

Automatizovano merenje intenziteta zvuka pomoću robota i intenzitetske sonde

Miloš Bjelić, Nikola Knežević, Kosta Jovanović

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

bjelic@etf.rs; knezevic@etf.rs; kostaj@etf.rs

Sadržaj—U ovom radu je prikazana procedura za merenje intenziteta zvuka pomoću robota. Procedura je realizovana tako što robotska ruka nosi intenzitetsku sondu i vrši njeno automatsko pozicioniranje u odgovarajućim mernim tačkama. Izvršena su poređenja rezultata merenja intenziteta pomoću robota i ručnog merenja koja su vršile dve osobe, sa ciljem da se utvrde vrednosti odstupanja. Takođe, izvršena su ponovljena merenja gde je pozicioniranje sonde izvršeno ručno i pomoću robota, čime su dobijene vrednosti odstupanja prilikom ove dve vrste merenja. Korišćenjem robota za merenje intenziteta značajno je olakšan postupak merenja i postignuta veća tačnost merenja. Ovakva upotreba robota može biti od interesa prilikom merenja intenziteta zvuka složenih zvučnih izvora kod kojih se merenje vrši u velikom broju tačaka i gde se zahteva velika tačnost merenja intenziteta.

Ključne reči - automatizacija; intenzitet zvuka; intenzitetska sonda; merenje; robot;

I. UVOD

Kao najčešće korišćena procedura u merenju intenziteta zvuka koristi se merenje pomoću intenzitetske sonde. Ovaj način merenja podrazumeva korišćenje dva mikrofona postavljena na bliskom rastojanju [1]. Mikrofon formiraju osu koja predstavlja pravac u kom se određuje vrednost intenziteta zvuka. Intenzitetska sonda koristi se u raznim inženjerskim oblastima: građevinskoj akustici [2], u određivanju buke mašina složenih geometrijskih oblika [3], [4], detekciji defekata u radu mašina [5] itd. Prednost korišćenja intenziteta u odnosu na merenje zvučnog pritiska za izračunavanje zvučne snage izvora je ta što se intenzitet određuje samo za pravac koji formiraju dva mikrofona intenzitetske sonde. Na taj način vrši se prostorna selekcija zvučnih izvora koji se analiziraju i eliminiše se uticaj drugih izvora koji bi potencijalno mogli da ugroze analizu. Merenje se može vršiti u nekoliko tačaka ili kontinualnotako da se sondom formira određena kriva linija u prostoru [6]. Merenje u diskretnim tačkama se češće koristi u praksi zbog toga što omogućava komforniji postupak merenja jer se između pojedinačnih tačaka može napraviti pauza. Ukoliko se merenje vrši u diskretnim tačkama formira se mreža tačaka u kojima se vrši merenje, udaljena nekoliko centimetara od izvora zvuka.

Intenzitet zvuka u prostoru obično se prikazuje dvodimenzionalno pomoću boja, gde boje predstavljaju vrednosti intenziteta zvuka.

Merenje intenziteta pomoću intenzitetske sonde zahteva idealno fazno uparen mikrofonski par. I pored dobre fazne uparenosti mikrofona i dodatne fazne kompenzacije javiće se greška u merenju jer je postizanje idealne uparenosti nemoguće u praksi. Dodatne greške u merenju mogu se javiti zbog merne opreme, a teorijski gabariti vrednosti tih grešaka obrađeni su u literaturi [1]. Greške u merenju intenziteta javljaju se i usled nestacionarnosti zvučnog polja koje emituju zvučni izvori [7], kao i zbog velike razlike u brzini oscilovanja i zvučnog pritiska na mernim mikrofona [7]. Međutim, najveće greške u merenjima intenziteta javljaju se zbog pozicioniranja sonde u prostoru i zadržavanja iste pozicije u toku snimanja signala u jednoj tački [7].

Uobičajno je da se u analizi rada složenih zvučnih izvora merenje intenziteta zvuka vrši u velikom broju tačaka. Takođe, merenje intenziteta u svakoj tački vrši nekoliko sekundi ili desetina sekundi i uz veliki broj mernih tačaka ovaj postupak postaje izuzetno zahtevan za osobu koja vrši merenje. Intenzitetsku sondu, odnosno dva mikrofona, potrebno je držati na istom rastojanju od merne površine za sve merne tačke. Osa koju formiraju dva mikrofona mora biti upravna na mernu ravan u toku merenja [6]. Zbog toga je potrebno da pozicija sonde u prostoru bude precizna i da nema eventualnih pomeranja. Pošto u ovoj proceduri čovek pozicionira sondu rukom ispunjavanje navedenih zahteva nije jednostavan zadatak. Kod čoveka se u toku merenja pojavljuje umor, pa nije moguće održati tačnu poziciju sonde za sve merne tačke. Dodatno, zbog zamora čovek pomera sondu, odnosno njenu osu, u odnosu na mernu ravan u toku merenja. Zbog nabrojanih razloga neminovno je da se upostupak merenja intenziteta unosi greška.

