

UNIVERZITET U NIŠU
FAKULTET ZAŠTITE NA RADU

**PRILOG RAZVOJU METODE
ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA
INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA**

doktorska disertacija

KANDIDAT

MR MOMIR PRAŠĆEVIĆ, DIPL. ING.

MENTOR

PROF. DR. DRAGAN CVETKOVIĆ, DIPL. ING.

NIŠ, 2004.

BIOGRAFIJA AUTORA

LIČNI PODACI	IME I PREZIME	Praščević (Ratko) Momir
	DATUM ROĐENJA	15.05.1965
	MESTO ROĐENJA	Peć, Republika Srbija
	ADRESA STANOVANJA	Biokovska 15, Niš, Srbija i Crna Gora
	TEL.	+381 18 529 747; +381 64 1613324
	E-MAIL	momir@zrn fak.zrn fak.ni.ac.yu; momirdb@ptt.yu
OBRAZOVANJE	OSNOVNA ŠKOLA	“Janko Janičević“ u Babiću - Peć (1971/72), “Miladin Popović“ u Peći (1972/73-1974/75), “Ivo Andrić“ u Nišu (1977/75-1978/79)),
	SREDNJA ŠKOLA	Mašinska škola “15. maj“ u Nišu (1979/80-1980/81), Gimnazija “Bora Stanković“ u Nišu (1981/82-1982/83)
	OSNOVNE STUDIJE	Elektrononski fakultet u Nišu, smer – telekomunikacije, (1984/85-1989/90), diplomski rad “Određivanje osetljivosti mikrofona“ odbranjen 7.9.1990., mentor – Prof. dr Miroslava Milošević
	POSLEDIPLOMSKE STUDIJE	Elektrononski fakultet u Nišu, smer – telekomunikacije, (1990/91-1991/92), magistarski rad “Određivanje karakteristika apsorpcionih materijala merenjem intenziteta zvuka“ odbranjen 3.2.1995., mentor – Prof. dr Miroslava Milošević
	DOKTORSKA DISERTACIJA	Odobrena tema za izradu disertacije “Prilog razvoju metode za valorizaciju akustičke emisije izvora buke dvomikrofonskom procedurom merenja intenziteta zvuka u realnim uslovima“ na Fakultetu zaštite na radu u Nišu, 2.7.2001., mentor – Prof. dr Dragan Cvetković
PROFESIONALNA KARIJERA	RADNO ISKUSTVO	Fakultet zaštite na radu u Nišu - asistent-pripravnik (1991-1995), asistent (1995-...) na predmetima Buka i vibracije i Buka u životnoj sredini
	NAUČNO-STRUČNI RAD	<ol style="list-style-type: none"> Projekat Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije u oblasti tehnološkog razvoja br. 231: “Računarski podržan razvoj pneumatika”, potprojekat: Buka u interakciji pneumatik – podloga, kordinator: Mašinski fakultet u Nišu, 2001-2004 Projekat Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije u oblasti tehnološkog razvoja br. 285: “Optimizacija oscilatorne udobnosti malih poljoprivrednih mašina”, kordinator: Fakultet zaštite na radu u Nišu, 2001-2003 Projekat Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije u oblasti osnovnih istraživanja br. 101616: “Realni problemi mehanike”, kordinator: Mašinski fakultet u Nišu, 2001-2004 Projekat Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije u oblasti osnovnih istraživanja br. 101828: “Dinamika i upravljanje aktivnim konstrukcijama”, kordinator: Mašinski fakultet u Nišu, 2001-2004 Projekat WUS-a, CEP 8/2003, “Razvoj i primena ekspertskog sistema za menadžment bukom u životnoj sredini”, 2003 Projekat WUS-a, CEP 73/2002, “Razvoj sistema za praćenje stanja mašinskih sistema na bazi stanja vibracija”, 2002 <p>Autor i koautor 76 naučnih i stručnih radova, objavljenih na međunarodnim i domaćim naučnim skupovima, u međunarodnim i domaćim časopisima. Koautor knjige “Buka i vibracije – zbirka zadataka sa teorijskom osnovama“, Niš, 1999.</p>
	ČLANSTVO U PROFESIONALNIM UDRUŽENJIMA	International Institute of Acoustics and Vibration – Auburn University, USA; Evropska asocijacija akustičara; Društvo akustičara Srbije – Beograd; Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije – Beograd.

ABSTRACT

The primary parameter used to describe and declare the noise source emission – the emission sound pressure level is defined as sound pressure level under free field condition at the specified positions that depends on the type and character of noise source. In according to European directives and international standards related to noise sources, each producer of machines, devices and equipment has to declare the sound power level of his products, if the emission sound pressure level exceeds 85dB(A). Therefore, the emission sound pressure level becomes a parameter, which must be determined and whose value assigns the necessity of determination of other acoustical quantities aimed to define the noise source emission.

The limitations and disadvantages of standardized methods for determination of emission sound pressure level of noise source had determined the scope, subject and aim of investigation in dissertation “*Contribution to development of method for valorization of noise source acoustic emission by two-microphone sound intensity measurement in situ*”, through definition and experimental verification of an alternative method for the emission sound pressure level determination. The alternative method is based on approximation of the emission sound pressure level by sound intensity component in direction of two-microphone measurement probe axis *in situ*.

The assumed approximation is based on the fact that measurement sound intensity probe, located in vicinity of noise source, detect the sound intensity that equals the sum of the direct wave intensity of the sound source alone and the reflected waves intensity. By creating the conditions where in ordinary room the hypotheses of diffuse character of sound field, deduced on the basis of multi reflection existence and long duration of sound waves are valid, the vector sum of sound intensity component of reflected waves is very close to zero value at any position in a given room. In this condition, when the intensity of reflected waves is neglected to the intensity of direct wave, the sound intensity probe detect only direct wave.

In this way, the sound pressure level under free field condition corresponding to the emission sound pressure level can be measured, principally, by approximation of sound intensity detect by measurement probe.

The experimental investigations that were carried out aimed to confirm the assumed approximation and determine the uncertainty of defined measurement method by comparison with the results obtained using the standardized methods for the determination of emission sound pressure level in free field condition.

Based on defined aim, the investigations that had been carried out were directed towards searching for answers on questions related to influence of the following factors to uncertainty and reliability suggested method:

- dynamic-frequency characteristics of acoustic emission of noise source,
- noise source directivity,
- noise source location under test,
- measurement point under test,
- sound intensity probe directivity,
- diffusivity and reactivity of sound filed in environment,
- room boundaries reflections,
- reproducibility of measurement procedure.

The experimental investigations have been realized by:

- determination of dynamic-frequency range of reliability sound intensity measurement by selected measurement chain,
- defining of acoustic emission of reference source by sound power,
- defining of acoustic emission of reference source by emission sound pressure level in free field over a reflecting plane and *in situ*,
- defining reliability of measurement results obtained during determination of the emission sound pressure level by sound intensity method.

The results obtained during the investigation as well as drawn conclusions define the scientific contribution of this dissertation:

- In theoretical investigation through comprehensive and detailed analysis of:
 - the noise source by noise generation mechanisms definition, mathematical presentation of monopole and dipole source, source classification according to its characteristic and definition of basic parameters for describing acoustic emission;

- the standardized methods for the determination of emission sound pressure level of noise source and definition of the choice procedure of appropriate methods related to the source type under test and available measurement environment;
- the sound intensity as a indicator of sound energy propagation through definition of the sound intensity in real and complex domain and classification of vector fields in relation to curl and divergence of active and reactive intensity component;
- the basic sound intensity measurement principles and systems through definition of dynamic-frequency range of reliability sound intensity measurement deriving analytic equations for determination of the lower and upper limit frequency of measurement reliability range and definition of the procedure for dynamic range determination;
- In experimental investigation of the methods for acoustic processes valorization by:
 - definition of methods basic elements and measurement procedures and their verification in the following fields (using mostly the results obtained during investigation):
 - the acoustic activity of sound source (noise source);
 - the identification of predominant noise source;
 - the sound power transmission through partitions;
 - the sound absorption of materials;
 - the specific acoustic impedance of materials;
- In experimental investigation of the methods for definition of acoustic emission of noise source by:
 - defining the alternative method for the determination of emission sound pressure level through approximation by sound intensity component in direction of two-microphone measurement probe axis *in situ*.
 - defining the measurement procedure that can be applied *in situ*, in rooms with acoustic characteristics that do not satisfy the necessary conditions for the application of the standardized methods for measurements of emission sound pressure level.
 - defining the uncertainty of measurement methods related to the following parameters:
 - the location of noise source under test,
 - the location of measurement point,
 - the reactivity and diffusivity index of sound field in measurement environment,
 - the directivity index of noise source under test and sound intensity measurement probe,
 - the measurement uncertainty providing that the standard deviation of measurement results reproducibility fits the requirements of class of engineering methods.

Finally, the procedures of investigation process have defined the method based on the physical laws of sound energy generation and propagation, that enable fast, accurate and reliable determination of emission sound pressure level generating in the exploitation process of noise source during operational conditions and environment where noise source is located.

Suggested method of emission sound pressure level determination by two-microphone sound intensity measurement enable further investigation in direction of:

- I. The verification of suggested method through application of the following measurement procedure on different types noise source and in different measurement environment:
 - a. The sound intensity component measurement by two-microphone measurement probe.
 - b. The determination of time uniformity of sound field by indicator F_I .
 - c. The determination of reactivity index of sound field by indicator δ_{pI} .
 - d. The determination of measurement results uncertainty.
 - e. The determination of emission sound pressure level using equation:

$$L'_p = L_I \pm 2\sigma$$

- II. The application of suggested method for determination of radiation directivity of noise source under test *in situ*.
- III. The application of suggested method in correlation analysis of the parameters of noise source acoustic emission and the noise generation mechanisms aimed to creating mathematical model of noise source.

Key words: noise source, acoustic emission, sound power, emission sound pressure level, sound intensity, sound intensity measurement, two-microphone probe.

REZIME

Primarni parametar koji se koristi za opisivanje i deklarisanje emisije izvora buke - nivo zvučnog pritiska emisije, definiše se kao nivo zvučnog pritiska koji bi postojao u uslovima slobodnog zvučnog polja, na definisanoj poziciji koja zavisi od vrste i karaktera izvora buke. U skladu sa evropskim direktivama i međunarodnim standardima, koje se odnose na potencijalne izvore buke, svaki proizvođač mašina, uređaja i opreme čiji nivo zvučnog pritiska emisije premašuje 85dB(A), mora da deklarise nivo zvučne snage. Stoga, veličina nivoa zvučnog pritiska emisije postaje parametar koji mora biti određen i čija vrednost opredeljuje neophodnost određivanja i drugih akustičkih veličina koje definišu emisiju izvora buke.

Specifičnost standardizovanih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke, sa svim svojim ograničenjima i nedostacima, opredelila je područje, predmet i cilj istraživanja u disertaciji *“Prilog razvoju metode za valorizaciju akustičke emisije izvora buke dvomikrofonskom procedurom merenja intenziteta zvuka u realnim uslovima”*, kroz definisanje i eksperimentalnu verifikaciju alternativnog metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije. Alternativni metod se zasniva na aproksimaciji nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke komponentom intenziteta zvuka u pravcu ose dvomikrofonске merne sonde u realnim ambijentalnim uslovima.

Pretpostavljena aproksimacija bazira se na činjenici da merna sonda za intenzitet zvuka, smeštena u neposrednoj blizini izvora buke, detektuje intenzitet zvuka koji je jednak sumi intenziteta direktnog talasa, koji potiče od samog izvora i intenziteta reflektovanih talasa. Stvaranjem uslova da u prostoriji proizvoljnog oblika važe hipoteze o difuznom karakteru zvučnog polja, koje su izvedene na osnovu postojanja višestrukih refleksija i dugog zadržavanje zvučnih talasa u prostoriji, vektorska suma komponenti intenziteta zvuka reflektovanog talasa je bliska nuli u bilo kojoj tački. U ovim uslovima, kada je intenzitet reflektovanih talasa zanemarljiv u poređenju sa intenzitetom direktnog talasa, sonda za intenzitet zvuka registruje samo direktan zvuk.

Na ovaj način, nivo zvučnog pritiska koji bi postojao u slobodnom zvučnom polju, a koji odgovara nivou zvučnog pritiska emisije izvora, principijelno je moguće meriti aproksimacijom nivoom intenziteta zvuka koji registruje merna sonda.

Sprovedena eksperimentalna istraživanja imala su za cilj potvrdu pretpostavljene aproksimacije i određivanje preciznosti definisane merne metode, kompariranjem sa rezultatima dobijenim standardizovanim metodama određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije izvora u uslovima slobodnog zvučnog polja.

Na osnovu definisanog cilja, istraživanja su sprovedena u pravcu traženja odgovora na pitanja o uticaju sledećih faktora na preciznost i pouzdanost predložene metode:

- dinamičko-frekvencijskih karakteristika akustičke emisije izvora buke,
- direktivnosti izvora buke,
- položaja izvora buke pri ispitivanju,
- položaja merne tačke pri ispitivanju,
- direktivnosti sonde za intenzitet zvuka,
- difuznosti i reaktivnosti zvučnog polja mernog okruženja,
- refleksije graničnih površina prostorije, i
- ponovljivosti merne procedure.

Eksperimentalna istraživanja su realizovana kroz:

- određivanje dinamičko-frekvencijskog opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka izabranim mernim lancem,
- definisanje akustičke emisije referentnog izvora zvučnom snagom,
- definisanje akustičke emisije referentnog izvora nivoom zvučnog pritiska emisije u uslovima slobodnog i realnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni,
- definisanje pouzdanosti mernih rezultata pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije metodom intenziteta zvuka.

Dobijeni rezultati u istraživačkom procesu, kao i iskazani zaključci, određuju naučni doprinos urađene disertacije:

- U teorijskom delu istraživanja u sveobuhvatnoj, obimnoj i detaljnoj analizi:

- izvora buke kroz definisanje mehanizama generisanja buke, matematičku prezentaciju jednopolnih i dipolnih izvora, podelu izvora prema njihovim karakteristikama i definisanje osnovnih parametara za opisivanje akustičke emisije;
- standardizovanih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke i definisanjem procedura za izbor adekvatne metode u funkciji tipa ispitivanog izvora i raspoloživog mernog okruženja;
- intenziteta zvuka kao indikatora prostiranja zvučne energije kroz definisanje intenziteta u realnom i kompleksnom domenu i klasifikaciju vektorskih polja u funkciji rotora i divergencije aktivne i reaktivne komponente intenziteta;
- osnovnih mernih principa i sistema za intenzitet zvuka kroz definisanje dinamičko-frekvencijskog opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka, izvođenjem analitičkih izraza za određivanje donje i gornje granične frekvencije opsega pouzdanog merenja i definisanje procedure za određivanje dinamičkog opsega;
- U eksperimentalnom delu istraživanja metoda za valorizaciju akustičkih procesa u:
 - definisanju metodskih osnova, mernih procedura i njihovoj verifikaciji, uglavnom korišćenjem dobijenih rezultata u istraživačkom procesu, u oblasti:
 - akustičke aktivnosti izvora zvuka (buke);
 - identifikacije dominantnih izvora buke;
 - zvučne izolacije pregradnih konstrukcija;
 - zvučne apsorpcije apsorpcionih materijala;
 - specifične akustičke impedance apsorpcionih materijala;
- U eksperimentalnom delu istraživanja metoda za definisanje akustičke emisije izvora buke u:
 - definisanju alternativnog metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije aproksimacijom komponentom intenziteta zvuka u pravcu ose dvomikrofonske merne sonde u realnim ambijentalnim uslovima.
 - definisanju merne procedure koja se može aplikovati i u terenskim uslovima, u prostorijama koje po svojim akustičkim karakteristikama ne zadovoljavaju uslove za primenu standardizovanih metoda za merenje nivoa zvučnog pritiska emisije.
 - definisanju preciznosti mernog metoda u funkciji sledećih parametara:
 - pozicije ispitivanog izvora buke,
 - pozicije merne tačke,
 - indeksa reaktivnosti i difuznosti zvučnog polja u mernom okruženju,
 - indeksa direktivnosti ispitivanog izvora buke i merne sonde za intenzitet zvuka,
 - merne nesigurnosti koja obezbeđuje da standardna devijacija ponovljivosti mernih rezultata odgovara klasi tačnosti inženjerskih metoda.

