Pri tome je važno da u ovom periodu ne dođe do maskiranja pojedinih spektralnih komponenti avionske buke, a samim tim i netačnog konačnog rezultata. Prvi uslov je lako ostvariti, ali ne i drugi. U tom slučaju neophodno je primeniti neku od metoda za njegovu eliminaciju koja obuhvata:

- identifikaciju maskiranih podataka,
- podešavanje nemaskiranih podataka na vrednosti koje bi bile bez prisustva ambijentalnog šuma,
- zamenu i rekonstrukciju maskiranih nivoa postupkom frekvencijske ili vremenske ekstrapolacije.

Navedenom procesu pristupa se nakon terčne analize avionske i ambijentalne buke i dobijanja $SPL(i, k)$ vrednosti i pre primene bilo koje korekcije vezane za mernu opremu, atmosfersko i propagaciono slabljenje.

Pojava i uzroci maskiranja

Poznato je da sa porastom frekvencije amplituda zvučnog pritiska u spektru avionske buke merene na zemlji opada, a u spektru električnog šuma merne opreme raste. Posledica toga je pojava maskiranih podataka i to u višem delu spektra avionske buke. Verovatnoću njihovog pojavljivanja povećava i ambijentalni šum prisutan u vreme merenja.

Glavni uzrok slabljenja spektralnih komponenti akustičkog signala je atmosferska apsorpcija energije zvučnog talasa u

toku njegove propagacije od izvora do prijemnika. Stepenn ovog slabljenja zavisi od trenutnih meteo uslova. Pored atmosferskog značajno je i propagaciono slabljenje koje je direktno srazmerno kvadratu rastojanja od izvora i ne može se zanemariti kada je ta udaljenost veća od 200 m.

Navedena slabljenja imaju manji uticaj na određivanje buke aviona sa klipnoelisnim pogonskim grupama, jer su u spektru buke ovih aviona više izražene spektralne komponente u nižem delu spektra, za razliku od mlaznih aviona gde su izraženije komponente u višem delu.

Uticaj atmosferskog i propagacionog slabljenja ne samo da nije isti za različite tipove aviona, već nije isti ni na mernim mestima za isti tip aviona. Odnosi nivoa ambijentalnog šuma i maksimalne buke istog aviona za standardom propisana merna mesta K1, K2 i K3 se međusobno razlikuju, čak i pod pretpostavkom da je nivo ambijentalnog šuma isti. Razlike u detektovanoj maksimalnoj buci su očekivane i posledica su razlika u režimu rada avionskog motora, udaljenosti aviona od mernog mesta, ugla putanje leta i ugla propagacije zvučnih talasa.

Identifikacija maskiranih podataka i kriterijumi maskiranja

Identifikacija maskiranih podataka vrši se na osnovu odgovarajućeg kriterijuma koji se definiše za svaki pojedinačni opseg u posmatranom spektru avionske buke. Kriterijum maskiranja utvrđuje se na osnovu podataka za pre-detection i post-detection šum, koji predstavljaju dve komponente background šuma ustanovljene tokom merenja avionske buke.

Background šum predstavlja kombinovani šum u mernom sistemu, koji uključuje sve izvore izuzev aviona koji se testira i koji ima različit uticaj na spektralni sadržaj avionske buke. Tipični elementi background šuma su: ambijentalni šum i analitički šum mernog sistema. Prvi se kategoriše i kao pre-detection šum, jer ima energetski uticaj na komponente spektra avionske buke, dok drugi kategorisan kao post-detection šum, nema navedeni uticaj ali može da naruši svojstva izmerenog signala. Post-detection šum predstavlja i minimalni nivo ispod kojeg se izmereni nivoi buke smatraju neupotrebljivim.

Standardom je propisano da se reprezentativna svojstva pre-detection šuma dobijaju merenjem u trajanju od minimalno 10 s, a optimalno 30 s neposredno pre i nakon ispitnih letova. Ovi snimci treba da reprezentuju akustičku buku pozadine i električni šum, kao sastavne komponente pre-detection šuma u vreme merenja avionske buke. Konfiguracija i postavljeni parametri na mernom sistemu u toku snimanja i postupka obrade moraju biti identični uslovima snimanja i obrade avionske buke. Dobijeni podaci u snimljenom intervalu usrednjavaju se po tercima i kao takvi se koriste u postupku identifikacije.