Greške usled nepreciznosti pozicioniranja sonde u prostoru mogu se sagledati i analizirati tako što se merenje intenziteta istog izvora vrši nekoliko puta. Međutim, na taj način mogu se samo odrediti odstupanja između pojedinačnih merenja ali ne i tačne vrednosti intenziteta zvuka koji stvara složen izvor. Tačna vrednost intenziteta u pojedinačnim tačkama mogla bi

se utvrditi pomoću automatizovanog sistema za pozicioniranje sonde u prostoru. Pod tačnom vrednošću intenziteta podrazumeva se vrednost kod koje je otklonjena greška usled nepreciznog pozicioniranja, ali i dalje postoje ostale navedene greške. Za postupak automatizacije pozicioniranja sonde mogu se koristiti razne vrste robota. Roboti koji se koriste u ovom postupku moraju da imaju tri stepena slobodeda bi se obezbedilo traženo pozicioniranje. Roboti koji se danas koriste u industriji obezbeđuju tačnost pozicioniranja 10^{-4} m [8], što je više nego dovoljna tačnost za ovu aplikaciju. Merenje pomoću robota, pored tačnijeg pozicioniranja sonde u prostoru, je i neuporedivo lakši način merenja u odnosu na merenje „iz ruke“. Pomoću robota jednostavno je moguće ponavljati mernu proceduru, čime se mogu sagledati uticaji i ostalih nabrojanih uzroka na grešku prilikom merenja.

U ovom radu izvršena je analiza mogućnosti korišćenja robota za automatizaciju postupka merenja intenziteta zvuka. Motivacija za ovakvo istraživanje je smanjenje greške u merenju prilikom pozicioniranja sonde u prostoru. Takođe, motivacija je i olakšavanje samog merenja i smanjivanja vremena potrebnog za merenje složenih izvora sa više tačaka. Analizirana su odstupanja koja se javljaju u merenjima intenziteta pomoću robota i merenja „iz ruke“, i utvrđeni gabariti tih odstupanja. Merenja bez robota su vršile dve osobe kako bi se analiziralo da li postoji zavisnost greške u merenju od osobe koja je vršila merenje. Izvršena su ponovljena merenja pomoću robota da bi se sagledala vrednost odstupanja u merenjima kada je pozicioniranje sonde izvršeno precizno. Na taj način moguće je utvrditi vrednosti greške koja nastaje usled drugih faktora koji ne zavisi od pozicioniranja sonde.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazana je metoda za merenje intenziteta zvuka pomoću dva mikrofona. U trećem poglavlju prikazana je korišćena oprema u eksperimentima, kao i eksperimentalna postavka. U narednom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati merenja i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju dat je zaključak o mogućnosti korišćenja prikazane metodologije pomoću intenzitetske sonde i robota.

II. MERENJE INTENZITETA ZVUKA POMOĆU INTENZITETSKE SONDE

U ovom poglavlju prikazana je procedura za određivanje, vrednosti intenziteta zvuka pomoću intenzitetske sonde, kao i prednosti i ograničenja koja ima ova merna metoda.

A. Merenje intenziteta zvuka

Intenzitet zvuka predstavlja vektorsku veličinu i može se izračunati poznavanjem brzine i zvučnog pritiska, odnosno:

$$\vec{I} = p(\vec{r}, t) \vec{v}(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Merenje brzine predstavlja težak zadatak u praksi. Brzina se obično određuje indirektno pomoću merenja nekih drugih fizičkih veličina, koje je jednostavnije izmeriti. Zvučni pritisak je moguće odrediti jednostavno pomoću mikrofona i uz poznavanje veze pritiska i brzine može se odrediti brzina

oscilovanja, a zatim i intenzitet zvuka. Veza pritiska i brzine data je pomoću sledeće jednačine:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\text{grad}p, \quad (2)$$

gde je ρ_0 gustina u vazduhu. Na osnovu ove jednakosti, brzina zvuka može se izračunati kao:

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int \text{grad}p \, dt \quad (3)$$

Međutim, izračunavanje gradijenta pritiska zahteva određivanje gradijenta po sve tri ose Dekartovog koordinatnog sistema. Izračunavanje brzine na ovaj način zahtevalo bi barem tri merenja. Ukoliko se pretpostavi da zvuk postoji samo u nekom pravcu u , gradijent zvučnog pritiska može se izračunati kao:

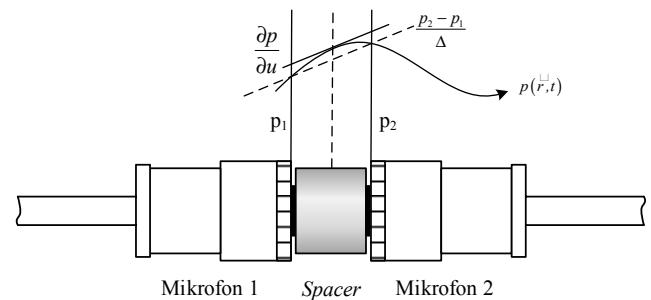
$$\text{grad}p = \frac{\partial p}{\partial u}, \quad (4)$$

Na osnovu jednačine (1) i jednačine (4) intenzitet zvuka izračunava se na sledeći način:

$$\vec{I} = -\frac{1}{\rho_0} p(\vec{r}, t) \int_0^t \frac{\partial p(\vec{r}, t)}{\partial u} \, d\tau \quad (5)$$

U praksi se obično koristi usrednjena vrednost intenziteta zvuka u nekom vremenu t , koja se na osnovu jednačine (5) definiše kao:

$$\langle \vec{I} \rangle = -\frac{1}{\rho_0} \langle p(\vec{r}, t) \int_0^t \frac{\partial p(\vec{r}, t)}{\partial u} \, d\tau \rangle \quad (6)$$



Slika 1. Aproksimacija gradijenta zvučnog pritiska koristeći dva mikrofona na bliskom rastojanju

Na Slici 1 prikazana su dva mikrofona koja se nalaze u osi i na bliskom rastojanju, koje je određeno distancerom (*spacer*) postavljenim između njih. Ovakav merni sistem u literaturipoznat je pod nazivom intenzitetska sonda [4]. Dva mikrofona formiraju pravac u , u kom je moguće odrediti gradijent zvučnog pritiska, odnosno moguće izračunati brzinu oscilovanja. Na Slici 1 takođe je prikazano uprošćeno zvučno polje sinusnog oblika. Gradijent zvučnog pritiska prikazan je punom linijom. Uvođenjem određene aproksimacije gradijent pritiska bi se mogao odrediti samo na osnovu izmerenih vrednosti pritisaka pomoću dva mikrofona. Aproksimacija je definisana jednačinom (7) i predstavlja svodenje gradijenta na razliku pritisaka na konačno malom rastojanju.

$$\frac{\partial p}{\partial u} = \frac{p_2(\vec{r}, t) - p_1(\vec{r}, t)}{|r_2 - r_1|} = \frac{p_2 - p_1}{\Delta} \quad (7)$$

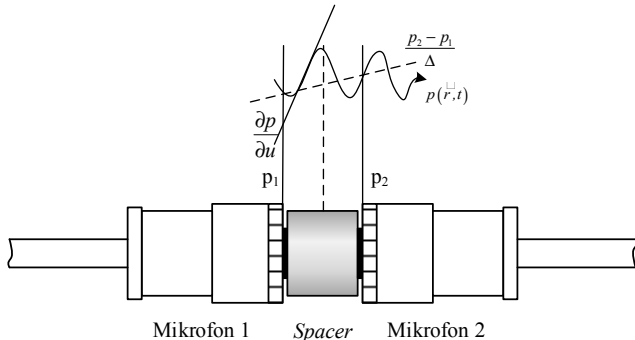
$$\langle p \rangle = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (8)$$

Konačno, vrednost intenziteta zvuka u određenom vremenskom intervalu t dobija se zamenom jednačina (7) i (8) u jednačinu (6).

$$\langle I \rangle = I = -\frac{p_1 + p_2}{2\Delta\rho_0} \int_0^t (p_2 - p_1) dt \quad (9)$$

B. Ograničenja u merenju pomoću intenzitetske sonde

Aproksimacija uvedena u jednačini (7) važi u slučajevima kada je talasna dužina zvuka čiji se intenzitet određuje veća od rastojanja između mikrofona. U slučajevima kada ova distanca nije zanemarljiva aproksimacija nije opravdana, odnosno dobijena vrednost intenziteta zvuka nije tačna. Na Slici 2 prikazan je mikrofonski par sa Slike 1, ali je u ovom slučaju frekvencija analiziranog zvuka nekoliko puta veća. Sa slike se može uočiti da vrednost gradijenta zvučnog pritiska u značajnoj meri odstupa od vrednosti razlike zvučnih pritisaka dobijenih pomoću dva mikrofona.