Procedure sprovedenog istraživačkog procesa u konačnom su definisali postupak zasnovan na fizičkim zakonima generisanja i prenosa zvučne energije, koji brzo, precizno i pouzdano omogućuje određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije koja nastaje u procesu eksploatacije izvora buke, u eksploatacionim uslovima i u realnim ambijentima gde su izvori smešteni.

Definisani postupak određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije merenjem intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom omogućuje dalja istraživanja u pravcu:

- I. Verifikacije definisanog postupka kroz primenu sledeće merne procedure na različite tipove izvora buke u različitim mernim okruženjima:
 - a. Merenje komponente intenziteta zvuka dvomikrofonskom sondom.
 - b. Određivanje vremenske promenljivosti zvučnog polja indikatorom F_I .
 - c. Određivanje indeksa reaktivnosti zvučnog polja indikatorom δ_{pl} .
 - d. Određivanje preciznosti mernih rezultata.
 - e. Određivanje vrednosti nivoa zvučnog pritiska emisije primenom izraza: $L'_p = L_I \pm 2\sigma$
- II. Primene definisanog postupka pri određivanju direktivnosti zračenja ispitivanih izvora buke u realnim ambijentima.
- III. Primene definisanog postupka u korelacionoj analizi parametara akustičke emisije izvora buke i mehanizama generisanja buke u cilju formiranja matematičkog modela izvora buke.

Ključne reči: izvori buke, akustička emisija, zvučna snaga, nivo zvučnog pritiska emisije, intenzitet zvuka, merenje intenziteta zvuka, dvomikrofonaska sonda.

SADRŽAJ

BIOGRAFIJA AUTORA.....	II
ABSTRACT	III
REZIME.....	V
SADRŽAJ	VII
SPISAK SLIKA	X
SPISAK TABELA.....	XIII
1. UVOD.....	1
1.1 CILJ ISTRAŽIVANJA	3
1.2 METOD ISTRAŽIVANJA.....	4
1.3 OČEKIVANI REZULTATI ISTRAŽIVANJA	5
1.4 STRUKTURA DISERTACIJE.....	5
2. IZVORI BUKE	7
2.1 MEHANIZMI GENERISANJA BUKE.....	8
2.2 MATEMATIČKA PREZENTACIJA IZVORA.....	9
2.2.1 Jednopolni izvori.....	9
2.2.2 Dipolni izvor	11
2.3 VRSTE IZVORA BUKE	12
2.3.1 Izvori buke sa konstantnim protokom.....	12
2.3.2 Izvori buke sa konstantnim silom	13
2.3.3 Izvori buke sa konstantnom snagom.....	14
2.4 AKUSTIČKA EMISIJA IZVORA BUKE	16
2.4.1 Zvučna snaga	16
2.4.2 Karakteristika usmerenosti.....	17
2.4.3 Zvučni pritisak emisije.....	20
3. STANDARDIZOVANE METODE ZA ODREĐIVANJE NIVOA ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE	23
3.1 DIREKTNE METODE.....	24
3.1.1 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima slobodnog zvučnog polja	25
3.1.2 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima realnog zvučnog polja	26
3.1.3 Korekcije izmerenih vrednosti zvučnog pritiska.....	28
3.1.3.1 Korekcija zbog pozadinske buke.....	28
3.1.3.2 Korekcija zbog lokalnog mernog okruženja	28
3.1.3.3 Indikator zvučnog polja u mernom okruženju	31
3.2 INDIREKTNE METODE	32
3.2.1 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije na osnovu zvučne snage izvora buke.....	32
3.3 PROCEDURE ZA IZBOR METODE ZA ODREĐIVANJE NIVOA ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE	33

4. INTENZITET ZVUKA - INDIKATOR PROSTIRANJA ZVUČNE ENERGIJE	37
4.1 DEFINICIJA INTENZITETA ZVUKA	38
4.2 INTENZITET ZVUKA RAVNIH TALASA	39
4.2.1 Progresivni ravni talas	41
4.2.2 Čist stojeći talas	43
4.2.3 Stojeći talas	44
4.3 KOMPLEKSNI INTENZITET	45
4.3.1 Definicija kompleksnog intenziteta	45
4.3.2 Kompleksni intenzitet kao vektorska veličina	46
4.4 KLASIFIKACIJA VEKTORSKOG POLJA INTENZITETA ZVUKA	48
5. FREKVENCIJSKI OPSEG POUZDANOG MERENJA INTENZITETA ZVUKA	52
5.1 PRINCIPI MERENJA INTENZITETA ZVUKA	53
5.1.1 p-u princip	53
5.1.2 p-p princip	55
5.2 SISTEMI ZA MERENJE INTENZITETA ZVUKA	57
5.2.1 Sistemi za direktno merenje intenziteta zvuka	58
5.2.2 Sistemi za indirektno merenje intenziteta zvuka	59
5.3 OGRANIČENJA FREKVENCIJSKOG OPSEGA POUZDANOG MERENJA	60
5.3.1 Gornja granična frekvencija	61
5.3.2 Donja granična frekvencija	63
5.3.3 Dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja intenziteta zvuka	66
5.4 PROŠIRENJE FREKVENCIJSKOG OPSEGA	68
5.4.1 Povećanje gornje granične frekvencije	68
5.4.2 Smanjenje donje granične frekvencije	70
5.4.2.1 Promena mesta mikrofona	71
5.4.2.2 Fazna kompenzacija	71
6. DIJAGNOSTIKA AKUSTIČKIH PROCESA - METOD INTENZITETA ZVUKA	74
6.1 VALORIZACIJA AKUSTIČKE AKTIVNOSTI IZVORA	75
6.1.1 Metodska osnova	75
6.1.2 Merna procedura	76
6.1.2.1 Merenje intenziteta zvuka u diskretnim tačkama	77
6.1.2.2 Merenje intenziteta zvuka skeniranjem	78
6.1.3 Eksperimentalni rezultati	79
6.2 IDENTIFIKACIJA DOMINANTNIH IZVORA BUKE	82
6.2.1 Komparacija spektara intenziteta zvuka	82
6.2.2 Nulti metod	83
6.2.3 Rangiranje komponenti izvora buke	83
6.2.4 Mapiranje vektora intenziteta zvuka	84
6.2.5 Mapiranje normalne komponente vektora intenziteta zvuka	85
6.3 IZOLACIONA MOĆ PREGRADNIH KONSTRUKCIJA	86
6.3.1 Metodska osnova	86
6.3.2 Merna procedura	87

6.3.3 Eksperimentalni rezultati	88
6.4 KOEFICIJENT APSORPCIJE - FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA	90
6.4.1 Metodska osnova	90
6.4.2 Merna procedura	91
6.4.3 Eksperimentalni rezultati	92
6.5 KOEFICIJENT APSORPCIJE - JEDNOBROJNO IZRAŽAVANJE	94
6.5.1 Procedura određivanja jednobrojne vrednosti.....	94
6.5.2 Eksperimentalni rezultati	94
6.6 SPECIFIČNA AKUSTIČKA IMPEDANCA.....	95
6.6.1 Metodska osnova	96
6.6.2 Merna procedura	96
6.6.3 Eksperimentalni rezultati	97
7. VALORIZACIJA NIVOA ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE - METOD INTENZITETA ZVUKA	99
7.1 METODSKA OSNOVA.....	100
7.2 MERNÁ PROCEDURA	103
7.2.1 Merno okruženje	103
7.2.2 Merna oprema	106
7.3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI ISTRAŽIVAČKOG PROCESA.....	107
7.3.1 Dinamičko-frekvencijski opseg mernog lanca.....	107
7.3.2 Određivanje nivoa zvučne snage referentnog izvora	110
7.3.3 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora.....	114
7.3.3.1 <i>Merenje u slobodnom zvučnom polju iznad reflektujuće ravni.....</i>	<i>116</i>
7.3.3.2 <i>Merenje u realnom zvučnom polju.....</i>	<i>121</i>
7.3.4 Pouzdanost mernih rezultata	125
7.3.4.1 <i>Indikator reaktivnosti zvučnog polja</i>	<i>125</i>
7.3.4.2 <i>Indikator difuznosti zvučnog polja.....</i>	<i>126</i>
7.3.4.3 <i>Indikator direktivnosti referentnog izvora</i>	<i>126</i>
7.3.4.4 <i>Indikator direktivnosti merne sonde</i>	<i>127</i>
7.3.4.5 <i>Ponovljivost rezultata</i>	<i>128</i>
8. ZAKLJUČAK.....	130
8.1 OSTVARENI REZULTATI U ISTRAŽIVAČKOM PROCESU.....	131
8.1.1 Dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja	131
8.1.2 Zvučna snaga referentnog izvora	132
8.1.3 Nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora	132
8.1.4 Pouzdanost mernih rezultata	133
8.2 DOPRINOS DISERTACIJE.....	134
8.3 PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA	135
LITERATURA.....	137
PRILOG	143

SPISAK SLIKA

Sl. 2.1	<i>Elektroakustički model jednopolnog izvora</i>	9
Sl. 2.2	<i>Elektroakustički model jednopolnog izvora, unutrašnja kao pobuda sila</i>	10
Sl. 2.3	<i>Elektroakustički model dipolnog izvora</i>	11
Sl. 2.4	<i>Ilustracija odnosa zvučne snage izvora i intenziteta zvuka</i>	17
Sl. 2.5	<i>Oblasti zračenja izvora buke</i>	18
Sl. 2.6	<i>Karakterisitika usmerenosti izvora buke</i>	19
Sl. 2.7	<i>Sistem izvor buke - prostorija</i>	21
Sl. 2.8	<i>Izvor buke unutar izolovane površine S</i>	21
Sl. 2.9	<i>Zvučno polje pobuđeno spoljnom pobudnom silom koja deluje na površinu S</i>	21
Sl. 3.1	<i>Korekcija lokalnog mernog okruženja K_3 u funkciji A/a^2</i>	29
Sl. 3.2	<i>K_{3j} u funkciji K_2 i $L_j - \bar{L}$</i>	30
Sl. 3.3	<i>K_{3j} u funkciji A/S i $L_j - \bar{L}$</i>	30
Sl. 3.4	<i>Algoritam za izbor metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije</i>	34
Sl. 3.5	<i>Ograničenja primene standardizovanih metoda</i>	36
Sl. 4.1	<i>Prostorna raspodela akustičkih veličina za progresivni ravni talas</i>	42
Sl. 4.2	<i>Prostorna raspodela akustičkih veličina za stojeći talas</i>	43
Sl. 4.3	<i>Fazorsko predstavljanje kompleksnog intenziteta zvuka</i>	46
Sl. 4.4	<i>Orijentacija vektora reaktivnog intenziteta</i>	47
Sl. 4.5	<i>Prostorni dijagram aktivne i reaktivne komponente intenziteta zvuka</i>	48
Sl. 4.6	<i>Prostorni dijagram (a) aktivne i (b) reaktivne komponente intenziteta zvuka za slučaj prostiranja zvučnih talasa kroz kanal</i>	51
Sl. 5.1	<i>Sonda za merenje intenziteta zvuka na p-u principu</i>	53
Sl. 5.2	<i>Ilustracija stanja brzine čestica u različitim vremenskim intervalima</i>	54
Sl. 5.3	<i>Sonda za merenje intenziteta zvuka na p-p principu</i>	55
Sl. 5.4	<i>Aproksimacija gradijenta pritiska konačnom razlikom</i>	56
Sl. 5.5	<i>Skica Olsonovog sistema za merenje intenziteta zvuka</i>	57
Sl. 5.6	<i>Skica Olsonovog sistema za merenje intenziteta zvuka sa pojasnim filterima i pisačem</i>	58
Sl. 5.7	<i>Blok dijagram sistema za direktno merenje intenziteta zvuka a) sa analognim filterima b) sa digitalnim filterima</i>	59
Sl. 5.8	<i>Blok dijagram sistema za indirektno merenje intenziteta zvuka</i>	60
Sl. 5.9	<i>Ilustracija greške zbog aproksimacije gradijenta konačnom razlikom pritiska</i>	61
Sl. 5.10	<i>Greška aproksimacije konačnom razlikom</i>	62
Sl. 5.11	<i>Fazna greška za fazno kašnjenje mernih kanala 0.3°</i>	64
Sl. 5.12	<i>Fazna greška za fazno kašnjenje mernih kanala -0.3°</i>	64
Sl. 5.13	<i>Fazno-reaktivni nomogram</i>	65
Sl. 5.14	<i>Dijagram za izbor optimalne konfiguracije merne sonde</i>	67
Sl. 5.15	<i>Dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja</i>	68
Sl. 5.16	<i>Povećanje zvučnih pritisaka na poziciji $\frac{1}{2}$-mikrofona merne sonde zbog difrakcije i rezonanse u šuplinama</i>	69
Sl. 5.17	<i>Rezultujuća greška merne sonde sa $\frac{1}{2}$-mikrofonima za aksijalnu incidenciju ravnih talasa i različita rastojanja mikrofona</i>	70
Sl. 5.18	<i>Rezultujuća greška merne sonde sa $\frac{1}{2}$-mikrofonima i kompaktnim umetkom od 12mm za različite uglove incidencije zvučnih talasa</i>	70

Sl. 5.19	<i>Raspored mikrofona pri određivanju rezidualnog intenziteta i indeksa reaktivnosti mernog sistema</i>	72
Sl. 5.20	<i>Ilustracija rezidualnog intenziteta mernog sistema</i>	72
Sl. 6.1	<i>Princip merenja zvučne snage</i>	76
Sl. 6.2	<i>Zvučna snaga referentnog zvučnog izvora model, B&K 4224, pri optimalnim uslovima eksploatacije</i>	80
Sl. 6.3	<i>Merno-ispitni sto</i>	80
Sl. 6.4	<i>Merna površina</i>	81
Sl. 6.5	<i>Komparacija nivoa zvučne snage zupčaste pumpe za ispitivane režime rada</i>	82
Sl. 6.6	<i>Komparacija spektara intenziteta zvuka</i>	83
Sl. 6.7	<i>Nulti metod</i>	83
Sl. 6.8	<i>Merenje intenziteta zvuka na segmentima merne površine</i>	84
Sl. 6.9	<i>Rangiranje komponenti izvora buke kod motorne testere</i>	84
Sl. 6.10	<i>Mapiranje vektora intenziteta zvuka na dizel mašini</i>	85
Sl. 6.11	<i>Mapiranje normalne komponente vektora intenziteta zvuka na poklopcu mini kombija</i>	85
Sl. 6.12	<i>Procedura merenja izolacione moći pregradne konstrukcije metodom intenziteta zvuka</i>	88
Sl. 6.13	<i>Izolaciona moć pregrade</i>	89
Sl. 6.14	<i>3-D grafici i izofonske konture ispitivane pregradne konstrukcije</i>	89
Sl. 6.15	<i>Frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije neimpregrirane kamene vune zapreminske gustine 50kg/m³</i>	93
Sl. 6.16	<i>Frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije impregirane kamene vune zapreminske gustine 100kg/m³</i>	93
Sl. 6.17	<i>Merenje specifične akustičke impedance u anehoičnoj prostoriji</i>	96
Sl. 6.18	<i>Realni R_s i imaginarni X_s deo normalizovane specifične akustičke impedance neimpregrirane kamene vune zapreminske gustine 50kg/m³</i>	98
Sl. 6.19	<i>Realni R_s i imaginarni X_s deo normalizovane specifične akustičke impedance impregirane kamene vune zapreminske gustine 100kg/m³</i>	98
Sl. 7.1	<i>Oblasti zračenja izvora buke smeštenog u prostoriju</i>	101
Sl. 7.2	<i>Ukupni registrovani intenzitet zvuka sondom za intenzitet zvuka</i>	102
Sl. 7.3	<i>Postavljanje reflektujuće ravni u anehoičnu prostoriju</i>	104
Sl. 7.4	<i>Vreme reverberacije mernog okruženja MO2 sa standardnom devijacijom izmerenih rezultata</i>	105
Sl. 7.5	<i>Granični radijus mernog okruženja MO2</i>	105
Sl. 7.6	<i>Pozadinski nivo buke u mernom okruženju MO2</i>	106
Sl. 7.7	<i>Rezidualni indeks reaktivnosti mernog lanca za različite konfiguracije sonde</i>	108
Sl. 7.8	<i>Pozicije izvora i merne sonde u proceduri provere frekvencijskog opsega pouzdanog merenja mernog lanca</i>	108
Sl. 7.9	<i>Intenzitet zvuka na rastojanju 60cm od referentnog izvora (a) slabljenje izlaznog signala izvora - 15dB; (b) slabljenje izlaznog signala izvora - 25dB</i>	109
Sl. 7.10	<i>Dinamički opseg pouzdanog merenja mernog lanca</i>	110
Sl. 7.11	<i>Distribucija mernih pozicija na mernoj površini pri određivanju zvučnesnage referentnog izvora</i>	111
Sl. 7.12	<i>Indeks reaktivnosti zvučnog polja kompariran sa vrednostima dinamičkog opsega pouzdanog merenja mernog lanca: a) spektar 1 b) spektar 2</i>	112
Sl. 7.13	<i>Nivo zvučne snage referentnog izvora - spektar 1</i>	113
Sl. 7.14	<i>Nivo zvučne snage referentnog izvora - spektar 2</i>	114