Pre utvrđivanja kriterijuma maskiranja, proverava se validnost svih terčnih podataka pre-detection šuma. Za ovu proveru koriste se podaci za post-detection šum koje najčešće daje proizvođač zbog složenosti njegovog određivanja. Uslov validnosti pre-detection šuma jeste da je njegov nivo viši od nivoa post-detection šuma u posmatranom opsegu. Kada je

ovaj uslov ispunjen, kriterijum za utvrđivanje da li je podatak u avionskom spektru maskiran ili ne jeste nivo pre-detection šuma uvećan za 3 dB, a u suprotnom nivo post-detection šuma uvećan za 1 dB.

U procesu identifikacije, za maskirani podatak u avionskom spektru se proglašava vrednost $SPL(i, k)$ koja je jednaka ili manja od vrednosti definisane navedenim kriterijumom. Pozicija maskiranog podatka, odnosno vremenski interval i opseg memorišu se radi predstojećih koraka korekcije.

Pojava prvog maskiranog podatka u višem delu frekvencijskog opsega (jedna od terci sa centralnom frekvencijom od 800 Hz do 10 kHz), obično je indikacija da su i podaci u svim narednim tercama maskirani. Ova pretpostavka zasnovana je na činjenici da atmosfersko i propagaciono slabljenje raste sa porastom frekvencije akustičkog signala. Međutim, nije isključena ni pojava nemaskiranih podataka kao posledica varijacije akustičkog šuma pozadine ili diskretnih tonova čiji je izvor avion. Prvi slučaj se zanemaruje, a drugi se prijavljuje nadležnim institucijama za sertifikaciju aviona po pitanju buke.

Pozicija prvog maskiranog podatka u višem delu spektra važna je za definisanje „poslednjeg dobrog opsega“ (LGB – Last Good Band), a samim tim i izbora načina korekcije ovih podataka. Za LGB se usvaja opseg pre opsega sa prvim maskiranim podatkom, dok se svi naredni opsezi, bez obzira na rezultate testiranja, prema prethodnom objašnjenju smatraju maskiranim.

Svi navedeni postupci primenjuju se na spektralne zapise avionske buke u svim intervalima, korak 0,5 s, značajnim za proračun *EPNL*.

Proces podešavanja

Za svaki nemaskirani opseg do LGB, uključujući i njega, gde je istovremeno validan i pre-detection šum, vrši se podešavanje izmerene vrednosti zvučnog pritiska avionske buke – $SPL_{avion+šum}(i, k)$ na one koje bi bile bez prisustva navedenog šuma – $L_{pre-detection}(i)$. Procedura se zasniva na utvrđivanju njihove razlike na energetske osnovi:

$$10 \cdot \log \left[10^{(SPL_{AVION+ŠUM}(i,k)/10)} - 10^{(L_{pre-detection}(i)/10)} \right] \quad (11)$$

Na ovako korigovane $SPL(i, k)$ vrednosti dalje slede frekvencijski zavisna podešavanja diktirana karakteristikama merne opreme, poput frekvencijskog odziva sistema, free-field odziva mikrofona i uticaja štitnika za vetar. Time se formira osnova za rekonstrukciju maskiranih podataka u svim intervalima. Sam postupak rekonstrukcije zavisi od lokacije maskiranog podatka u spektru.

Rekonstrukcija maskiranih podataka

U postupku rekonstrukcije vrši se zamena onih izmerenih podataka koji su identifikovani kao maskirani sa vrednostima koje bi bile izmerene u uslovima bez pre-detection šuma. Ove vrednosti određuju se računskim putem. Postupak izračunavanja zavisi od pozicije maskiranog podatka u spektru.

Za niže frekvencijske opsege (50 Hz – 630 Hz) rekonstrukciji podležu samo pojedinačni maskirani podaci, ukoliko su okruženi validnim, pri čemu se za novu vrednost dodeljuje njihova aritmetička sredina. U protivnom standard ne propi-

suje drugi način rekonstrukcije, tako da više uzastopnih maskiranih podataka ostaje i dalje markirano kao maskirani.