Slika 2. Ograničenje aproksimacije gradijenta zvučnog pritiska na visokim frekvencijama

Zbog toga se za usvojenu vrednost distancera između mikrofona definiše radni frekvijski opseg u kom je moguće koristiti intenzitetsku sondu za određivanje tačne vrednosti intenziteta zvuka. Drugo ograničenje na visokim frekvencijama predstavlja i pojava difrakcije i sketeringa na samom distanceru i kontaktu sa mikrofonom. U literaturi i praktičnim aplikacijama ustalile su se tri vrednosti distancera koje se koriste i iznose: 8 mm, 12 mm i 50 mm.

III. OPIS I POSTAVKA EKSPERIMENTA

A. Korišćena oprema

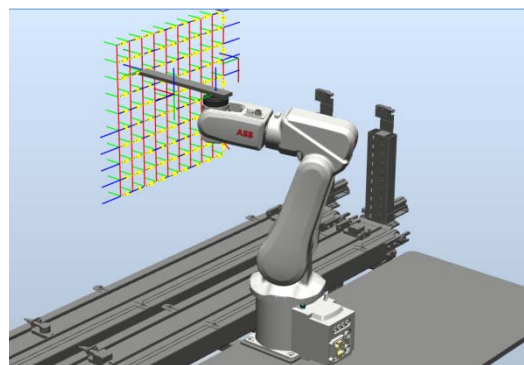
Za merenje intenziteta zvuka korišćena je intenzitetska sonda Brüel & Kjær 3599 sa fazno uparenim mikrofonom [9]. Mikrofon su postavljeni na međusobnom rastojanju od 12 mm, koje je obezbeđeno distancerom između njih. Za veličinu korišćenog distancera merenje intenziteta zvuka biće precizno u opsegu od 250 Hz do 5000 Hz. Za akviziciju signala korišćen je akvizicioni sistem Brüel & Kjær LAN-XI [10]. Prilikom merenja sondom „iz ruke“ na sondu je postavljen graničnik od tankog kartona dužine 8 cm, kako bi se uvek održavalo isto rastojanje od zvučnog izvora. Na ovaj način obezbeđeno je tačnije pozicioniranje sonde, što se u

praktičnim merenjima ne radi, pa je ovakav način ručnog merenja najbolji mogući slučaj.

Kao izvor zvuka u eksperimentima korišćen je DML zvučnik [11]. Rad ovog zvučnika bazira se na emitovanju zvuka ravne tvrde ploče koju pobuđuje mehanički pobuđivač („šejker“) [12]. Ovaj izvor zvuka izabran je jer ima ravnu površinu, pa se merna ravan može postaviti tako da merne tačke imaju isto rastojanje od izvora zvuka. Dodatno, na površini DML zvučnika moguće je nacrtati poziciju mernih tačaka, što olakšava merenje intenziteta u slučaju ručnog merenja. Signal koji se reprodukuje je MLS sekvenca [13] velike dužine trajanja.

U ovoj postavci korišćen je robot ABB IRB 120 [14], koji spada u kategoriju malih industrijskih robota. Ovaj robot ima 6 stepeni slobode i dohvat mu je 0.58 m. Zbog svojih karakteristika idealan je za manje proizvodne linije kao i za laboratorijske primene. Ovaj robot ima mogućnost da se programiranje i testiranje programa može izvršiti u *offline* softverskom paketu Robot Studio [15]. Ovaj softverski paket omogućava unos 3D modela predmeta što omogućava da se na brz i efikasan način kreira program pomoću koga će se vršiti pozicioniranje intenzitetske sonde prilikom merenja zvučnih izvora.

Programski kod koji koristi robot dizajniran je tako da se korisniku omogući jednostavna kontrola, kao i mogućnost izbora pozicije na kojoj se meri intenzitet zvuka. Korisnik bira broj tačaka i površinu merne ravni, a zatim se vrši automatsko raspoređivanje ekvidistantnih tačaka po zadatoj površini. Na Slici 3 prikazan je raspored mernih tačaka i položaj robota u programu Robot Studio. Robot se pozicionira na ivicu merne površine ispred izvora zvuka, nakon čega započinje snimanje. Ekran *teach pendant*-a je interaktivan i na njemu se ispisuju informacije. Takođe, komandama sa ekrana se može pristupiti proizvoljnoj poziciji za snimanje. Ova opcija je korisna ukoliko korisnik smatra da je potrebno izvršiti snimanje na nekoj poziciji naknadno ili ako je došlo do greške prilikom snimanja.