Sl. 7.15	<i>Položaj referentnog izvora pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije u slobodnom zvučnom polju iznad reflektujuće ravni</i>	115
Sl. 7.16	<i>Merne pozicije pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije a) referentni izvor na podu (RS:F); b) referentni izvor na postolju (RS:T)</i>	115
Sl. 7.17	<i>Odstupanje dobijenih vrednosti A-nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora metodom intenziteta zvuka i metodom zvučnog pritiska u mernom okruženju MO1</i>	118
Sl. 7.18	<i>Frekvencijska analiza nivoa zvučnog pritiska emisije primenom različitih metoda</i>	120
Sl. 7.19	<i>Odstupanje dobijenih vrednosti A-nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora metodom intenziteta zvuka i metodom zvučnog pritiska u mernom okruženju MO2</i>	122
Sl. 7.20	<i>Frekvencijska analiza nivoa zvučnog pritiska emisije primenom različitih metoda</i>	123
Sl. 7.21	<i>Indeks reaktivnosti zvučnog polja za mernu tačku na rastojanju 0.5m od ose referentnog izvora kompariran sa vrednostima dinamičkog opsega mernog lanca</i>	124
Sl. 7.22	<i>Indeks reaktivnosti zvučnog polja poređen sa odstupanjima mernih rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti</i>	125
Sl. 7.23	<i>Indeks difuznosti zvučnog polja poređen sa odstupanjima mernih rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti</i>	126
Sl. 7.24	<i>Indeks direktivnosti referentnog izvora poređen sa odstupanjima mernih rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti</i>	127
Sl. 7.25	<i>Ispitivanje uticaja direktivnosti merne sonde na pouzdanost rezultata</i>	128
Sl. 7.26	<i>Nivo zvučnog pritiska emisije u funkciji orijentacije merne sonde</i>	128
Sl. 7.27	<i>Standardna devijacija rezultata (sa maksimalnom greškom) dobijena primenom metode intenziteta zvuka</i>	129
Sl. A.1	<i>Algoritam za određivanje nivoa zvučne snage metodom merenja intenziteta zvuka u diskretnim tačkama</i>	144
Sl. A.2	<i>Algoritam procedure za određivanje nivoa zvučne snage metodom merenja intenziteta zvuka skeniranjem segmenata merne površine</i>	146
Sl. B.1	<i>Režim ispitivanja pume – broj obrtaja 1150 %/min, pritisak 100bara a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage; b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage</i>	149
Sl. B.2	<i>Režim ispitivanja pume – broj obrtaja 1150 %/min, pritisak 150bara a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage; b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage</i>	150
Sl. B.3	<i>Režim ispitivanja pume – broj obrtaja 1150 %/min, pritisak 200bara a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage; b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage</i>	151
Sl. B.4	<i>Režim ispitivanja pume – broj obrtaja 1900 %/min, pritisak 100bara a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage; b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage</i>	152
Sl. B.5	<i>Režim ispitivanja pume – broj obrtaja 1900 %/min, pritisak 150bara a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage; b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage</i>	153
Sl. B.6	<i>Režim ispitivanja pume – broj obrtaja 1900 %/min, pritisak 200bara a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage; b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage</i>	154

SPISAK TABELA

Tabela 2.1	<i>Prostorni ugao zračenja u funkciji lokacije izvora buke</i>	19
Tabela 3.1	<i>Aproksimativne vrednosti srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije</i>	31
Tabela 3.2	<i>Pregled standardizovanih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije</i>	35
Tabela 5.1	<i>Gornja granična frekvencija pouzdanog merenja za različita međusobna rastojanja mikrofona merne sonde</i>	63
Tabela 5.2	<i>Donja granična frekvencija pouzdanog merenja za različita međusobna rastojanja mikrofona merne sonde, reaktivnosti zvučnog polja i faznog kašnjenja</i>	66
Tabela 6.1	<i>Nivo zvučne snage referentnog zvučnog izvora B&K 4224 u dB(A)</i>	80
Tabela 6.2	<i>Težinski koeficijent apsorpcije i klasa apsorpcije kamene vune</i>	95
Tabela 6.3.	<i>Jednbrojne vrednosti koeficijenta apsorpcije dobijene metodom intenziteta</i>	95
Tabela 7.1	<i>Ukupni nivoi zvučne snage referentnog izvora sa indikatorima zvučnog polja</i>	113
Tabela 7.2	<i>Rastojanje mernih tačaka od akustičkog centra referentnog izvora</i>	116
Tabela 7.3	<i>Ukupni nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar1) određen u mernom okruženju MO1</i>	117
Tabela 7.4	<i>Ukupni nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar2) određen u mernom okruženju MO1</i>	117
Tabela 7.5	<i>Ukupni nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar2) određen u mernom okruženju MO2</i>	122
Tabela 7.6	<i>Standardna devijacija rezultata određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije metodom intenziteta</i>	129
Tabela A.1	<i>Mere za povećanje stepena tačnosti procedure određivanja zvučne snage primenom ISO 9614-1</i>	145
Tabela A.2	<i>Vrednosti faktora C (ISO 9614-1)</i>	145
Tabela A.3	<i>Mere za povećanje stepena tačnosti procedure određivanja zvučne snage primenom ISO 9614-2</i>	147
Tabela B.1	<i>Nivo zvučne snage zupčaste pumpe 3155.503.95Č u [dB] za različite režime rada, određen metodom merenja intenziteta zvuka u diskretnim mernim tačkama</i>	148
Tabela C.1	<i>Vreme reverberacije u [s] nastavne učionice Laboratorije za buku i vibracije Fakulteta zaštite na radu</i>	155
Tabela C.2	<i>Frekvencijski spektar zvučne snage u [dB] referentnog izvora buke - kataloške vrednosti</i>	156
Tabela C.3	<i>Rezidualni indeks reaktivnosti u [dB] mernog lanca</i>	157
Tabela C.4	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 1) u skladu sa ISO 3745</i>	158
Tabela C.5	<i>Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 1) u skladu sa ISO 9614-1 (MO1)</i>	159
Tabela C.6	<i>Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 1) u skladu sa ISO 9614-1 (MO2)</i>	160
Tabela C.7	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 2) u skladu sa ISO 3745</i>	161
Tabela C.8	<i>Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 2) u skladu sa ISO 9614-1 (MO1)</i>	162
Tabela C.9	<i>Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 2) u skladu sa ISO 9614-1 (MO2)</i>	163

Tabela D.1	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1 (RS:F) u [dB]</i>	164
Tabela D.2	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2 (RS:F) u [dB]</i>	165
Tabela D.3	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3 (RS:F) u [dB]</i>	166
Tabela D.4	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1' (RS:T) u [dB]</i>	167
Tabela D.5	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2' (RS:T) u [dB]</i>	168
Tabela D.6	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3' (RS:T) u [dB]</i>	169
Tabela D.7	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 1 (RS:F) u [dB]</i>	170
Tabela D.8	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 2 (RS:F) u [dB]</i>	171
Tabela D.9	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 3 (RS:F) u [dB]</i>	172
Tabela D.10	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 1' (RS:T) u [dB]</i>	173
Tabela D.11	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 2' (RS:T) u [dB]</i>	174
Tabela D.12	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 3' (RS:T) u [dB]</i>	175
Tabela E.1	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1 (RS:F) u [dB]</i>	176
Tabela E.2	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2 (RS:F) u [dB]</i>	177
Tabela E.3	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3 (RS:F) u [dB]</i>	178
Tabela E.4	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1' (RS:T) u [dB]</i>	179
Tabela E.5	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2' (RS:T) u [dB]</i>	180
Tabela E.6	<i>Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3' (RS:T) u [dB]</i>	181
Tabela E.7	<i>Indikator lokalnog mernog okruženja K_3 u [dB] za merno okruženje MO2</i>	182
Tabela E.8	<i>Nivo zvučnog pritiska emisije u [dB] za različite orijentacije merne sonde ka referentnom izvoru</i>	183
Tabela E.9	<i>Rezultati ispitivanja ponovljivosti merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora, u [dB], u mernoj tački 2 (RS:F)</i>	184

1

UVOD

CILJ ISTRAŽIVANJA

METOD ISTRAŽIVANJA

OČEKIVANI REZULTATI ISTRAŽIVANJA

STRUKTURA DISERTACIJE

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

Ekspanzija razvoja društva praćena zahtevima za zaštitom radne i životne sredine u sistemu upravljanja kvalitetom i okolinom, uslovljavaju da kvalitet proizvoda i tehnološke opreme predstavlja opredeljujući faktor za proizvođača u ciju obezbeđenja poverenja partnera i uspeha na otvorenom svetskom tržištu.

U različitim fazama razvoja, pojam kvaliteta je menjao svoje značenje. U početnoj fazi razvoja proizvoda, koja odgovara nižem tehničko-tehnološkom nivou razvoja društva, kao karakteristike kvaliteta proizvoda i opreme definišu se samo osnovne, pre svega tehničke, koje zadovoljavaju osnovne zahteve funkcionisanja proizvoda. U daljoj fazi razvoja proizvoda, zahvaljujući dostignutom civilizacijskom nivou, neke, u ranijem periodu, sporedne karakteristike postale su osnovne, pa čak i dominantne.

Ekspanzija proizvoda i opreme koji generišu neželjeni zvuk, odnosno buku, kao i značajan porast nivoa buke u radnoj i životnoj sredini, uslovio je da aspekt buke postane značajan, za neke proizvode čak i dominantan, pokazatelj kvaliteta. Visoke vrednosti nivoa buke proizvoda i opreme siguran su pokazatelj njihovog nižeg kvaliteta, niže preciznosti i pouzdanosti, kao i niže konkurentnosti na tržištu.

Aktuelizacija aspekta buke ostvaruje novu sferu interesovanja, borbu protiv buke, koja uključuje sve segmente društva od proizvođača, montažera, distributera, krajnjeg korisnika do državnih organa zaduženih za pripremu i sprovođenje nacionalnih i međunarodnih propisa i preporuka koji ograničavaju dozvoljene nivoe buke.

Podizanje ukupnog kvaliteta i snižavanje nivoa buke, pre svega, uslovljava savremeni koncept razvoja *“tihih proizvoda i tehnološke opreme”*. Ovaj koncept obuhvata razvoj tihih mašina, sklopova i agregata, na osnovu novih kinematskih rešenja, poboljšanih konstrukcionih oblika i dinamičkih karakteristika, novih materijala, pasivnih i aktivnih metoda za prigušenje i apsorpciju zvučne energije.

U daljoj eksploataciji *“tihih proizvoda i tehnološke opreme”*, posebno je značajna pravilno korišćenje i održavanje, uz kontrolu parametara emisije buke i njihovo zadržavanje u propisanim granica u čitavom radnom veku.

Proizvodnja *“tihih proizvoda i tehnološke opreme”* i kontrola parametara emisije buke, zahteva postojanje relevantnih akustičkih informacija o emisiji buke koje se obezbeđuju deklarisanjem i verifikacijom akustičkih vrednosti emisije buke. Do akustičkih informacija o emisiji buke dolazi se merenjima koja su validna ako se izvršavaju korišćenjem standardizovane opreme, pod definisanim uslovima, i ako, kao rezultat daju vrednosti koje poseduju osobinu ponovljivosti i koje definišu tražene akustičke veličine.

Podaci o vrednostima emisije buke koriste se za:

- deklarisanje nivoa buke proizvoda i tehnološke opreme pod definisanim uslovima,
- verifikaciju deklarisanih vrednosti,
- komparaciju emisije buke proizvoda i tehnološke opreme različitih tipova i veličina,
- komparaciju sa dozvoljenim vrednostima definisanim propisima i pravilnicima,
- inženjerski rad na smanjenju emisije buke izvora, i
- predikciju buke na definisanim pozicijama u okviru definisanih okruženja.

Podatke o vrednostima emisije buke izvora mogu koristiti:

- konstruktori pri definisanju željenih osobina novog koncepta proizvoda,
- korisnik ili kupac koji želi da upoređuje slične proizvode na tržištu prema nivou emisije buke,

- radne grupe koje pripremaju standarde koji se odnose na bezbednost proizvoda i tehnološke opreme,
- državni organi za pripremu propisa i pravilnika o dozvoljenim emisionim vrednostima nivoa buke,
- proizvođači za kontrolu kvaliteta svojih proizvoda, i
- akustički konsultanti kojima su ovi podaci neophodni za ocenu nivoa buke pri korišćenju proizvoda u različitim okruženjima.

1.1 CILJ ISTRAŽIVANJA

Za opisivanje emisije buke proizvoda i tehnološke opreme, koriste se dve komplementarne veličine:

- nivo zvučne snage izvora buke, i
- nivo zvučnog pritiska emisije izvora buke na definisanoj poziciji, najčešće poziciji operatera.

Primarni parametar koji se koristi za opisivanje i deklarisanje emisije izvora buke - nivo zvučnog pritiska emisije, definiše se kao nivo zvučnog pritiska koji bi postojao u uslovima slobodnog zvučnog polja, na definisanoj poziciji koja zavisi od vrste i karaktera izvora buke. U skladu sa evropskim direktivama i međunarodnim standardima, koje se odnose na potencijalne izvore buke, svaki proizvođač mašina, uređaja i opreme čiji nivo zvučnog pritiska emisije premašuje 85dB(A), mora da deklariše nivo zvučne snage. Stoga, veličina nivoa zvučnog pritiska emisije postaje parametar koji mora biti određen i čija vrednost opredeljuje neophodnost određivanja i drugih akustičkih veličina koje definišu emisiju izvora buke.

Danas su u upotrebi, uglavnom, standardizovane metode za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije koje se baziraju na seriji međunarodnih standarda ISO 11200. Pomenuti standardi su zasnovani na metodu merenja nivoa zvučnog pritiska pod tačno definisanim uslovima okruženja u kojima se vrši testiranje izvora buke. Merenje se može vršiti u specijalno definisanim prostorijama (anehoične prostorije) ili u običnim prostorijama, kada je potrebno izmereni zvučni pritisak korigovati zbog neželjenog uticaja pozadinske buke i refleksija okruženja.

Metod određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije u skladu sa ISO 11201, predstavlja najprecizniji metod, ali podrazumeva korišćenje anehoičnih prostorija koje su dosta retki i veoma skupi ambijenti. Takođe, gabariti anehoične prostorije ograničavaju veličinu ispitivanog izvora buke.