Pri rekonstrukciji maskiranih podataka u višim frekvencijskim opsezima (800 Hz – 10 kHz), u zavisnosti od spektralnog položaja LGB-a, primenjuju se dve metode:

- frekvencijska ekstrapolacija, kada je LGB u opsezima 2 kHz do 8 kHz,

- vremenska ekstrapolacija, kada je LGB u opsezima 630 Hz do 1,6 kHz.

Za proračun rekonstruisanih vrednosti primenom ovih metoda potrebni su i podaci za atmosfersko slabljenje i rastojanje avion – mikrofona u vreme detekcije maskiranog signala.

Svi rekonstruisani i podaci koji su i dalje ostali maskirani u nižim i višim frekvencijskim opsezima se markiraju radi predstojećih koraka tonske korekcije i validacije rezultata merenja.

Frekvencijska ekstrapolacija

Frekvencijska ekstrapolacija primenjuje se u slučaju kada je frekvencija LGB opsega jednaka ili veća od 2 kHz i obuhvata rekonstrukciju svih opsega iznad njega u posmatranom spektru.

Metoda je bazirana na pretpostavci da je na rastojanju 60 m od izvora u referentnim atmosferskim uslovima (25°C i 70% relativna vlažnost) spektar avionske buke ravan u opsezima 2 kHz do 10 kHz.

Analitički izraz za proračun rekonstruisanih vrednosti svih maskiranih signala u opsezima iznad LGB opsega dat je sledećom relacijom:

$$SPL_C(i,k) = SPL(j,k) + [\alpha(j) - \alpha(i)] \cdot \frac{R(k)}{100} + [\alpha(i)_{ref} - \alpha(j)_{ref}] \cdot \frac{60}{100} \quad (12)$$

gde je:

i – redni broj terce sa maskiranim podatkom,

k – redni broj vremenskog intervala za maskirani podatak,

j – redni broj LGB terce u trenutku k ,

$SPL_C(i,k)$ – rekonstruisani nivo maskiranog signala, u dB,

$SPL(j,k)$ – LGB nivo sa unetim korekcijama za atmosferske uslove, pre-detection šum, mernu opremu,

$\alpha(i)$, $\alpha(i)_{ref}$ – koeficijent atmosferskog slabljenja za i -tu tercu u uslovima merenja i referentnim, respektivno, u dB/100 m,

$\alpha(j)$, $\alpha(j)_{ref}$ – koeficijent atmosferskog slabljenja za LGB opseg u uslovima merenja i referentnim, respektivno, u dB/100 m,

$R(k)$ – rastojanje avion – mikrofona u trenutku k , u metrima.

Vremenska ekstrapolacija

Vremenska ekstrapolacija primenjuje se u slučaju kada je pozicija LGB opsega u rasponu od 630 Hz do 1,6 kHz i obuhvata rekonstrukciju svih maskiranih podataka u opsezima iznad njega. Metoda je bazirana na pretpostavci da je tokom preleta avionski spektar omnidirekcionalan. Za ovu metodu je karakteristično da se analizira pozicija maskiranog podatka u odnosu na vremenski najbliži validan podatak u istom opsegu. Formula za proračun data je relacijom (13) uz napomenu da je nivo SPL validnog podatka prethodno podešen za uticaj pre-detection šuma i karakteristika merne opreme.

$$SPL_C(i,k) = SPL(i,m) + \left[\frac{R(m)}{100} - \frac{R(k)}{100} \right] \cdot \alpha(i) + 20 \log \left[\frac{R(m)}{T(k)} \right] \quad (13)$$

gde je:

i – redni broj terce maskiranog i 1. validnog podatka,

k – redni broj vremenskog intervala u kome je detektovan maskirani podatak,

m – redni broj najbližeg vremenskog intervala sa validnim podešenim nivoom,

$SPL_C(i,k)$ – rekonstruisan nivo maskiranog signala, u dB,

$SPL(i,m)$ – validan i podešen nivo u m -tom intervalu, najbliži maskiranom u istoj terci, u dB,

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

$R(k)$ – rastojanje avion – mikrofona u intervalu k , u metrima,

$R(m)$ – rastojanje avion – mikrofona u intervalu m , u metrima.

Za primenu vremenske ekstrapolacije važno je napomenuti da najniža frekvencija LGB opsega može biti 630 Hz. U slučaju kada su maskirani opsezi 630 Hz i 800 Hz, rekonstrukcija maskiranih podataka se ne može izvršiti.