Slika 3. Raspored mernih tačaka u prostoru i robota prikazani u programu Robot Studio

B. Postavka eksperimenata

Merenje je izvedeno u Laboratoriji za robotiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Merenja intenziteta zvuka vršena su u 100 mernih tačaka, raspoređenih tako da čine kvadrat, kao na Slici 4. Rastojanje između

susednih tačaka iznosi 5 cm, čime je postignuta dobra prostorna rezolucija i pokrivena cela površina DML zvučnika. Rastojanje ravni u kojoj je vršeno merenje od ravni zvučnika iznosi 8 cm.

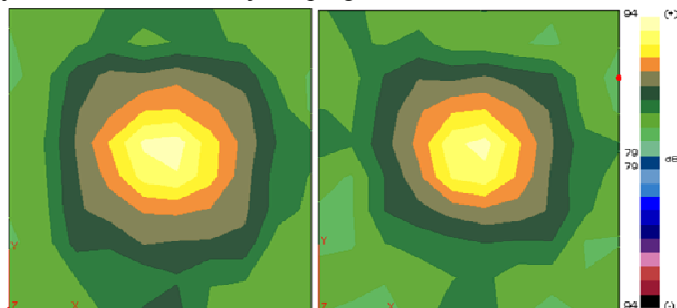
Zvučnik je postavljen na dva stalka i nalazi se ispred robota na čiju ruku je pričvršćena intenzitetska sonda. Intenzitetska sonda se nalazi daleko od zidova i prepreka u prostoriji koji su upravni na osu sonde, čime je izbegnuta pojava reflektovanog zvuka. Nosač kojim je sonda učvršćena za robotsku ruku napravljen je tako da se sonda nalazi daleko od robota, tako da je smanjen uticaj reflektovane energije od robota na mestu merenja. Postavka eksperimenta prikazana je na Slici 4.



Slika 4. Postavka eksperimenta: Robot sa intenzitetskom sondom i DML zvučnik

IV. REZULTATI EKSPERIMENTA I DISKUSIJA

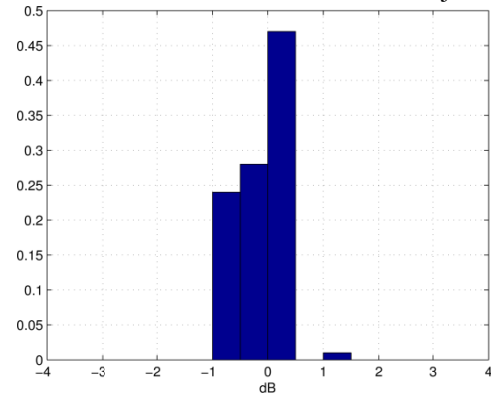
Na Slici 5 prikazan je rezultat merenja intenziteta zvuka DML zvučnika pomoću robota (slika desno) i pomoću ručnog merenja (slika levo). Intenzitet je izražen u dB, a dinamički opseg na slici iznosi 15 dB. Prikazani rezultati dobijeni su za frekventijski opseg od 4 oktave. Frekventijski opseg čine oktave: 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz. Ovaj frekventijski opseg izabran je zato što se nalazi u radnom opsegu intenzitetske sonde sa izabranim distancerom i zato što je ovo i radni frekventijski opseg DML zvučnika.



Slika 5. Nivo intenziteta zvuka dobijen pomoću intenzitetske sonde i ručnog merenja (levo) i merenja pomoću robota (desno)

Na osnovu prikazanih rezultata uočava se da postoje izvesne razlike između dva načina merenja. Kod oba načina merenja maksimum vrednosti intenziteta javlja se na mestu gde je na ploču pričvršćen mehanički pobuđivač. Vrednosti koje se javljaju u okolini maksimuma nisu iste za oba slučaja. Takođe, na mestima gde je ploča zvučnika bila oslonjena o nosače

javljaju se razlike u intenzitetu. Na osnovu Slike 5 može se zaključiti da razlike između ova dva načina merenja postoje, ali se one ne mogu utvrditi kvantitativno. Zbog toga je za kvantifikaciju razlika između pojedinačnih merenja uvedena raspodela razlike intenziteta. Na osnovu rezultata dva merenja intenziteta pronađena je razlika intenziteta za pojedinačne merne tačke i na taj način dobijen je niz podataka dimenzije 100. Za tako dobijene podatke izračunat je histogram sa 10 klasa iste širine. Takođe, za dodatna tumačenja rezultata izračunati su parametri srednja vrednost i standardna devijacija razlike između vrednosti intenziteta za dva merenja.