Terenske metode merenja u skladu sa ISO 11202 i 11204 podrazumevaju aproksamaciju realnog polja difuznim poljem, što prouzrokuje značajna standardna odstupanja dobijenih rezultata i svrstavanje ovih metoda u klasu preglednih metoda. Za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u realnim uslovima potrebno je eliminisati uticaj pozadinskog zvuka i refleksije okruženja, izuzev refleksije zvuka od ravni koja se koristi pri testiranju izvora buke.

Specifičnost prethodno razmatranih standardizovanih metoda, sa svim svojim ograničenjima i nedostacima, opredelila je cilj istraživanja u disertaciji, kroz definisanje i eksperimentalnu verifikaciji alternativnog metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije. Alternativni metod se zasniva na aproksimaciji nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke komponentom intenziteta zvuka u pravcu ose dvomikrofonске merne sonde u realnim ambijentalnim uslovima. Sprovedena eksperimentalna istraživanja imaju za cilj potvrdu pretpostavljene

aproksimacije i određivanje preciznosti definisane merne metode, kompariranjem sa rezultatima dobijenim standardizovanim metodama određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije izvora u uslovima slobodnog zvučnog polja.

Na osnovu definisanog cilja, istraživanja su sprovedena u pravcu traženja odgovara na pitanja o uticaju sledećih faktora na preciznost i pouzdanost predložene metode:

- dinamičko-frekvencijskih karakteristika akustičke emisije izvora buke,
- direktivnosti izvora buke,
- položaja izvora buke pri ispitivanju,
- položaja merne tačke pri ispitivanju,
- direktivnosti sonde za intenzitet zvuka,
- difuznosti i reaktivnosti zvučnog polja mernog okruženja,
- refleksije graničnih površina prostorije, i
- ponovljivosti merne procedure.

1.2 METOD ISTRAŽIVANJA

Kada se izvor buke instalira u prostoriju paralelopipednog oblika, generiše zvučno polje koje sadrži dve komponente: direktno i reverberaciono zvučno polje. Direktno zvučno polje zadržava sve akustičke informacije koje izvor buke predaje akustičkom okruženju, bez promena usled ambijentalnih uticaja. Jedine promene koje nastaju u strukturi direktnog zvučnog polja nastaju kao posledica opadanja zvučne energije zbog prostiranja talasnog fronta. Nivo energije zvučnih talasa zavisi samo od zvučne snage izvora buke i opada sa rastojanjem po linearnom zakonu - 6dB sa udvostručavanjem rastojanja od izvora buke.

Na rastojanjima od izvora buke koja su veća od graničnog radijusa, dominira druga komponenta zvučnog polja - reverberaciono polje. Reverberaciono polje čine sve ostale komponente koje do određene tačke u prostoriji stižu nakon direktnog zvučnog talasa i uključuju sve refleksije zvučnih talasa od graničnih površina prostorija, počev od prvih refleksija do reverberacije. Reflektovani zvuk sadrži, takođe, akustičke informacije koje emituje izvor buke, ali one pri svakoj refleksiji, trpe frekvencijski zavisne energetske promene usled apsorpcije prostorije. Nivo reflektovanog zvuka zavisi ne samo od nivoa zvučne snage izvora buke instaliranog u prostoriji, već i od karakteristika same prostorije, pre svega apsorpcionih i geometrijskih.

Sonda za intenzitet zvuka smeštena u neposrednoj blizini izvora buke, detektuje intenzitet zvuka koji je jednak sumi intenziteta direktnog talasa, koji potiče od samog izvora i intenziteta reflektovanih talasa.

Postojanje višestrukih refleksija i dugo zadržavanje zvučnih talasa u prostoriji omogućava uvođenje sledećih hipoteza:

- **H1:** *U svakoj tački prostorije dolazi istovremeno mnoštvo talasa koji su prešli različite puteve pa samim tim imaju različite amplitude i fazne stavove.*
- **H2:** *Svi pravci prostiranja su podjednako zastupljeni što znači da se zvuk prostire u svim pravcima podjednakom verovatnoćom.*
- **H3:** *Svaki talas u svom kretanju kroz prostoriju, prođe dovoljno blizu svake tačke prostorije.*

Stvaranjem uslova da u prostoriji proizvoljnog oblika važe navedene hipoteze, vektorska suma komponenti intenziteta zvuka reflektovanog talasa je bliska nuli u bilo kojoj tački. U ovim uslovima kada je intenzitet reflektovanih talasa zanemarljiv u poređenju sa intenzitetom direktnog talasa, merna sonda registruje samo direktan zvuk.

Na ovaj način je principijelno moguće meriti nivo zvučnog pritiska koji bi postojao u slobodnom zvučnom polju, koji odgovara nivou zvučnog pritiska emisije izvora, aproksimacijom nivoom intenziteta zvuka koji registruje sonda za intenzitet zvuka.

Merenjem intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom određuje se komponenta intenziteta zvuka u pravcu ose merne sonde. Merna sonda registruje pored količine, i pravac prostiranja zvučne energije. S obzirom na karakteristiku direktivnosti merne sonde u obliku osmice, i postavljene hipoteze, merna sonda će u prostoriji registrovati samo direktan talas, dok se komponente reflektovanog talasa, koje dolaze iz suprotnih smerova, u odnosu na orijentaciju merne sonde, poništavaju.

1.3 OČEKIVANI REZULTATI ISTRAŽIVANJA

- Definisane alternativnog metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije aproksimacijom komponentom intenziteta zvuka u pravcu ose dvomikrofonske merne sonde u realnim ambijentalnim uslovima.
- Definisane merne procedure koja se može aplikovati i u terenskim uslovima, u prostorijama koje po svojim akustičkim karakteristikama ne zadovoljavaju uslove za primenu standardizovanih metoda za merenje nivoa zvučnog pritiska emisije.
- Definisane preciznosti mernog metoda u funkciji sledećih parametara:
 - pozicije ispitivanog izvora buke,
 - pozicije merne tačke,
 - indeksa reaktivnosti i difuznosti zvučnog polja,
 - indeksa direktivnosti ispitivanog izvora buke i merne sonde za intenzitet zvuka.
- Definisane merne nesigurnosti mernog metoda koja treba da obezbedi da standardna devijacija ponovljivosti mernih rezultata odgovara klasi tačnosti inženjerskih metoda.
- Procedure sprovedenog istraživačkog procesa bi u konačnom trebalo da izgrade postupak zasnovan na fizičkim zakonima generisanja i prenosa zvučne energije, koji brzo, precizno i pouzdano omogućuje određivanje emisije buke koja nastaje u procesu eksploatacije proizvoda i tehnološke opreme.

1.4 STRUKTURA DISERTACIJE

Disertacija, pored uvodne glave, sadrži još šest glava i prilog, u kojima se razrađuje postavljeni problem, od teorijskog okvira do eksperimentalnih istraživanja.

U drugoj glavi, "*Izvori buke*", definisan je pojam izvora buke, dat je matematički model za jednopolni i dipolni izvor buke i izvršena je podela izvora buke prema mehanizmima generisanja buke. Na kraju su prikazane akustičke veličine koje se koriste za definisanje akustičke emisije izvora buke: zvučna snaga, karakteristika usmerenosti i nivo zvučnog pritiska emisije.

U trećoj glavi, "*Standardizovane metode za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije*", prikazane su standardizovane metode za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima slobodnog i realnog zvučnog polja, zasnovane na merenju nivoa zvučnog pritiska. Dat je algoritam za izbor odgovarajuće metode u zavisnosti od karaktera ispitivanog izvora, raspoloživog mernog okruženja i zahtevane preciznosti mernih rezultata.

U četvrtoj glavi, "*Intenzitet zvuka - indikator prostiranja zvučne energije*", dat je pojam intenziteta zvuka kao vektorske veličine koja pored količine zvučne energije opisuje i pravac njenog prostiranja. Definisani su intenzitet zvuka kao kompleksna veličina, uvođenjem pojma aktivnog i reaktivnog intenziteta zvuka. Na osnovu divergencije i rotora komponenti kompleksnog intenziteta zvuka izvršena je klasifikacija zvučnih polja u četiri grupe.

U petoj glavi, "*Frekvencijski opseg pouzdanog merenja intenziteta zvuka*", definisani su osnovni principi i sistemi za merenje intenziteta zvuka. Posebno je obrađen dvomikrofonski princip merenja, zasnovan na aproksimaciji gradijenta pritiska konačnom razlikom zvučnih pritisaka na pozicijama mernih mikrofona. Ukazano je na potencijalne merne greške koje mogu nastati pri merenju i definisan je dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja intenziteta zvuka izvođenjem relacija za gornju i donju graničnu frekvenciju. Pokazano je, na bazi istraživanja pri merenju nivoa zvučne snage, da je moguće proširenje frekvencijskog opsega pouzdanog merenja kao i merenje intenziteta zvuka jednom konfiguracijom merne sonde.

U šestoj glavi, "*Dijagnostika akustičkih procesa - metod intenziteta zvuka*", prikazani su uglavnom sopstveni rezultati u primeni intenziteta zvuka u dijagnostici akustičkih procesa generisanja, prenošenja i prijema zvučne energije. Date su methodske osnove, merne procedure i primeri primene intenziteta zvuka u određivanju nivoa zvučne snage izvora, identifikaciji dominantnih izvora buke, definisanju izolacionih i apsorpcionih karakteristika materijala i određivanju specifične akustičke impedance.

U sedmoj glavi, "*Valorizacija nivoa zvučnog pritiska emisije - metod intenziteta zvuka*", na osnovu postavljenih hipoteza o karakteru zvučnog polja u okolini izvora buke, koji je smešten u prostoru proizvoljnog oblika, definisan je metod za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije izvora aproksimacijom komponentom intenziteta zvuka u pravcu dvomikrofonske merne sonde, što omogućuje direktno određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u realnim ambijentalnim uslovima. Data je merena procedura sa svim karakteristikama mernih okruženja, izvora buke i merne opreme. Pokazano je da dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja korišćene opreme dozvoljava da se merenje nivoa zvučnog pritiska emisije može vršiti sa jednom konfiguracijom merne sonde, koja podrazumeva korišćenje 1/2" mikrofona na međusobnom rastojanju od 12mm. Prikazani su i analizirani dobijeni rezultati u eksperimentalnoj proceduri verifikacije predloženog postupka određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije, kao i pri istraživanju uticaja određenih faktora na preciznost i ponovljivost mernih rezultata. Dobijeni rezultati u uslovima realnog ambijenta komparirani su sa referentnim vrednostima koji su dobijeni u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni, a primenom standardizovane metode.

U prilogu su dati svi rezultati merenja dobijeni u eksperimentalnoj proceduri.

2

IZVORI BUKE

MEHANIZMI GENERISANJA BUKE

MATEMATIČKA PREZENTACIJA IZVORA BUKE

VRSTE IZVORA BUKE

AKUSTIČKA EMISIJA IZVORA BUKE

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

Izvori buke generišu zvučna polja, međusobno veoma različita po svojim vremenskim i prostornim karakteristikama, određene prirodom, oblikom i lokacijom mehanizama generisanja buke, kao i osobinama medijuma kroz koji se buka prostire. Detaljno opisivanje bilo kojeg, pa i najprostijeg zvučnog polja nije lako ostvarljivo. Ukoliko je cilj opisivanje energetskih osobina zvučnog polja dovoljno je izvršiti klasifikaciju oblika i oblasti zvučnog polja na osnovu skupa kvalitativnih indikatora. U tom smislu potrebno je prvo odgovoriti na pitanje šta je izvor buke, pre svega zbog činjenice da ne postoji univerzalni kriterijum za diskretizaciju složenih generatora buke na pojedinačne izvore. Umesto toga, izvori buke se različito razvrstavaju u zavisnosti od posmatranih fizičkih efekata njihovog dejstva na okruženje.

2.1 MEHANIZMI GENERISANJA BUKE

Izvor buke je ona tačka u zvučnom polju sa koje se deluje silom koja vrši poremećaj sredine i saopštava zvučnu energiju delićima okolne elastične sredine. Dakle, pod izvorima buke podrazumevaju se generatori zvučne energije čiji produkt pored, fizičkih karakterisika (zvučni pritisak, intenzitet zvuka, frekvencija...) ostvaruje i psihofiziološke senzacije koje se manifestuju kao neželjeni i neprijatan zvuk ili šum.

Izvori buke, različiti po svojim fizičkim oblicima i karakteristikama, mogu izazvati veoma različite poremećaje stacionarnog stanja čestica elastične sredine u kojoj se nalazi izvor. Mehanizmi generisanja buke kojima izvori predaju energiju okolnoj elastičnoj sredini mogu biti različiti. Postoje četiri osnovna oblika generisanja buke [56]:

- vibracije površina krutih tela,
- prinudna pulsiranja vazdušne struje,
- turbulencije u fluidima, i
- brza termička dejstva.

Kod realnih izvora buke koji se sreću u čovekovom okruženju česte su kombinacije više mehanizma generisanja buke. Taj slučaj se javlja u procesu rada raznih mašina i uređaja. Oni se ponašaju kao složeni izvori u čijem radu se mogu prepoznati karakteristike različitih mehanizama generisanja buke.

Generisanje buke vibracijama površina krutih tela može se opisati klipom čije pomeranje izaziva poremećaje elastične sredine. Generisanje i prostiranje poremećaja nastaje mehaničkim guranjem medija elastične sredine, odnosno kompresijom i ekspanzijom dovoljno brzim kretanjem tvrde površine. Karakteristični primeri ove vrste izvora buke su kućišta mašina čiji zidovi generišu buku, kao i pregradni zid koja razdvaja dve prostorije.

Proces generisanja buke prinudnim pulsiranjem vazdušne struje ima dva stepena, odnosno podprocesa: stvaranje struje fluida koji se nalazi u jednolikom kretanju i rad mehaničkog sistema koji dovoljno velikom brzinom na neki način fizički preseca tu struju. Zbog načina na koji je realno moguće izvesti presecanje vazdušne struje dovoljno velikom brzinom, buka koja nastaje na ovakav način karakteriše se osnovnom frekvencijom i postojanjem većeg broja viših harmonika. Osnovnu frekvenciju određuje broj presecanja struje fluida u sekundi. Na ovom principu generišu buku, između ostalih, zvučne sirene i ventilatori kod kojih jedna komponenta buke presecanjem struje vazduha njegovim lopaticama.

Turbulencije u fluidu mogu nastati fizičkim uticajem prepreka na ravnomerni tok fluida. Svako odstupanje od ravnomernosti proticanja koja pri tome nastaju predstavlja poremećaj koji se manifestuje oscilacijama čestica elastične sredine. Oscilacije čestica generišu buku

koja se od mesta nastanka dalje širi kroz fluid. Karakterističan predstavnik ove kategorije stvaranja generisanja buke je buka aviona koja nastaje usled turbulencije vazduha pri kretanju aviona. Turbulencijama nastaje i buka na ventilacionim rešetkama i buka usled kretanje vode u vodovodnim kanalima.

Prethodno definisani mehanizmi generisanja buke stvaraju poremećaj u mediju elastične sredine lokalnom promenom njegove gustine. Međutim, buka može nastati i lokalnim promenama temperature medija, ako se one izvode dovoljno brzo. Primeri ovakvog generisana je buka koju stvara plamen raznih gorionika (uključuju i pucketanje sveće koja gori), prasak varnice i slično.

2.2 MATEMATIČKA PREZENTACIJA IZVORA

Najveći broj izvora buke može se modelirati kombinacijom jednopolnih i dipolnih izvora, primenom modela admitance i impedance, respektivno. Pri tome se modeli primenjuju na izvore u čijem okruženju ne postoje drugi izvori.