Nakon podešavanja i rekonstrukcije podataka slede koraci proračuna do dobijanja vremenski zavisnog nivoa $PNLT(k)$ – tonski korigovani nivo percipirane buke, pri čemu su uključeni podaci iz svih opsega, bilo da sadrže validne, rekonstruisane ili maskirane podatke. Ovi podaci su uključeni i u postupak svodenja konačnog rezultata na referentne atmosferske i propagacione uslove.

Zahtevi i ograničenja

Rekonstrukcijom maskiranih podataka uklonjeni su efekti ambijentalnog šuma iz signala avionske buke.

Rezultati prethodno opisanih procedura su podešeni, rekonstruisani i maskirani podaci, čije pozicije i vrednosti su značajne za proračun konačnog rezultata, nivoa $EPNL$. Zbog i daljeg prisustva maskiranih podataka, proračun faktora tonske korekcije, $C(k)$, usložava se.

Vrednost jednog od rekonstruisanih podataka u višim frekvencijskim opsezima može biti identifikovana kao ton sa maksimalnom amplitudom u posmatranom spektru. Međutim, pošto je ovaj ton lažan i izračunata vrednost za faktor tonske korekcije $C(k)$ je netačna. Ovaj problem se ne može rešiti jednostavnim izjednačavanjem $C(k)$ sa nulom. Eliminacija uticaja ovih podataka na proces tonske korekcije može se rešiti na jedan od sledeća dva načina:

- tonska korekcija se vrši samo do terce identifikovane kao LGB, pri čemu su obuhvaćeni i svi rekonstruisani i maskirani podaci do LGB opsega,

- faktor F (međukorak u procesu proračuna $C(k)$) izjednačava se nulom, kada se utvrdi da je maksimalan ton identifikovan u terci sa maskiranim ili rekonstruisanim podatkom, nakon čega se postupak proračuna $C(k)$ ponavlja.

Prisustvo rekonstruisanih i maskiranih podataka u intervalu $PNLTM - 10$ dB koji je važan za proračun $EPNL$ utiče na ocenu validnosti merenja. Rezultati merenja se odbacuju ukoliko je samo jedan spektar nevažeći u pomenutom intervalu, a to podrazumeva da su:

– postojali zahtevi za rekonstrukcijom u više od četiri treće u jednom od intervala k u periodu $PNLTM \pm 1s$ (5 intervala od 0,5 s) ili je LGB lociran u terca ma sa centralnim frekvencijama do 4 kHz, uključujući i nju;

– podaci i dalje maskirani nakon primenjenog postupka rekonstrukcije u više od četiri treće.

Rezultati merenja

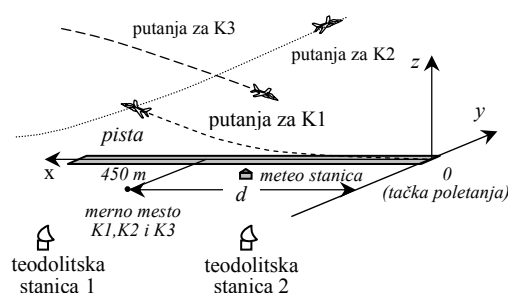
Navedena metoda proračuna nivoa buke *EPNL* uz eliminaciju efekata ambijentalnog šuma primenjena je na rezultate merenja buke aviona G-2A. Zbog obimnosti podataka, po 6 merenja za merna mesta K1, K2 i K3, rezultati su prezentirani samo za jedan od letova u mernoj tački K3 (tačka preleta u fazi slentanja).

Avion G-2A, prikazan na sl. 4, dozvučni je mlazni avion sa jednim ugrađenim motorom, tipa VIPER 22-6. Ovaj avion je u sastavu našeg ratnog vazduhoplovstva i ne podleže sertifikaciji koja se odnosi na nivo buke. Međutim, pošto se od nedavno koristi u civilnom saobraćaju ovaj sertifikat je neophodan.