Slika 6. Normalizovani histogram razlika dva ponovljena merenja intenziteta zvuka pomoću robota

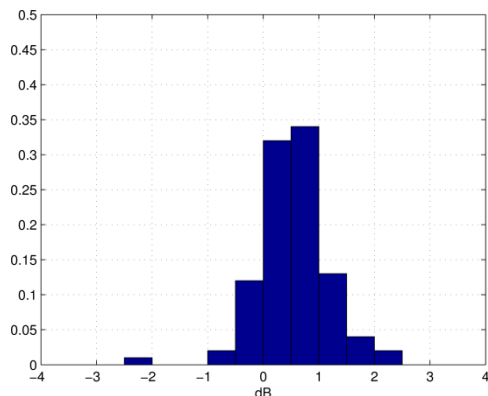
Na Slici 6 prikazan je normalizovani histogram razlika između dva ponovljena merenja intenziteta pomoću robota. Normalizacija je izvršena sa ukupnim brojem mernih tačaka. Korišćenjem robota izvršeno je tačno pozicioniranje sonde prilikom svakog ponovljenog merenja, ali i dalje postoje odstupanja između dva ponovljena merenja. Razlike u pojedinim tačkama postoje zbog drugih efekata koji su objašnjeni u uvodu. Maksimalna vrednost odstupanja u ovom eksperimentu iznose do 1 dB, ali je njihova verovatnoća pojavljivanja mala. U Tabeli 1 date su srednje vrednosti i standardne devijacije za izvedene eksperimente. Iz tabele se vidi da je standardna devijacija, odnosno odstupanje od srednje vrednosti greške, najmanje za eksperiment sa ponavljanjem merenja intenziteta pomoću robota.

TABELA I. STANDARDNA DEVIJACIJA I SREDNJA VREDNOST RAZLIKE IZMEĐU MERENJA

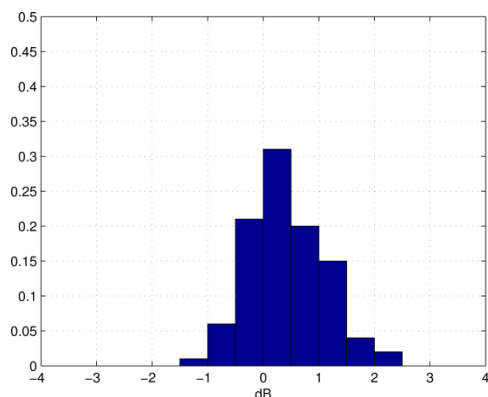
Merenje	Srednja vrednost (dB)	Standardna devijacija (dB)
Robot–Robot	0.149	0.393
Robot –Čovek 1	0.549	0.631
Robot –Čovek 2	0.411	0.697
Čovek 1 – Čovek 1	-0.013	0.487
Čovek 2 –Čovek 2	-0.019	0.855
Čovek 1 –Čovek 2	-0.139	0.545

Na Slikama 7 i 8 prikazani su normalizovani histogrami razlika između ponovljenih merenja pomoću robota i merenjem „iz ruke“ osobe 1 i osobe 2. U ovim eksperimentima postoje odstupanja i preko 2 dB u odnosu na merenje pomoću robota, što je veće dva puta u odnosu na prethodni eksperiment. Postoje izvesne razlike između ova dva grafika, ali su gabariti

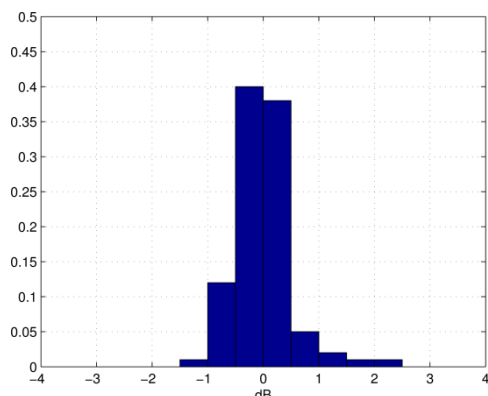
odstupanja približno isti. Na osnovu podataka iz Tabele 1 vidi se da se odstupanja odražavaju i na povećanje standardne devijacije kada se merenje vrši ručno, u odnosu na slučaj kada se koristi robot. Na osnovu rezultata eksperimenta zaključuje se da se pri merenjima intenziteta „iz ruke“ prave dva puta veće greške u odnosu na merenje pomoću robota. Maksimalna vrednost greške pri ponovljenim merenjima pomoću robota iznosila je oko 1 dB, što je posledica faktora koji ne zavise od pozicioniranja. Ukoliko se u merenja koja su vršile osobe unese ovaj podatak zaključuje se da se ručnim merenjem pravi greška u merenju intenziteta od oko 1 dB za pojedine merne tačke.