2.2.1 Jednopolni izvori

Jednačina kontinuiteta za idealni homogeni fluid, u kome se nalazi jednapolni izvor kao generator zvuka, ima oblik [2,3]:

$$\mathbf{div}\vec{v} + C_0 \frac{\partial p}{\partial t} = q, \quad (2.1)$$

gde je: p [Pa] - zvučni pritisak, v [m/s^2] - brzina čestica elastične sredine, $C_0 = 1/(\rho_0 c_0^2)$ [ms^4/kg] - zapreminski moduo stišljivosti i q [1/s] - protok po jedinici zapremine.

Uz pretpostavku da je protok po jedinici zapremine različit od nule, samo u zapremini V koja obuhvata jednapolni izvor, dobija se ukupni protok Q [m^3/s] kao:

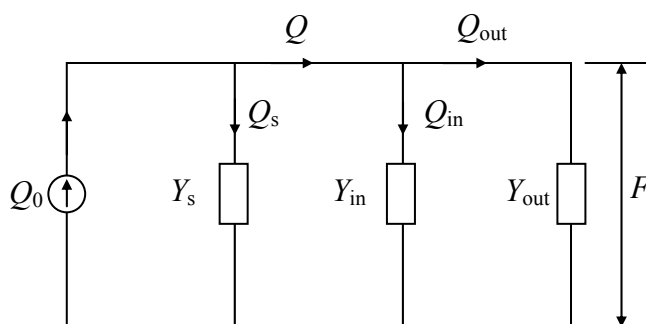
$$Q = \int_V q dV = \int_V (\mathbf{div}\vec{v} + C_0 \frac{\partial p}{\partial t}) dV = \oint_S \vec{v} \cdot \vec{n} dS + C_0 \int_V \frac{\partial p}{\partial t} dV, \quad (2.2)$$

gde je: S [m^2] - površina koja obuhvata zapreminu V , a \vec{n} - jedinični vektor normalan na površinu S , usmeren ka okruženju izvora.

Prvi izraz u jednačini (2.2) predstavlja protok usmeren ka okruženju izvora Q_{out} , a drugi izraz unutrašnji protok izvora Q_{in} , tako da je:

$$Q = Q_{\text{in}} + Q_{\text{out}}. \quad (2.3)$$

Pretpostavka da je ukupni protok Q generisan pobudnim protokom Q_0 ($|Q_0| > Q$) omogućava predstavljanje jednačine (2.3) elektroakustičkim modelom, prikazanim na na sl. 2.1.



Sl. 2.1 Elektroakustički model jednapolnog izvora [96]

Admitance u prikazanom modelu na sl. 2.1 računaju se kao:

$$\begin{aligned} Y_s &= Q_s / F = 1/Z_s, \\ Y_{in} &= Q_{in} / F = 1/Z_{in}, \\ Y_{out} &= Q_{out} / F = 1/Z_{out}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

gde je: F [N] - sila koja deluje na graničnu površinu zapremine izvora V , a Q_s - deo pobudnog protoka koji deluje na unutrašnju admitancu pobudnog mehanizma.

Koristeći prikazani elektroakustički model, može se odrediti protok ka okruženju izvora, kao i sila koja deluje na površinu izvora:

$$\begin{aligned} Q_{out} &= \frac{Y_{out}}{Y_s + Y_{in} + Y_{out}} Q_0, \\ F &= \frac{1}{Y_s + Y_{in} + Y_{out}} Q_0. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Zvučna snaga koju emituje izvor može se odrediti kao [96]:

$$P_{out} = \frac{1}{S} \mathbf{Re}(FQ_{out}^*) = \frac{|Q_0|^2}{S} \frac{G_{out}}{|Y_s + Y_{in} + Y_{out}|}, \quad (2.6)$$

gde je: G_{out} - realni deo admitance Y_{out} , $Y_{out} = G_{out} + jB_{out}$.

Pri proučavanju strukturalnog zvuka definisane su dve nove veličine [61]:

- S_D (*sound description*) - veličina koja je funkcija samog izvora, i
- C_F (*coupling function*) - veličina koja opisuje vezu zvučnog polja izvora i spregnutih struktura.

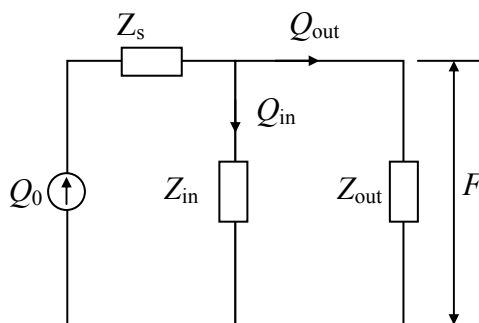
Primenjene na opisani elektroakustički model ove funkcije se mogu izračunati [61]:

$$\begin{aligned} S_D &= \frac{|Q_0|^2}{S} \frac{1}{Y_s + Y_{in}}, \\ C_F &= \frac{(Y_s + Y_{in})Y_{out}^*}{(Y_s + Y_{in} + Y_{out})^2}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Zvučna snaga koja se emituje može se izraziti pomoću prethodno definisanih veličina:

$$P_{out} = \mathbf{Re}(S_D C_F), \quad (2.8)$$

Ako je pobuda, umesto pobudnog protoka Q_0 , unutrašnja sila F_0 , dobija se elektroakustički model prikazan na sl. 2.2.



Sl. 2.2 Elektroakustički model jednopolnog izvora, unutrašnja sila kao pobuda [96]

Prikazana šema na sl. 2.2 ekvivalentna je šemi prikazanoj na sl. 2.1, ako se F_0 definiše kao:

$$F_0 = Z_s Q_0, \quad (2.9)$$

2.2.2 Dipolni izvor

Jednačina kretanja za idealni homogeni fluid, sa dipolnom izvorom kao generatorom zvuka, ima oblik [2,3]:

$$\mathbf{grad}p + \rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{f}, \quad (2.10)$$

gde je: f [N/m³] - sila po jedinici zapremine, a ρ_0 [kg/m³] - gustina fluida

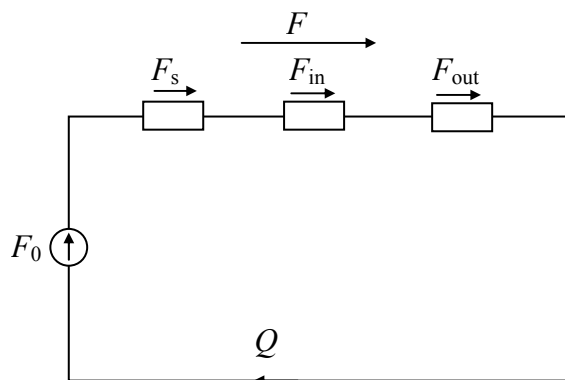
Uz pretpostavku da je sila po jedinici zapremine različita od nule samo u zapremini V koja obuhvata dipolni izvor, dobija se ukupna sila F [N] kao:

$$\vec{F} = \int_V \vec{f} dV = \int_V (\mathbf{grad}p + \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}) dV = \oint_S p \vec{n} dS + \rho_0 \int_V \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} dV, \quad (2.11)$$

Prvi izraz u jednačini (2.11) predstavlja silu usmerenu ka okruženju izvora F_{out} , a drugi unutrašnju silu izvora F_{in} , pa je:

$$\vec{F} = \vec{F}_{in} + \vec{F}_{out}. \quad (2.12)$$

Pretpostavka da je ukupna sila F generisana pobudnom silom F_0 ($|F_0| > F$) omogućava predstavljanje jednačine (2.12) elektroakustičkim modelom prikazanim na sl. 2.3.



Sl. 2.3 Elektroakustički model dipolnog izvora [96]

Impedance u prikazanom modelu računaju se kao:

$$\begin{aligned} Z_s &= F_s / Q, \\ Z_{in} &= F_{in} / Q, \\ Z_{out} &= F_{out} / Q, \end{aligned} \quad (2.13)$$

gde je: F_s - deo pobudne sile koja deluje na unutrašnju impedancu pobudnog mehanizma.

Koristeći prikazani elektroakustički model, može se odrediti protok ka okruženju izvora, kao i sila koja deluje na površinu izvora:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{Z_s + Z_{in} + Z_{out}} F_0, \\ F_{out} &= \frac{Z_{out}}{Z_s + Z_{in} + Z_{out}} F_0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Zvučna snaga koju emituje izvor može se odrediti kao [96]:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{S} \mathbf{Re}(F_{\text{out}} Q_{\text{t}}^*) = \frac{|F_0|^2}{S} \frac{R_{\text{out}}}{|Z_s + Z_{\text{in}} + Z_{\text{out}}|}, \quad (2.15)$$

gde je: R_{out} - realni deo impedance Z_{out} , $Z_{\text{out}} = R_{\text{out}} + jX_{\text{out}}$.

Primenjene na opisani elektroakustički model, funkcije S_D i C_F se mogu izračunati kao [61]:

$$S_D = \frac{|F_0|^2}{S} \frac{1}{(Z_s + Z_{\text{in}})^*}, \quad (2.16)$$

$$C_F = \frac{(Z_s + Z_{\text{in}})^* Z_{\text{out}}}{|Z_s + Z_{\text{in}} + Z_{\text{out}}|^2}.$$

Zvučna snaga koja se emituje može se izraziti pomoću prethodno definisanih veličina kao:

$$P_{\text{out}} = \mathbf{Re}(S_D C_F), \quad (2.17)$$

2.3 VRSTE IZVORA BUKE

Suštinsko pitanje pri merenju zvučne snage izvora i nivoa zvučnog pritiska emisije je vrsta izvora buke, pri čemu tip izvora pokazuje kako se izvor ponaša u različitim situacijama. Izvori buke se mogu podeliti u četiri grupe:

- izvori sa konstantnim protokom - generišu uvek isti protok u bilo kojem okruženju,
- izvori sa konstantnom silom - generišu uvek istu silu na površini izvora,
- izvori sa konstantnom snagom - generišu uvek istu snagu bez obzira na okruženje i druge izvore, i
- ostali izvori koji ne pripadaju ni jednoj od navedenih grupa.

2.3.1 Izvori buke sa konstantnim protokom

Korišćenjem admitancnog modela (sl. 2.1), mogu se definisati uslovi tako da jednopolni izvor bude sa konstantnim protokom. Uz pretpostavku da je pobudni protok Q_0 nezavistan od spoljnog okruženja, da bi izvor bio sa konstantnim protokom, potrebno je da protok Q_{out} bude, takođe, nezavistan od uticaja okruženja (Y_{out}), što je ispunjeno ako je zadovoljen uslov [96]:

$$Y_{\text{out}} \gg Y_s + Y_{\text{in}}. \quad (2.18)$$

Tada je

$$Q_{\text{out}} \approx Q_0. \quad (2.19)$$

Dakle, za izvor sa konstantnim protokom suma admitance izvora i pobudnog mehanizma mora biti mnogo manja od spoljašnje admitance. Uslov se može analogno izraziti i preko impedanci:

$$Z_{\text{out}} \ll \frac{Z_s Z_{\text{in}}}{Z_s + Z_{\text{in}}}, \quad (2.20)$$

odakle sledi da impedanca spoljašnjeg opterećenja mora biti mnogo manja od paralelne veze impedance izvora i pobudnog mehanizma. U ovom slučaju funkcija C_F ima vrednost približno [61]:

$$C_F \approx \frac{Y_s + Y_{in}}{Y_{out}}. \quad (2.21)$$

S obzirom na uslov definisan jednačinom (2.18), apsolutna vrednost funkcije C_F mora biti mnogo manja od 1:

$$|C_F| \ll 1. \quad (2.22)$$

Korišćenjem impedancnog modela (sl. 2.2) mogu se definisati uslovi da dipolni izvor bude sa konstantnim protokom. Uz pretpostavku da je pobudna sila F_0 nezavisna od spoljeg okruženja, da bi izvor bio sa konstantnim protokom, potrebno je da protok Q bude nezavistan od uticaja okruženja (Z_{out}), što je ispunjeno ako je zadovoljen uslov [96]:

$$Z_{out} \ll Z_s + Z_{in}. \quad (2.23)$$

Tada je

$$Q \approx \frac{F_0}{Z_s + Z_{in}}. \quad (2.24)$$

Impedanca spoljašnjeg opterećenja mora biti mnogo manja od sume impedance izvora i pobudnog mehanizma. U ovom slučaju funkcija C_F ima približno vrednost [61]:

$$C_F \approx \frac{Z_{out}}{Z_s + Z_{in}}. \quad (2.25)$$

S obzirom na uslov (2.23), apsolutna vrednost funkcije C_F mora biti mnogo manja od 1.

Dakle, da bi izvor bio sa konstantnim protokom impedanca spoljašnjeg opterećenja jednopolnog i dipolnog izvora mora biti mala. Ekvivalentna impedanca jednopolnog izvora je paralelna veza impedance izvora i unutrašnje impedance pobude. Ekvivalentna impedanca dipolnog izvora je redna veza pomenutih impedanci. Oba uslova se mogu izraziti jednim - da funkcija C_F ima veoma malu vrednost.

2.3.2 Izvori buke sa konstantnim silom

Korišćenjem admitancnog modela (sl. 2.1) mogu se definisati uslovi da jednopolni izvor bude sa konstantnom silom. Uz pretpostavku da je pobudni protok Q_0 nezavistan od spoljnog okruženja, da bi izvor bio sa konstantnim silom, potrebno je da sila F bude nezavisna od uticaja okruženja (Y_{out}), što je ispunjeno ako je zadovoljen uslov [96]:

$$Y_{out} \ll Y_s + Y_{in}. \quad (2.26)$$

Tada je

$$F \approx \frac{Q_0}{Y_s + Y_{in}}. \quad (2.27)$$

Dakle, za izvor sa konstantnim silom, suma admitance izvora i pobudnog mehanizma izvora mora biti mnogo veća od spoljašnje admitance. Uslov se može, analogno, definisati preko impedanci:

$$Z_{out} \gg \frac{Z_s Z_{in}}{Z_s + Z_{in}}, \quad (2.28)$$

odakle sledi da impedanca spoljašnjeg opterećenja mora biti mnogo veća od paralelne veze impedance izvora i pobudnog mehanizma. U ovom slučaju, funkcija C_F ima vrednost približno [61]:

$$C_F \approx \frac{Y_{out}^*}{(Y_s + Y_{in})^*}. \quad (2.29)$$

S obzirom na uslov definisan jednačinom (2.26) apsolutna vrednost funkcije C_F mora biti mnogo manja od 1.

Korišćenjem impedancnog modela (sl. 2.2) mogu se definisati uslovi da dipolni izvor bude izvor sa konstantnom silom. Uz pretpostavku da je pobudna sila F_0 nezavisna od spoljeg okruženja, da bi izvor bio sa konstantnom silom, sila F_{out} mora biti nezavisna od uticaja okruženja (Z_{out}), što je ispunjeno ako je zadovoljen uslov [96]:

$$Z_{out} \gg Z_s + Z_{in}. \quad (2.30)$$

Tada je

$$F_{out} \approx F_0. \quad (2.31)$$

Dakle, impedanca spoljašnjeg opterećenja mora biti mnogo veća od sume impedance izvora i pobudnog mehanizma. U ovom slučaju funkcija C_F ima približno vrednost približno [61]:

$$C_F \approx \frac{(Z_s + Z_{in})^*}{Z_{out}^*}. \quad (2.32)$$

I u ovom slučaju, s obzirom na uslov (2.30), apsolutna vrednost funkcije C_F mora biti mnogo manja od 1.

Dakle, da bi izvor bio sa konstantnim silom, impedanca spoljašnjeg opterećenja jednopolnog i dipolnog izvora mora biti velika. Ekvivalentna impedanca jednopolnog izvora je paralelna veza impedance izvora i unutrašnje impedance pobude. Ekvivalentna impedanca dipolnog izvora je redna veza pomenutih impedanci. Oba uslova se mogu izraziti jednim - da funkcija C_F ima veoma malu vrednost.

Može se uočiti da izvori sa konstantnim protokom i konstantnom silom imaju malu vrednost funkcije C_F , iako su izrazi za njeno izračunavanje različiti i zavise od tipa raspodele.