Buka aviona G-2A za propisana merna mesta K1, K2 i K3, iz organizaci-



Sl. 4 – Avion G-2A



Sl. 5 – Scenario merenja buke G-2A

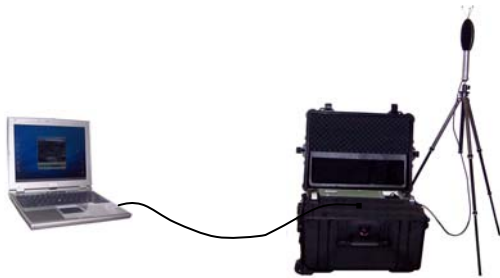
onih razloga snimana je na lokaciji koja odgovara lateralnoj mernoj tački K1 uz simulaciju standardom predviđenih putanja za K2 i K3 (sl. 5).

Merenja su realizovana u vreme kada u zoni ispitivanja nije bilo letenja, niti pokretanja motora vazduhoplova. Za akustičku proveru mernog sistema korišćen je kalibracioni signal pistonfona, nivoa 124 dB (re 20 μ Pa) na 250 Hz. Mikrofonski je postavljen na propisanu visinu 1,2 m iznad tla, pod uglom incidencije od 90° u odnosu na pravac prostiranja zvučnih talasa.

Za merenje i analizu avionske buke i ambijentalnog šuma korišćena je oprema firme Brüel & Kjær, sistem za monitorisanje buke, tip NMT 3637B, u čijem sastavu je:

- mikrofonska jedinica za spoljašnju upotrebu sa kablom dužine 10 m, tip 4198 (mikrofon tip 4189, pretpojačavač tip 2669 i štitnik od vetra tip UA1404),
- stalak za mikrofon, tip UA 0801,
- analizator nivoa buke, tip 4441,
- sistem kontroler, tip UL 0219,
- GPS prijemnik sa antenom, tip ZD 0871.

Softverom 7802 Brüel & Kjær sistem je setovan za rad sa linearnom frekvencijskom skalom, SLOW dinamičkom karakteristikom i tercnim filtrima za



Sl. 6 – Konfigurisanje i transfer podataka sa NMT na PC

dobijanje nivoa zvučnog pritiska sa ekvivalentnim razmacima od 0,5 s (sl. 6). Frekvencijska analiza je vršena filtriranjem detektovanih signala buke sa digitalnim filtrima u on-line postupku (analyzer 4441). Izmerene vrednosti za ekvivalentni nivo buke i rezultati terčne analize u realnom vremenu memorisani su na disk računara (sistem kontroler UL 0219) sa korakom 1 s i 0,5 s, respektivno. Svi snimljeni i obrađeni podaci merenja preneti su sa NMT sistema na notebook računar pomenutim softverom. Računska obrada terčnih podataka za avionsku buku i pre-detection šum obavljena je u MatLab paketu.

Putanja aviona snimana je optoteodolitskim sistemom „SKYTRACK“, firme Contraves iz Švajcarske, koji čine dve teodolitske stanice na međusobnom rastojanju od 2 km. Izračunavanje koordinata sa korakom 0,5 s vrši se rešavanjem mreže trouglova metodom triangulacije.

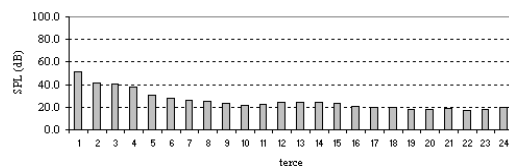
Meteorološki podaci u vreme merenja preuzeti su od aerodromske meteo službe. Snimanje avionske buke sinhronizovano je sa snimanjem putanje leta.

Za potrebe računске obrade podataka za buku u paketu MatLab, proračunati

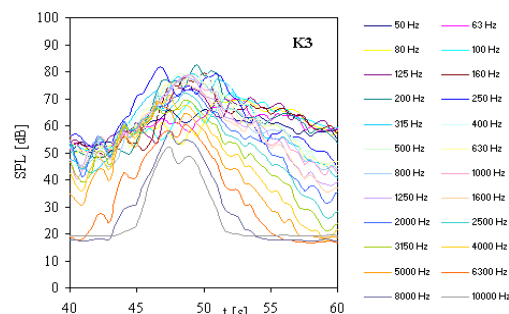
su i putanja leta i parametri aviona za referentne uslove i uslove merenja na osnovu podataka datih u standardu i uputstvu za upravljanje avionom.