Slika 7. Normalizovani histogram razlika dva ponovljena merenja intenziteta zvuka pomoću robota i osobe 1



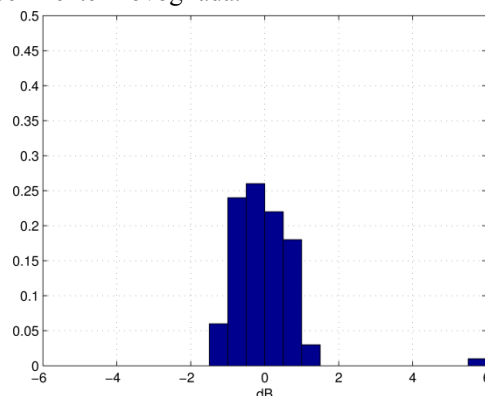
Slika 8. Normalizovani histogram razlika dva ponovljena merenja intenziteta zvuka pomoću robota i osobe 2



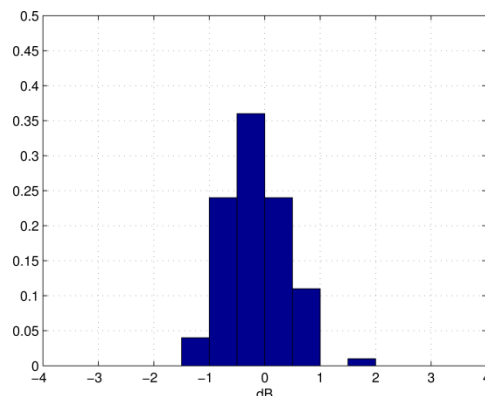
Slika 9. Normalizovani histogram razlika dva ponovljena merenja intenziteta zvuka koja je realizovala osoba 1

Da bi se sagledala odstupanja između ponovljenih merenja pri ručnom pozicioniranju sonde izvršeno je više merenja „iz ruke“ za oba subjekta koja su vršila merenje. Na Slikama 9 i 10 prikazani su normalizovani histogrami razlika između ponovljenih merenja vršenih ručno za osobu 1 i osobu 2. U ovim eksperimentima sa osobom 1 odstupanja su i preko 2 dB u pojedinim mernim tačkama. To znači da se unosi greška od oko 1 dB usled pogrešnog pozicioniranja sonde pri ponovljenim merenjima. Standardna devijacija za ovaj eksperiment je dva puta veća od eksperimenta u kom se ponovljeno merenje vršilo pomoću robota.

U slučaju ponovljenog merenja koje je vršila osoba 2 dobijaju se odstupanjai do 6 dB u pojedinim mernim tačkama. Ova vrednost predstavlja veliko odstupanje, ali pojava ovakvih odstupanja ima malu verovatnoću, što znači da se ovo odstupanje javilo u malom broju mernih tačaka. U ovom eksperimentu standardna devijacija ima najveću vrednost za sve eksperimente iz ovog rada.



Slika 10. Normalizovani histogram razlika dva ponovljena merenja intenziteta zvuka koja je realizovala osoba 2



Slika 11. Normalizovani histogram razlika dva ponovljena merenja intenziteta zvuka koja je realizovala osoba 1 i osoba 2

Na Slici 11 prikazan je normalizovani histogram razlike intenziteta za dva merenja, jedno koje je vršila osoba 1 i drugo koje je vršila osoba 2. Cilj ovog eksperimenta je sagledavanje razlika koje se mogu javiti pri merenju intenziteta istog zvučnog izvora, ali sa različitim osobama koje vrše merenje. Dobijeni rezultati pokazuju da su maksimalna odstupanja oko 2 dB. Standardna devijacija za ovaj eksperiment veća je od standardne devijacije dobijene za eksperiment sa robotom, ali

je porediva sa vrednostima dobijenim za ponovljena merenja koja je vršila ista osoba. To znači da se gabariti očekivanih grešaka kada ponovljena merenja vrši ista i različita osoba ne razlikuju značajno. Razlike između merenja koja su vršile različite osobe postoje, ali njihova vrednost nije velika.