2.3.3 Izvori buke sa konstantnom snagom

Korišćenjem admitancnog modela (sl. 2.1) mogu se definisati uslovi da jednopolni izvor bude sa konstantnom snagom. O izvorima buke sa konstantnom snagom, može se govoriti ukoliko je zavisnost zvučne snage od okruženja (G_{out} , B_{out}) minimalna, što je ispunjeno u oblastima gde važe uslovi [96]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{out}}{\partial G_{out}} &= 0, \\ \frac{\partial P_{out}}{\partial B_{out}} &= 0. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Nalaženjem parcijalnih izvoda dobija se:

$$G_{\text{out}} \approx \frac{|Y_s + Y_{\text{in}} + Y_{\text{out}}|^2}{2(G_s + G_{\text{in}} + G_{\text{out}})}, \quad (2.34)$$

$$B_s + B_{\text{in}} + B_{\text{out}} \approx 0.$$

gde su: G_s , G_{in} , i G_{out} - odgovarajuće konduktance, a B_s , B_{in} , i B_{out} - odgovarajuće susceptance.

Daljim rešavanjem jednačina (2.34) dobija se uslovi da izvor bude sa konstantnom snagom:

$$G_{\text{out}} \approx G_s + G_{\text{in}}, \quad (2.35)$$

$$B_{\text{out}} \approx -(B_s + B_{\text{in}}).$$

Jednopolni izvor deluje kao izvor sa konstantnom snagom u oblasti prilagođenja snage. Zvučna snaga, tada, ima maksimum [96]:

$$P_{\text{out}} \approx \frac{|Q_0|^2}{4S(G_s + G_{\text{in}})^2} = \frac{|Q_0|^2}{4SG_{\text{out}}^2}, \quad (2.36)$$

dok funkcija C_F ima vrednost [61]:

$$C_F = \frac{(Y_s + Y_{\text{in}})^2}{4(G_s + G_{\text{in}})^2} = \frac{Y_{\text{out}}^{*2}}{4G_{\text{out}}^2}. \quad (2.37)$$

Korišćenjem impedancnog modela (sl. 2.2) mogu se definisati uslovi da dipolni izvor bude sa konstantnom snagom. O izvorima buke sa konstantnom snagom, može se govoriti ukoliko je zavisnost zvučne snage od okruženja (R_{out} , X_{out}) minimalna, što je ispunjeno u oblastima gde važe uslovi [96]:

$$\frac{\partial P_{\text{out}}}{\partial R_{\text{out}}} = 0, \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial P_{\text{out}}}{\partial X_{\text{out}}} = 0.$$

Nalaženjem parcijalnih izvoda dobija se:

$$R_{\text{out}} \approx \frac{|Z_s + Z_{\text{in}} + Z_{\text{out}}|^2}{2(R_s + R_{\text{in}} + R_{\text{out}})}, \quad (2.39)$$

$$X_s + X_{\text{in}} + X_{\text{out}} \approx 0.$$

gde su: R_s , R_{in} , i R_{out} - odgovarajuće otpornosti, a X_s , X_{in} , i X_{out} - odgovarajuće reaktance.

Daljim rešavanjem jednačina (2.39) dobija se:

$$R_{\text{out}} \approx R_s + R_{\text{in}}, \quad (2.40)$$

$$X_{\text{out}} \approx -(X_s + X_{\text{in}}).$$

Takođe, dipolni izvor deluje kao izvor sa konstantnom snagom u oblasti prilagođenja snage. Zvučna snaga, tada, ima maksimum [96]:

$$P_{\text{out}} \approx \frac{|F_0|^2}{4S(R_s + R_{\text{in}})^2} = \frac{|F_0|^2}{4SR_{\text{out}}^2}, \quad (2.41)$$

dok funkcija C_F ima vrednost [61]:

$$C_F = \frac{(Z_s^* + Z_{in}^*)^2}{4(R_s + R_{in})^2} = \frac{Z_{out}^2}{4R_{out}^2}. \quad (2.42)$$

2.4 AKUSTIČKA EMISIJA IZVORA BUKE

Za opisivanje akustičke emisije izvora buke koriste se sledeće veličine:

- zvučna snaga,
- karakteristika usmerenosti, i
- zvučni pritisak emisije (komplementarna veličina zvučnoj snazi)

2.4.1 Zvučna snaga

Zvučna snaga izvora buke je opšte prihvaćena veličina za opisivanje karakteristika akustičke emisije izvora buke i predstavlja osnovnu veličinu koja se koristi pri predikciji potencijalnih efekata izvora buke na okruženje. Pored toga, predstavlja osnovu za komparaciju akustičkih osobina proizvoda različitih proizvođača, a njena zavisnost od fizičkih i radnih parametara mehanizama za generisanje buke omogućuje identifikaciju i karakterizaciju izvora buke. Iako zvučna snaga nije apsolutno nezavisna od okruženja, ipak je uticaj okruženja na zvučnu snagu izvora buke znatno manji od uticaja na zvučni pritisak.

Zvučni pritisak predstavlja veličinu koja se najčešće koristi u postupcima kontrole buke, jer se najlakše povezuje sa dejstvom buke na oštećenje sluha, i drugim nepovoljnim efektima buke. Međutim, pre svega zbog uticaja brojnih spoljnih faktora, veoma je teško u realnim uslovima ostvariti preciznu procenu zvučnog pritiska u određenoj tački zvučnog polja. Npr., na otvorenom prostoru mikrometeorološki fenomeni kao što su gradijent temperature vazduha i brzina strujanja vazduha, zajedno sa topografskim i akustičkim osobinama zemljišta, značajno utiču na prostiranje zvučne energije. Čak i kada se raspoložuje podacima o direktivnosti izvora buke na otvorenom prostoru, procena zvučnog pritiska na većim rastojanjima od izvora buke sadrži značajan stepen nesigurnosti.

Slično, raspodela zvučnog pritiska za slučaj da se izvor buke nalazi u zatvorenom prostoru, značajno zavisi od efekata refleksije, difrakcije i apsorpcije zvuka, koji su određeni karakteristikama graničnih površina prostorije i raspodelom objekata koji se nalaze u njoj.

Uzročno-posledična veza zvučne snage i zvučnog pritiska ukazuje na činjenicu da je poznavanje podataka o zvučnoj snazi izvora buke polazna osnova za procenu zvučnog pritiska u određenoj tački zvučnog polja.

Polazeći od osnovne definicije akustičke snage kao energije koja u jedinici vremena prolazi kroz određenu površinu normalnu na pravac prostiranja zvučnih talasa, zvučna snaga izvora buke može se definisati kao energija koja u jedinici vremena prolazi kroz bilo koju površinu koja potpuno obuhvata posmatrani izvor buke.

Data definicija zvučne snage izvora buke može se izvesti polazeći od jednačine energetske ravnoteže za stacionarno zvučno polje [20] za sistem izvora buke prikazan na sl. 2.4:

$$\operatorname{div} \vec{I} dV = W'. \quad (2.43)$$

Integracijom jednačine (2.43) po zapremini V , koja potpuno obuhvata izvor buke, i primenom teoreme Gaus-Ostrogradskog, može se uspostaviti relacija između zapreminskog integrala skalarne funkcije - divergencije energetskog fluksa ili intenziteta zvuka i površinskog

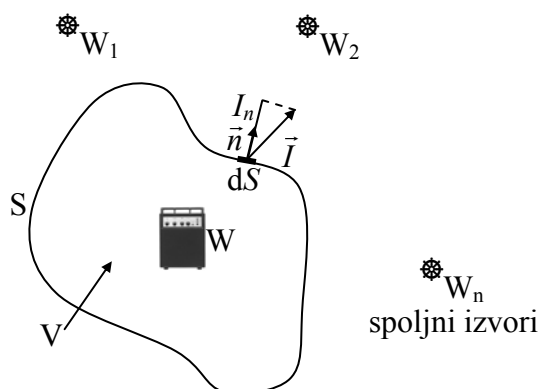
integrala vektorske funkcije energetskog fluksa, koji predstavlja protok energije u definisanu zapreminu [20]:

$$\int_V \operatorname{div} \vec{I} dV = \oint_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS = \oint_S \vec{I} \cdot d\vec{S} = \oint_S I \cos \alpha dS = \oint_S I_n dS = \int_V W' dV = W, \quad (2.44)$$

Na osnovu jednačine (2.44) može se definisati zvučna snaga izvora buke kao:

$$W = \oint_S \vec{I}_n \cdot d\vec{S} \quad (2.45)$$

gde je: W - zvučna snaga koju generišu izvori buke obuhvaćeni površinom S , W' - zapreminska gustina zvučne snage izvora, I_n – normalna komponenta intenziteta zvuka koja daje doprinos velični zvučne snage izvora buke.



Sl. 2.4 Ilustracija odnosa zvučne snage izvora i intenziteta zvuka

Izvori buke koji se nalaze van površine S ne doproše normalnoj komponenti intenziteta zvuka na površini S , pa samim tim ne utiču ni na zvučnu snagu izvora buke koji se nalaze unutar površine S .

Dakle, ukoliko površina potpuno obuhvata zvučni izvor, zvučnu snagu izvora određuje prostorno i vremenski usrednjena vrednost promenljivog intenziteta zvuka po posmatranoj površini pri čemu treba uzimati u obzir samo komponente intenziteta zvuka normalne na površinu. Na ovaj način je praktično definisana procedura određivanja zvučne snage izvora direktnim merenjem intenziteta zvuka.

Za slučaj prostiranja ravnih talasa, zvučna snaga je određena jednačinom [10]:

$$W = IS, \quad (2.46)$$

dok je kod prostiranja sfernih talasa [10]:

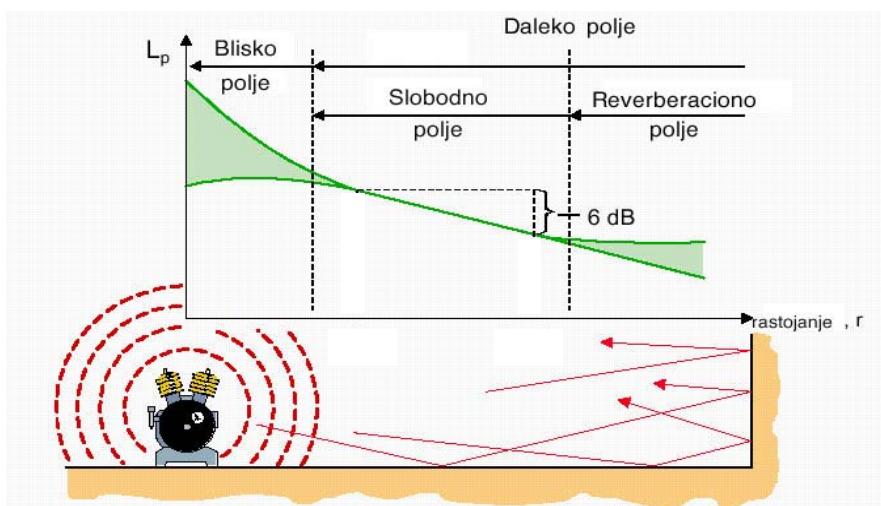
$$W = I \cdot 4\pi r^2. \quad (2.47)$$

2.4.2 Karakteristika usmerenosti

Izvori buke proizvoljnog oblika, isključujući izvore buke oblika sfere, čije dimenzije nisu male u odnosu na talasnu dužinu emitovanog zvuka zrače, zvučnu energiju različito u različitim pravcima, odnosno usmereno. Karakteristika zračenja zavisi od posmatrane oblasti zvučnog polja (sl. 2.5), pri čemu se zvučno polje može podeliti na [10,97]:

- *blisko polje*, oblast veoma blizu izvora zvuka, gde se zvučni pritisak značajno menja sa malim promenama u poziciji posmatrane tačke; obuhvata oblast do rastojanja koje je manje od talasne dužine najniže emitovane frekvencije izvora,

- *daleko slobodno polje*, oblast gde se zvuk prostire na otvorenom prostoru bez prisustva reflektujućih površina; nivo zvuka opada 6dB sa dupliranjem rastojanja od izvora,
- *daleko reverberaciono polje*, oblast gde su refleksije zidova i drugih objekata veoma značajne, a nivo zvuka relektujućeg talasa je reda nivoa zvuka direktnog talasa izvora.



Sl. 2.5 Oblasti zračenja izvora buke [10]

U bliskom polju, oblik talasnog fronta zavisi od oblika aktivne površine izvora buke dok u dalekom polju talasni front ima oblik sfere, ali je zvučni pritisak u različitim tačkama različit.

Neravnomernost zračenja izvora buke u različitim smerovima određena je promenama zvučnog pritiska za različite smerove i može se predstaviti preko faktora smera [53,58]:

$$\Gamma(\theta) = \frac{p(\theta)}{p(0^\circ)}, \quad (2.48)$$

gde je: $p(\theta)$ - zvučni pritisak na određenom rastojanju, u smeru koji sa glavnom osom izvora buke zaklapa ugao θ , $p(0^\circ)$ - zvučni pritisak na istom rastojanju, u smeru glavne ose izvora buke.

Karakteristika usmerenosti je zavisnot faktora smera od posmatranog smera u odnosu na izvor buke koji je definisan uglom θ . Karakteristika usmerenosti izvora buke često se naziva i dijagram zračenja izvora buke. Karakteristika usmerenosti predstavlja liniju (u prostoru: površinu) na kojoj je vrednost zvučnog pritiska svuda jednaka. U zoni ograničenoj ovom linijom zvučni pritisak se povećava, dok, van ove zone opada.

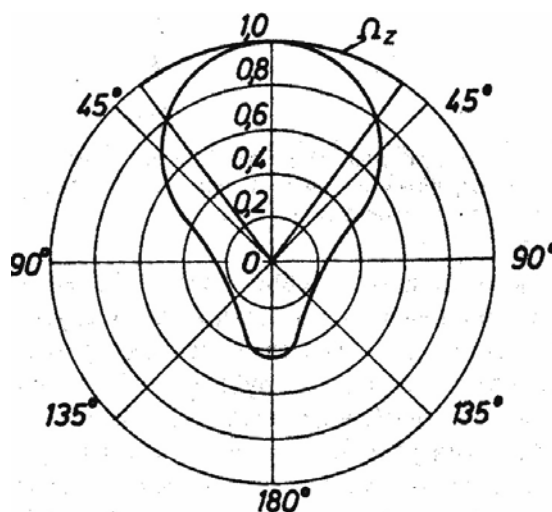
Zvučna snaga izvora buke sa usmerenim zračenjem određuje se na osnovu opšteg obrasca (2.45), gde površina S može da ima oblik sfere, a da se pri integraljenju uzme u obzir promena normalne komponente intenziteta zvuka određena faktorom smera:

$$W = \oint_S I(\theta) dS = I(0^\circ) \oint_S \frac{I(\theta)}{I(0^\circ)} dS = I(0^\circ) \oint_S \Gamma^2(\theta) dS = r^2 I(0^\circ) \int_0^{4\pi} \Gamma^2(\theta) d\theta \quad (2.49)$$

Na ovaj način je definisana veličina efektivnog prostornog ugla zračenja Ω_z , koji je određen karakteristikom usmerenosti izvora buke:

$$\Omega_z = \int_0^{4\pi} \Gamma^2(\theta) d\theta. \quad (2.50)$$

Na sl. 2.6 ilustrovan je primer karakteristike usmerenosti izvora buke i prikazana je veličina efektivnog prostornog ugla zračenja Ω_z .

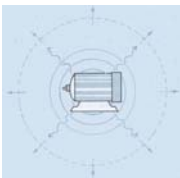
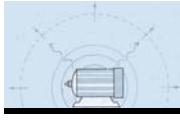

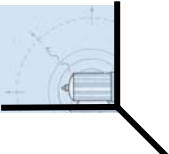


Sl. 2.6 Karakteristika usmerenosti izvora buke [53]

Za tačkaste izvore buke koji su neusmereni ($\Gamma = 1$), prostorni ugao zračenja ima vrednost $\Omega_z = 4\pi$, dok je za usmerene izvore $\Omega_z < 4\pi$. Kao posledica manjeg efektivnog prostornog ugla kod usmerenih izvora buke, dobija se veći intenzitet zvuka u smeru koji se poklapa sa glavnom osom izvora.