U zapisima avionske buke identifikovani su maskirani podaci. Identifikacija je vršena po kriterijumu + 3 dB u odnosu na prosečnu vrednost pre-detection šuma koji je snimljen pre i nakon ispitnog leta u trajanju od 30 s. Na sl. 7 prezentirane su srednje vrednosti ovog šuma po tercama, a na sl. 8 za avionsku buku. Validnost pre-detection šuma utvrđena je u procesu poredenja njegovih terčnih podataka sa podacima za post-detection šum koji su preuzeti od proizvođača.

Nakon identifikacije maskiranih podataka izvršena su podešavanja validnih podataka, koja podrazumevaju oduzimanje energije pre-detection šuma i unošenje korekcija za mikrofonsku jedinicu 4198 pri uglu incidencije 90°. Svi identifikovani maskirani podaci su rekonstruisani metodom frekvencijske ekstrapolacije.



Sl. 7 – Pre-detection šum



Sl. 8 – Snimljeni terčni podaci za avionsku buku

Tabela 1

Raspored rekonstruisanih i maskiranih podataka

Granice posmatranih perioda	LGB	Zahtevi za rekonstrukciju u periodu PNLTM – 10 dB		Maskirani i posle rekonstrukcije u periodu PNLTM – 10 dB		Metoda rekonstrukcije
	<i>i</i>	<i>k</i>	<i>i</i>	<i>k</i>	<i>i</i>	
$k_1 \div (k_{max}-2)$	24	-	-	-	-	-
$k_{max} \pm 2$	24	-	-	-	-	-
$(k_{max}+2) \div k_2$	23	47, 48	24	-	-	frekvencijska

Tabela 2

Parametri aviona i uslova okoline

Merno mesto	<i>QK</i> (m)	<i>QrKr</i> (m)	<i>H</i> (m)	<i>Hr</i> (m)	<i>V</i> (km/h)	<i>Vr</i> (km/h)	Meteo podaci	
							u vreme opita	referentni
K3	196,9	230,4	90,6	109,7	217,2	229,0	28,2°C, 38%, vetar 2,5 do 3 m/s	25°C, 70 %, vetar 0 m/s

Tabela 3

Konačni rezultati merenja

Primenjena metoda eliminacije šuma	<i>C</i> (dB)	<i>PNLTM</i> (TPNdB)	<i>k₁</i>	<i>k_{max}</i>	<i>k₂</i>	Δ_1 (dB)	Δ_2 (dB)	Pozicija aviona u toku opita			<i>EPNL</i> (EPNdB)	<i>EPNL_r</i> (EPNdB)
								<i>QK</i> (m)	γ (°)	ψ (°)		
ne	1,9208	98,74219	33	38	48	-1,3355	0,3269	196,9	153,3	28,2	94,3	93,3
da	1,9209	98,74048	33	38	48	-1,3357	0,3269				94,3	93,3

Gde je:

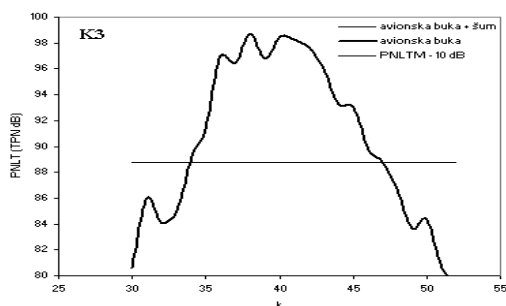
H, Hr (m) – visina leta u uslovima merenja i ref. uslovima, *k₁* i *k₂* – red. br. intervala na granicama perioda *PNLTM*-10dB, *k_{max}* – red. br. intervala za *PNLTM*, γ (°) – ugao emisije zvučnih talasa, ψ (°) – elevacioni ugao prijema zvučnih talasa.

Izračunate su vrednosti PNL(*k*) za avionsku buku i pre-detection šum, pri čemu su uključeni podaci iz svih opsega, bilo da sadrže validne, rekonstruisane ili maskirane podatke. Poređenjem maksimalnih vrednosti utvrđeno je da je ova razlika veća od minimalno dozvoljenih 20 PN dB.