Često se merenje intenziteta zvuka koristi za dobijanje ukupne snage zvučnog izvora tako što se sumiraju intenziteti pojedinih tačaka i ukupan intenzitet pomnoži površinom merne ravni. Ukoliko se takav postupak sprovede nad rezultatima dobijenim pomoću robota, ručnim merenjem osobe 1 i osobe 2 dobijaju se približno iste vrednosti ukupne snage. Dobijene razlike su do 0.5 dB, što predstavlja malu razliku kada je u pitanju zvučna snaga. To znači da ako je cilj merenja ukupna snaga nema velikih razlika između merenja pomoću robota i ručnog merenja. Međutim, kada je cilj sagledavanje raspodele intenziteta zvučnog izvora po prostoru razlike koje se mogu javiti u pojedinim tačkama pri ručnom merenju su i do 6 dB, što predstavlja veliku grešku. U takvim situacijama upotrebom robota se dobija značajno veća tačnost merenja intenziteta.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je upotreba robota za merenje intenziteta zvuka. Korišćenjem robota u ovoj proceduri olakšan je sam postupak merenja, koji je težak i vremenski zahtevan prilikom ručnog merenja intenziteta. Najvažnija prednost korišćenja robota je preciznost i ponovljivost pozicioniranja sonde u odgovarajuće merne tačke. Pokazano je da se upotrebom robota greške prilikom merenja intenziteta mogu smanjiti za 1 dB, u odnosu na slučaj ručnog pozicioniranja sonde. Izvršeni su eksperimenti koji pokazuju da se prilikom ponavljanja procedure ručnog merenja intenziteta mogu pojaviti razlike i do 6 dB u pojedinim mernim tačkama, čak i ako je merenje vršila ista osoba. Prikazana upotreba robota svakako vodi ka povećanju cene aparature potrebne za merenja, ali se time dobija značajno veća tačnost merenja i olakšavanje merne procedure pa se za slučajeve u kojima je tačnost važna upotreba robota opravdana.

LITERATURA

- [1] G. Pavić, „Measurement of sound intensity“, Journal of Sound and Vibration 51(4):533-545, April 1977.
- [2] R. E. Halliwell, A. C. C. Warnock, „Sound Transmission Loss: Comparison of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques“, J. Acoust. Soc. Am. 77, 2094-2103 (1985).
- [3] S. Gade, „Sound Intensity (Part 2 Instrumentation and Applications)“, Brüel & Kjær Technical Review 4, 3-32 (1982).
- [4] S. Gade, „Sound Intensity (Part 1 Theory)“, Brüel & Kjær Technical Review 3, 3-39 (1982).
- [5] M. Bjelić, M. Mijić, M. Stanojević, B. Juranović, „Detekcija nebalansiranosti usisnih grana pomoću intenzitetske sonde“, Kladovo, jun 2017, AKI 2.1.1-AKI 2.1.6, ISBN: 978-86-7466-692-0

- [6] Brüel & Kjær Technical Review, „Sound Intensity“.
- [7] A. Agren, O. Johansson, „Experimental Study of Repeatability Errors in 3D Sound Intensity Measurements in Narrow Frequency Bands“, Applied Acoustics 43, pp. 95-111, 1994.
- [8] K. Young, C. G. Pickin, „Accuracy assessment of the modern industrial robot“, Industrial Robot: An International Journal, Vol. 27 Issue: 6, pp. 427-436, <https://doi.org/10.1108/01439910010378851>, (2000).
- [9] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na: <http://www.bksv.com/products/transducers/acoustic/acoustical-arrays>, pristupano 15.1.2018.
- [10] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-intensity-probes/3599>, pristupano 15.1.2018.
- [11] N. Harris, M. J. Hawksford, „The Distributed-Mode Loudspeaker (DML) as a Broad-Band Acoustic Radiator“, AES Convention:103, Paper Number:4526, September 1997.
- [12] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <http://www.visaton.de/en/products/structure-borne-drivers/ex-60-s-8-ohm>, pristupano 15.1.2018.
- [13] A. Mitra: On the Properties of Pseudo Noise Sequences with a Simple Proposal of Randomness Test, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Scholarly and Scientific Research and Innovation, Vol. 2, No .9, 2008, pp. 631 – 636.
- [14] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC035960-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=LaunchRobotStudio>, pristupano 15.1.2018.
- [15] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <https://library.e.abb.com/public/5eea0b816db44f58a374a27e026378a6/3HAC026932-en.pdf>, pristupano 15.1.2018.

ABSTRACT

This paper presents a procedure for measuring sound intensity using a robotic system. Sound intensity probe is carried by the robotic arm, which performs automatic positioning in defined measurement points. The comparison of measurement results is given for measurements using the robotic arm and two measurements performed by persons carrying the intensity probe in hand, with a goal of determining the discrepancy of the results. Furthermore, measurements were repeated for both the robotic arm and handheld cases, in order to obtain the discrepancy in these two types of scenarios. Using a robotic arm for measuring sound intensity significantly simplifies the measurement process and increases accuracy. This application of the robotic arm can be of interest when measuring the sound intensity of complex sound sources, where measurement has to be performed in a large number of points, and where high accuracy is requested.

AUTOMATED SOUND INTENSITY MEASUREMENT WITH ROBOT AND INTENSITY PROBE.

Miloš Bjelić, Nikola Knežević, Kosta Jovanović