Pored karakteristike usmerenosti, prostorni ugao zračenja određuje i lokacija izvora buke [97]. U tabeli 1. prikazana je zavisnost prostornog ugla zračenja od lokacije izvora buke.

Tabela 2.1 Prostorni ugao zračenja u funkciji lokacije izvora buke

Lokacija izvora buke				
Prostorni ugao zračenja	4π	2π	π	$\pi / 2$

Često se koristi i pojam faktora usmerenosti koji je definisan odnosom [58]:

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_z} = \frac{I_\theta}{I_S}, \quad (2.51)$$

i određuje odnos intenziteta zvuka, I_θ , koji u određenoj tački stvara usmereni izvor buke i intenziteta zvuka, I_S , koji bi u istoj tački stvarao neusmereni izvor buke iste zvučne snage.

Kako je uobičajeno korišćenje termina - nivo intenziteta zvuka, može se definisati i indeks usmerenosti kao [2,3]:

$$DI_\theta = 10 \log \gamma = L_{I_\theta} - L_{I_S} \quad [\text{dB}] \quad (2.52)$$

gde je: L_{I_θ} - nivo intenziteta zvuka koji u određenoj tački stvara usmereni izvor buke i L_{I_S} - nivo intenziteta zvuka koji bi u istoj tački stvarao neusmereni izvor buke iste zvučne snage. Jednačina (2.52) se koristi za praktično određivanje indeksa usmerenost realnih izvora buke.

Uvođenjem datih veličina, intenzitet zvuka za neusmerene izvore buke, na rastojanju r od izvora i za bilo koji ugao θ može se izračunati na osnovu izraza [53,58]:

$$I(\theta) = \gamma \frac{W}{4\pi r^2} \Gamma^2(\theta). \quad (2.53)$$

2.4.3 Zvučni pritisak emisije

U skladu sa evropskim direktivama i međunarodnim standardima [16-19,32-33], koje se odnose na potencijalne izvore buke, svaki proizvođač mašina, uređaja i opreme čiji nivo zvučnog pritiska emisije premašuje 85dB(A), mora da deklariše nivo zvučne snage. Stoga, veličina nivoa zvučnog pritiska emisije postaje parametar koji mora biti određen i čija vrednost opredeljuje neophodnost određivanja i drugih akustičkih veličina koje definišu emisiju izvora buke.

Kada se izvor buke nalazi na otvorenom prostoru, u slobodnom zvučnom polju, registrovani nivo zvučnog pritiska u određenoj tački mernim mikrofonom ili ljudskim uhom predstavlja nivo zvučnog pritiska emisije, L'_p .

Kada se isti izvor buke smesti u prostoriju, ekvivalentne apsorpcione površine A , nivo zvučnog pritiska u određenoj tački zvučnog polja prostoroje određen je nivoom zvučnog pritiska emisije i nivoom zvučne snage [82]:

$$L_p = 10 \log(10^{0.1L'_p} + \frac{4}{A} 10^{0.1L_w}). \quad (2.54)$$

Izraz (2.54) predstavlja matematičku formulaciju činjenice da dva parcijalna nivoa, energetski sabrana, doprinose ukupnom nivou u prostoriji - prvi nivo je posledica direktnog zračenja izvora buke, i stoga je identičan sa nivoom zvučnog pritiska emisije L'_p , a drugi je posledica reflektovanja zvučnih talasa od graničnih površina prostorije i objekata u njoj, i određen je zvučnom snagom izvora, i apsorpcionim karakteristikama prostorije i objekata smeštenih u njoj.

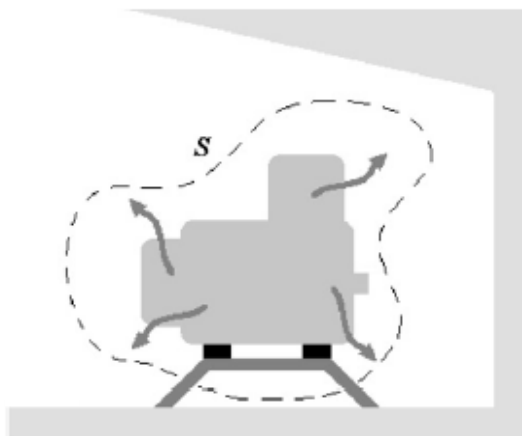
Matematička formulacija termina zvučnog pritiska emisije bazira se na primeni teoreme o predstavljanju vibroakustičkog polja linearnih mehaničkih sistema [4]:

"Ukupno polje sistema koji je sastavljen od dva podsistema, od kojih je jedan pobudni a drugi pasivni, i čija se interakcija ostvaruje preko zajedničke površine S može se predstaviti kao suma dve prostije komponente polja."

Iskazanu teoremu moguće je primeniti na sistem prikazan na sl. 2.7, koji čini izvor buke smešten u prostoriji, perfektно izolovan od konstrukcije prostorije, tako da zvučno polje u prostoriji generiše samo zračenje izvora buke.

Ukoliko je S površina koja potpuno obuhvata izvor buke, tada se sistem *izvor buke - prostorija* može posmatrati kao da je sastavljen od dva podsistema:

- površine S , odnosno zapremine fluida sa izvorom buke, i
- ostalog dela prostorije bez zapremine fluida sa izvorom buke.



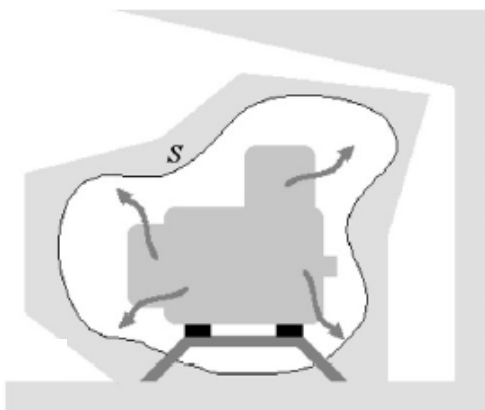
Sl. 2.7 Sistem izvor buke - prostorija

Zvučni pritisak u proizvoljnoj tački prostorije, x , kao posledica rada izvora buke, može se predstaviti preko sume dve komponente:

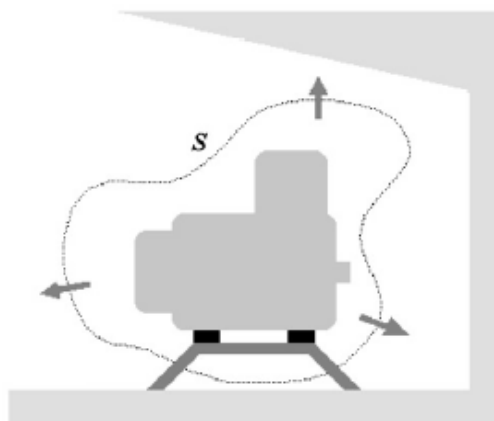
$$\underline{p}(x) = \underline{p}_0(x) + \underline{p}_1(x). \quad (2.55)$$

Prva komponenta je zvučni pritisak akustičkog polja pod sistema koga čini izvor buke sa izolovanom površinom, S (sl. 2.8). Kako je izvor buke u površini S jedini izvor u sistemu, zvučni pritisak van površine biće jednak nuli, $\underline{p}_{0,R}(x) = 0$. Unutar površine S , zvučni pritisak je različit od nule, $\underline{p}_{0,S}(x) \neq 0$. Zvučni pritisak u tačkama s ($s \in S$) predstavlja zvučni pritisak emisije, koji odgovara zvučnom pritisku koji bi izvor buke stvarao na otvorenom prostoru, odnosno u slobodnom zvučnom polju.

Druga komponenta polja u posmatranom sistemu, $\underline{p}_1(x)$, posledica je dejstva spoljnje pobudne sile $F(s)$ koja deluje pod pravim uglom na površinu S , koja obuhvata u ovom slučaju isključen izvor buke (sl. 2.9). Sila $F(s)$ je upravo jednaka zvučnom pritisku prve komponente na samoj površini S , što odgovara zvučnom pritisku emisije. Zvučni pritiska, kao posledica dejstva druge komponente u samoj površini S , jednak je nuli, $\underline{p}_{1,S}(x) = 0$, dok je zvučni pritisak van površine S različit od nule, $\underline{p}_{1,R}(x) \neq 0$, i posledica je dejstva spoljnje sile $F(s)$ na površinu S .



Sl. 2.8 Izvor buke unutar izolovane površine S



Sl. 2.9 Zvučno polje pobuđeno spoljnom pobudnom silom koja deluje na površinu S

Prema tome, stvarni, primarni izvor buke moguće je zameniti sekundarnim izvorom buke, koji se može opisati površinom S i pobudnom silom $F(s)$ koja odgovara zvučnom pritisku emisije izvora buke.

Ovako uprošćeni model izvora buke čini predikciju buke i karakterizaciju izvora buke jednostavnijom. Pre svega, predstavljanje polja složenog sistema *izvor buke - prostorija* preko dva podsistema pomoću kontrolne površine koja potpuno obuhvata izvor buke (koja može ostati ista za različite izvore buke i prostorije), omogućuje odvojenu karakterizaciju izvora i prostorija i njihovog učešća u generisanju ukupnog zvučnog polja u prostoriji, što daje jedinstven prilaz širokoj klasi izvora buke i akustičkih okruženja.

Zamena primarnog izvora buke predloženim sekundarnim izvorom, takođe, omogućava da se fizički izvori buke sa potencijalno veoma složenom geometrijom spoljnje površine koja zrači zvučnu energiju transformišu u sekundarni izvor buke sa mnogo prostijom kontrolnom površinom pravilnog oblika, što omogućuje primenu akustičke talasne jednačine sa pravaouganim, sfernim ili cilindričnim koordinatama za opisivanje zvučnih polja.

3

STANDARDIZOVANE METODE ZA ODREĐIVANJE NIVOA ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE

DIREKTNE METODE

INDIREKTNE METODE

PROCEDURE ZA IZBOR METODE

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

Nivo zvučnog pritiska emisije predstavlja osnovni parametar za opisivanje i deklarisanje akustičke emisije potencijalnih izvora buke kao što su različite vrste mašina, opreme i uređaja [16-19,32,33,41]. Pri tome, pod nivoom zvučnog pritiska emisije izvora buke podrazumeva se zvučni pritisak koji bi postojao u uslovima slobodnog zvučnog polja na definisanoj poziciji koja zavisi od vrste i karaktera izvora buke. Zvučni pritisak emisije predstavlja zvučni pritisak koji emituju izvori buke u poznatim akustikim okruženjima, pri definisanim uslovima rada i instaliranja izvora. Za određivanje ovog parametra u realnim uslovima, potrebno je eliminirati uticaj pozadinskog zvuka i refleksije okruženja, izuzev refleksije zvuka od ravni koja se koristi pri testiranju izvora zvuka.

Standardizovane metode za određivanje zvučnog pritiska emisije zasnovani na metodu merenja zvučnog pritiska pod tačno definisanim uslovima koje moraju da zadovolje okruženja u kojima se vrši testiranje izvora buke [36-40,52,89,90]. Merenje se može vršiti u specijalno definisanim prostorijama (anehoične prostorije) ili u običnim prostorijama, kada je potrebno izmereni zvučni pritisak korigovati zbog neželjenog uticaja pozadinske buke i refleksija okruženja.

Standardizovane metode za određivanje zvučnog pritiska emisije izvora buke mogu se podeliti u dve grupe metoda:

- direktne metode
 - određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima slobodnog zvučnog polja, najčešće u poluanehoičnim prostorijama (ISO 11201 [37])
 - određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima realnog zvučnog polja
 - pregledni metod (ISO 11202 [38])
 - inženjerski/pregledni metod (ISO 11204 [40])
- indirektne metode
 - određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije na osnovu zvučne snage izvora buke (ISO 11203 [39])

3.1 DIREKTNE METODE

Kod direktnih metoda, nivo zvučnog pritiska emisije izvora buke određuje se direktnim merenjem zvučnog pritiska na unapred definisanim mernim pozicijama, u neposrednoj blizini posmatranog zvučnog izvora.

Osnovne veličine koje se mere na svakoj definisanoj poziciji su:

- A-ponderisani nivo zvučnog pritiska, L_{pA} , i
- C-ponderisani vršni (*peak*) nivo zvučnog pritiska, $L_{pC,peak}$

Pored pomenutih ponderacija mogu se koristiti i druge. Takođe, može se odrediti i frekvencijski spektar nivoa zvučnog pritiska emisije, korišćenjem oktavnih ili terčnih filtera, kao i vremenski karakter nivoa zvučnog pritiska emisije (impulsivnost, periodičnost, promenljivost...).

U cilju adekvatnog definisanja nivoa zvučnog pritiska emisije izabrani merni vremenski interval treba da pokrije sve radne režime posmatranog izvora buke. Merni interval T može obuhvatati više podintervala T_i koji odgovaraju različitim radnim režimima izvora buke. U

tom slučaju jednobrojna vrednost nivoa zvučnog pritiska emisije dobija se usrednjavanjem pojedinačnih vrednosti emisije zvučnog pritiska, $L_{p,T(i)}$:

$$L_p = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N T_i 10^{0.1 L_{p,T(i)}} \right]. \quad (3.1)$$

Ako je emisija buke stacionarna u vremenu merni interval, treba da iznosi najmanje 15s. Za frekvencijsku analizu merni period treba da iznosi najmanje 30s za frekvencijske opsege sa centralnom frekvencijom manjom od 160Hz, odnosno 15s za veće frekvencije.

Pozicije mernog mikrofona zavise od vrste i namene izvora buke i uglavnom su definisane test-kodovima za ispitivanje pojedinih grupa izvora buke (mašina, opreme i uređaja). Mikrofon se orijentiše tako da ugao incidencije zvučnih talasa koincidira sa referentnim pravcem mikrofona koji definiše proizvođač. Praktično, nivo zvučnog pritiska emisije se određuje mikrofonom usmerenim ka dominantnom izvoru generisanja buke posmatranog izvora.

3.1.1 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima slobodnog zvučnog polja

Međunarodnim standardom ISO 11201 [37] definisan je metod za merenje zvučnog pritiska emisije na unapred definisanim mernim pozicijama, u blizini izvora buke, u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni. Ovako izmereni nivoi zvučnog pritiska biće jednaki ili manji od nivoa zvučnog pritiska koji bi generisao izvor buke u svom normalnom radnom okruženju, iz razloga što se u toku merenja zvučnog pritiska emisije isključuje efekat pozadinske buke, kao i efekat refleksije koji je različit u uslovima test okruženja i u uslovima realnog okruženja izvora buke.

Metod je primenljiv za izvore buke sledećih karakteristika [37]:

- a) izvori buke koji inače rade u slobodnom zvučnom polju, blizu jedne ili više reflektujućih ravni, tako da se merenje emisije buke može izvršiti u realnom ambijentu;
- b) izvori buke koji su pokretljivi, tako da se mogu instalirati u slobodnom zvučnom polju iznad reflektujuće ravni;
- c) izvori buke koji su instalirani pod takvim uslovima da su zadovoljeni definisani zahtevi za pozadinsku buku i merno okruženje za koje nije potrebna dodatna korekcija;
- d) izvori buke za koje se mogu definisati merna mesta koja odgovaraju poziciji operatera ili rukovaoca izvorom buke.

U cilju određivanja vrednosti emisije zvučnog pritiska, pored merenja zvučnog pritiska na definisanim pozicijama, potrebno je odrediti korekciju zbog pozadinske buke K_1 , u obliku A-ponderisane vrednosti, ili frekvencijskog spektra. Tada se nivo zvučnog pritiska emisije određuje, u obliku frekvencijskog spektra i A-ponderisane vrednosti, respektivno, kao [37]:

$$\begin{aligned} L'_p &= L_p - K_1, \\ L'_{pA} &= L_{pA} - K_{1A}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

gde oznake nivoa obeležene apostrofom predstavljaju nivo zvučnog pritiska emisije izvora, a neobeležene, izmerene vrednosti nivoa zvučnog pritiska.