U vremenskim intervalima, gde su u višim opsezima identifikovani maskirani podaci, tonska korekcija je vršena do LGB. Time je eliminisan jedan od mogućih izvora lažnih tonova što je potvrđeno vrednostima *C(k)* koje variraju u rasponu većem od indikativnih 0,2 dB do 0,6 dB i njihovim neznatnim razlikama sa i bez eliminacije šuma.

Ishod procesa tonske korekcije je tonski korigovani nivo percipirane buke *PNLT(k)*, sl. 9, nakon čega je izračunat nivo *EPNL* za uslove merenja. Efekat eliminacije *pre-detection* šuma nije se odrazio na konačan rezultat, nivo *EPNL*, jer je mali broj podataka bio maskiran, a zatim rekonstruisan, a 2 podatka su u spektrima na granici perioda *PNLTM* – 10 dB (tabela 1).

Potvrda uspešnosti primenjenog procesa eliminacije efekata pre-detection šuma, a istovremeno i validnosti uslova merenja, je broj podataka koji su ostali maskirani, broj zahteva za rekonstrukcijom i pozicija LGB u spektru u periodu *PNLTM* – 10 dB. Za ovu mernu tačku



Sl. 9 – PNLTM(k) nivo sa i bez pre-detection šuma

propisani zahtevi u potpunosti su zadovoljeni, jer nijedan podatak nije ostao maskiran u periodu PNLTM – 10 dB, broj zahteva za rekonstrukcijom manji je od 4 i lokacije svih LGB su u tercama iznad 4 kHz (redni broj terce je veći od 20) u periodu PNLTM ± 1 s (tabela 1).

Za proračun EPNL u referentnim uslovima korišćeni su meteo podaci, putna brzina i udaljenost aviona od mernog mesta. Vrednosti ulaznih parametara potrebnih za svodjenje na referentne operative i ambijentalne uslove dati su u tabeli 2. Konačni rezultati merenja sa svim relevantnim međurezultatima proračuna, sa i bez primene procesa eliminacije efekata ambijentalnog šuma, dati su u tabeli 3.

Primenom izloženog postupka proračuna EPNL, proces određivanja ovog nivoa za posmatranu mernu tačku nije završen. Za dobijanje konačnog rezultata potrebno je najmanje šest merenja, pri čemu rezultati moraju zadovoljiti statističke uslove. Traženi nivo je srednja vrednost ovako dobijenih rezultata.

Zaključak

Radi zaštite životne okoline važno je poznavanje nivoa buke svih učesnika u civilnom vazдушnom saobraćaju. Na primeru određivanja nivoa buke za avion G-2A, primenom složene procedure definisane standardom ICAO Annex 16, pokazuje se da kod nas postoji raspoloživa merna oprema, da se mogu sprovesti zahtevane procedure leta, obezbediti zapisi buke aviona i putanje leta aviona, kao i realizovati njihova kompletna obrada i analiza. To otvara mogućnost šire primene ovog standarda kod nas radi zaštite okoline, posebno prostora oko aerodroma.

Literatura:

- [1] ICAO Annex 16, Environmental Protection, Volume I – Aircraft Noise, Third Edition, 1993.
- [2] Doc. 9501 – ICAO Committee on Aviation Environmental Protection, 1993.
- [3] Advisory Circular AC No: 36-4C – U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 15. 07. 2003.
- [4] Kurtović, H. Š.: Osnovi tehničke akustike, Naučna knjiga, Beograd, 1982.
- [5] Bošković, V., Zeljković, V., Jurin, G.: Merenje buke vazduhoplova prema standardu ICAO, Annex 16, Konferencija za ETRAN, Teslić, Sveska II, str. 291–293, jun 2002.
- [6] Zeljković, V., Bošković, V., Jurin, G.: Postupak korekcije izmerenog nivoa avionske buke kada uslovi merenja i referentni uslovi nisu identični, Konferencija za ETRAN, Teslić, Sveska II, str. 294–297, jun 2002.
- [7] Jurin, G., Pavlović, M., Jankuloski, Đ.: Avionska buka i uticaj ambijentalnog šuma na tačnost merenja, Konferencija za ETRAN, Čačak, Sveska II, str. 401–404, jun 2004.
- [8] Jurin, G., Pavlović, M.: Problem eliminisanja ambijentalnog šuma u procesu određivanja nivoa avionske buke, Naučnotehnička informacija, 2005.