Nivo pozadinske buke u svakom frekvencijskom opsegu i A-ponderisani pozadinski nivo treba da budu najmanje 6dB (poželjno je da to bude 15dB) ispod nivoa koji stvara posmatrani izvor buke. Ako je razlika nivoa koji stvara izvor buke i nivoa pozadinska buke veća od 15dB ($K_1 = 0$) nije potrebna korekcija izmerenih nivoa buke, a ukoliko je razlika manja od 6dB ($K_1 \geq 1.3\text{dB}$), tada merenje nije validno u skladu sa navedenim standardom. Za ostale vrednosti razlike nivoa potrebno je korigovati izmereni nivo zvučnog pritiska primenom jednačine (3.2).

Merenje zvučnog pritiska emisije vrši se u mernim okruženjima u kojima postoje uslovi slobodnog zvučnog polja. Laboratorijska poluanehoična prostorija ili ravni, asfaltirani ili betonirani spoljašni prostori, kod kojih je pozadinska buka zanemarljiva, daju rezultate koji odgovaraju inženjerskoj klasi preciznosti mernog metoda. Mogu se koristiti i zatvoreni prostori kod kojih je ispunjen uslov da je indikator zvučnog polja, K_{2A} , koji definiše stepen odstupanja od idealnog slobodnog zvučnog polja manji od 2dB.

Merni metod zadovoljava inženjersku klasu tačnosti, što znači da je standardna devijacija ponovljivosti rezultata merenja A-ponderisanog nivoa zvučnog pritiska emisije manja od 2dB, pod uslovom da se isključe promene u dobijenim rezultatima zbog različitih uslova montiranja i instaliranja izvora buke, i ako je frekvencijski spektar zvučnog pritiska emisije relativno ravan u opsegu od 100Hz do 10kHz. Data vrednost standardne devijacije je maksimalna i u nekim slučajevima može biti i manja.

3.1.2 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima realnog zvučnog polja

Međunarodnim standardima ISO 11202 [38] i ISO 11204 [40] definisane su metode za merenje nivoa zvučnog pritiska emisije na unapred definisanim mernim pozicijama, u blizini izvora buke, u uslovima realnog zvučnog polja gde se inače izvor buke i nalazi.

Sličan je metodi merenja nivoa zvučnog pritiska emisije u slobodnom zvučnom polju, uz sledeće razlike:

- a) merenje se vrši u realnom ambijentu, i
- b) izmerene vrednosti zvučnog pritiska, pored korekcije za pozadinsku buku, koriguju se i za uticaj refleksije zvučnih talasa na poziciji mernih mikrofona.

Uticaj refleksije zvučnih talasa definisan je preko korekcije lokalnog mernog okruženja K_3 , koja se određuje:

- a) za ISO 11202 uprošćenom metodom, gde se pretpostavlja da je zvučno polje u neposrednoj okolini izvora buke uniformno,
- b) za ISO 11204 preciznom metodom, gde se uzima u obzir uniformnost zvučnog polja u neposrednoj okolini izvora buke.

Metode definisane standardima ISO 11202 i ISO 11204 primenjuju se na izvore buke sledećih karakteristika [38,40]:

- a) izvori buke koji se u cilju merenja ne mogu instalirati u slobodnom zvučnom polju iznad reflektujuće ravni;
- b) izvori buke za koje se može definisati jedna ili više pozicija operatera ili rukovaoca izvorom buke.

Suštinska razlika metoda definisanih standardima ISO 11202 i ISO 11204 je u sledećem:

- metod definisan standardom ISO 11202 primenjuje se na izvore buke koji su instalirani pod takvim uslovima da su zadovoljeni definisani zahtevi za pozadinsku buku i merno okruženje za koje se može primeniti uprošćeni metod proračuna korekcije lokalnog mernog okruženja;
- metod definisan standardom ISO 11204 takođe se primenjuje na izvore buke koji su instalirani pod takvim uslovima da su zadovoljeni definisani zahtevi za pozadinsku buku i merno okruženje za koje se može primeniti precizni metod proračuna korekcije lokalnog mernog okruženja
- klasa tačnosti metoda definisanog standardom ISO 11202 pripada grupi preglednih metoda, dok metod definisan standardom ISO 11204 može pripadati, u zavisnosti od vrednosti korekcije K_3 , grupi inženjerskih ili preglednih metoda.

U cilju određivanja vrednosti zvučnog pritiska emisije, pored merenja zvučnog pritiska na definisanim pozicijama, potrebno je odrediti korekciju zbog pozadinske buke K_1 i korekciju lokalnog mernog okruženja K_3 , u obliku A-ponderisanih vrednosti ili frekvencijskog spektra. Tada se nivo zvučnog pritiska emisije izvora buke određuje kao [38,40]:

$$\begin{aligned} \dot{L}_p &= L_p - K_1 - K_3, \\ \dot{L}_{pA} &= L_{pA} - K_{1A} - K_{3A}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Nivo pozadinske buke u svakom frekvencijskom opsegu spektra i A-ponderisani ukupni nivo treba da bude, u zavisnosti od primenjenog standarda:

- ISO 11202: najmanje 3dB (poželjno je da to bude 10dB) ispod nivoa koji stvara posmatrani izvor buke. Ako je razlika nivoa koji stvara izvor buke i nivoa pozadinske buke veća od 10dB ($K_1 = 0$) nije potrebna korekcija izmerenog nivoa zvučnog pritiska, a ukoliko je razlika manja od 3dB ($K_1 \geq 3\text{dB}$), tada merenje nije validno u skladu sa ovim standardom;
- ISO 11204: najmanje 6dB (poželjno je da to bude 15dB) ispod nivoa koji stvara posmatrani izvor zvuka. Ako je razlika nivoa koji stvara izvor buke i nivoa pozadinske buke veća od 15dB ($K_1 = 0$) nije potrebna korekcija izmerenog nivoa zvučnog pritiska, a ukoliko je razlika manja od 6dB ($K_1 \geq 1.3\text{dB}$), tada merenje nije validno u skladu sa ovim standardom.

Za ostale vrednosti razlike nivoa potrebno je korigovati izmereni nivo zvučnog pritiska primenom jednačine (3.3).

Merenje se vrši u realnom zvučnom polju, čiji indikator zvučnog polja K_{2A} definiše odstupanje od idealnog slobodnog zvučnog polja. Da bi se dobili validni rezultati vrednost indikatora K_{2A} treba da bude manja od 7dB.

Metod opisan u standardu ISO 11202, daje niži stepen tačnosti od metoda opisanog u ISO 11201, pre svega zbog karaktera mernog okruženja. Standardna devijacija ponovljivosti rezultata merenja A-ponderisanog nivoa zvučnog pritiska emisije manja je od 5dB, ukoliko se isključe promene u dobijenim rezultatima zbog različitih uslova montiranja i instaliranja izvora buke i ako je frekvencijski spektar zvučnog pritiska emisije relativno ravan u opsegu od 100Hz do 10kHz.

Metod opisan u standardu ISO 11204 daje različiti stepen tačnosti i zavisi od vrednosti korekcije K_{3A} . Ako je njena vrednost manja od 2dB, stepen tačnosti odgovara inženjerskom metodu i standardna devijacija ima vrednosti manju od 2.5dB. Ako je vrednost korekcije u

opsegu $2 < K_{3A} \leq 7\text{dB}$, stepen tačnosti odgovara preglednom metodi i standardna devijacija ima vrednosti manju od 5dB. Ako je vrednost korekcije veća od 7dB, označenim metodom se ne dobijaju validni rezultati.

3.1.3 Korekcije izmerenih vrednosti zvučnog pritiska

3.1.3.1 Korekcija zbog pozadinske buke

Merenje zvučnog pritiska za slučaj kada je posmatrani izvor buke uključen, često može biti ometano prisustvom pozadinske buke čiji je nivo dovoljno veliki, da značajno može da doprinese izmerenom nivou zvučnog pritiska. U idealnom slučaju, izmereni nivo zvučnog pritiska treba da bude rezultat samo emisije posmatranog izvora buke, a ne i drugih izvora iz mernog okruženja.

Međutim, u realnim slučajevima, izmereni nivo zvučnog pritiska obuhvata i pozadinsku buku, tako da je neophodno odrediti njen uticaj. Uticaj pozadinske buke određuje se merenjem zvučnog pritiska, L_b , kada je posmatrani izvor buke isključen. Pozadinska buka se meri na istim mernim pozicijama na kojima je meren zvučni pritisak kada je izvor buke bio uključen.

Nivo zvučnog pritiska emisija izvora buke, u prisustvu pozadinske buke, određuje se kao:

$$L_p = 10 \log(10^{L_p/10} - 10^{L_b/10}) = 10 \log 10^{L_p/10} \left(1 - 10^{-\frac{L_p-L_b}{10}}\right) = L_p + 10 \log \left(1 - 10^{-\frac{\Delta L}{10}}\right) = L_p - K_1 \quad (3.3)$$

Korekcija, K_1 , zbog pozadinske buke, određuje se na osnovu razlike nivoa zvučnog pritiska kada je posmatrani zvučni izvor uključen i isključen, $\Delta L = L_p - L_b$:

$$K_1 = -10 \log \left(1 - 10^{-\frac{\Delta L}{10}}\right). \quad (3.4)$$

3.1.3.2 Korekcija zbog lokalnog mernog okruženja

Izmereni zvučni pritisak, kada se merenje vrši u realnim ambijentima, pored zvučnog pritiska emisije samog izvora buke, uključuje i efekat reflektovanih talasa čiji karakter zavisi od karakteristika lokalnog mernog okruženja na poziciji mernog mikrofona. Iz tih razloga, izmereni nivo zvučnog pritiska je jednak ili veći od zvučnog pritiska emisije, pa je potrebno izvršiti korekciju izmerenog nivoa.

a) *Uprošćeni metod određivanja korekcije (ISO 11202)*

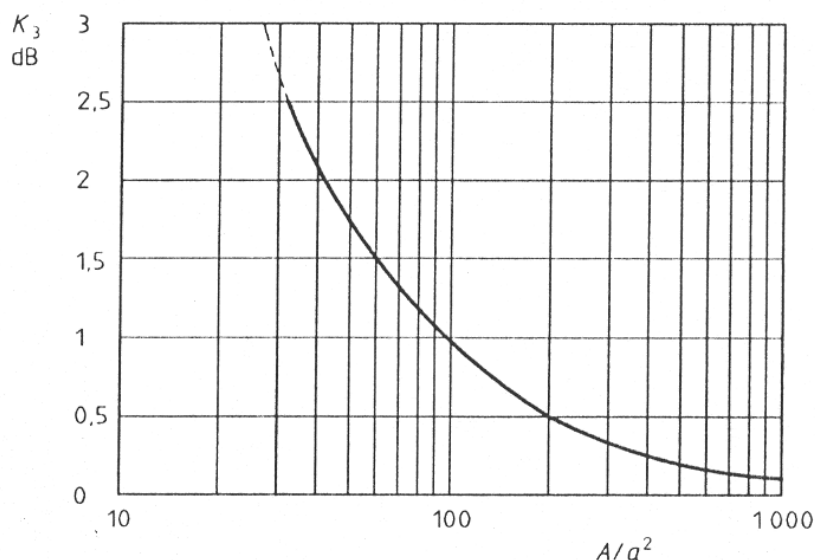
Uprošćeni metod određivanja korekcije zbog karaktera lokalnog mernog okruženja definisan je standardom ISO 11202 i pri njegovom određivanju pretpostavlja se uniformnost zvučnog polja u okolini izvora buke. Određuje se na osnovu jednačine [38]:

$$K_3 = 10 \log \left[1 + 4 \frac{S}{A}\right], \quad (3.5)$$

gde je: $S = 2\pi a^2$ i $a[\text{m}]$ - rastojanje merne pozicije do najbližeg dominantnog izvora generisanja buke. U slučaju kada dominantni izvor generisanja nije eksplicitno poznat, a predstavlja rastojanje do najbližeg dela izvora buke.

Vrednost $A = \bar{\alpha} S_V$ predstavlja ekvivalentnu apsorpcionu površinu merne prostorije, gde je $\bar{\alpha}$ - srednja vrednost koeficijenta apsorpcije merne prostorije, a S_V - ukupna površina merne prostorije.

Korekcija K_3 zavisi od odnosa A/a^2 i može se odrediti grafički na osnovu dijagrama prikazanog na sl. 3.1.



Sl. 3.1 Korekcija lokalnog mernog okruženja K_3 u funkciji A/a^2 [38]

b) Precizni metod određivanja korekcija (ISO 11204)

Precizni metod određivanja korekcije zbog karaktera lokalnog mernog okruženja definisan je standardom ISO 11204 i pri njegovom određivanju uzima se u obzir i uniformnost zvučnog polja u okolini izvora buke.

U skladu sa ovim metodom, korekcija lokalnog okruženja K_3 izračunava se na osnovu sledećih veličina:

- a) srednje vrednosti nivoa zvučnog pritiska na mernoj površini S na rastojanju d od izvora buke:

$$\bar{L} = 10 \log \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_i}, \quad (3.6)$$

gde je \bar{L} određeno na osnovu izmerenih nivoa zvučnog pritiska L_i na N pozicija oko posmatranog izvora buke; ako je nivo zvučne snage L_W poznat, \bar{L} se može odrediti kao:

$$\bar{L} = L_W - L_S + K_2, \quad (3.7)$$

gde je: $L_S = 10 \log S / S_0$, a $S_0 = 1 \text{ m}^2$;

- b) nivoa zvučnog pritiska, L_j izmeren na definisanoj poziciji j ; definisana pozicija može biti locirana na rastojanju od izvora buke koje je različito od d .

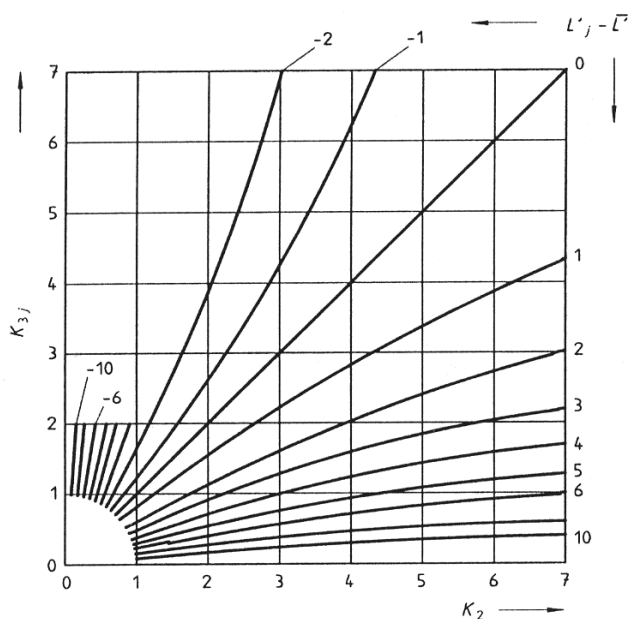
U zavisnosti od raspoloživih informacija K_3 se može odrediti na dva načina [40]:

- I) korišćenjem usrednjene vrednosti indikatora zvučnog polja K_2 za mernu površinu S za koju je određen L_j :

Za $(L_j - \bar{L}) > -3$ i $K_{3j} \leq 7$ i $-3 \geq (L_j - \bar{L}) \geq -10$ i $K_{3j} \leq 2$

$$K_{3j} = -10 \log [1 - (1 - 10^{-0.1 K_2}) \times 10^{-0.1(L_j - \bar{L})}]. \quad (3.8)$$

Sl. 3.2 daje grafičku prezentaciju jednačine (3.8).



Sl. 3.2 K_{3j} u funkciji K_2 i $L_j - \bar{L}$ [40]

II) korišćenjem odnosa A/S :

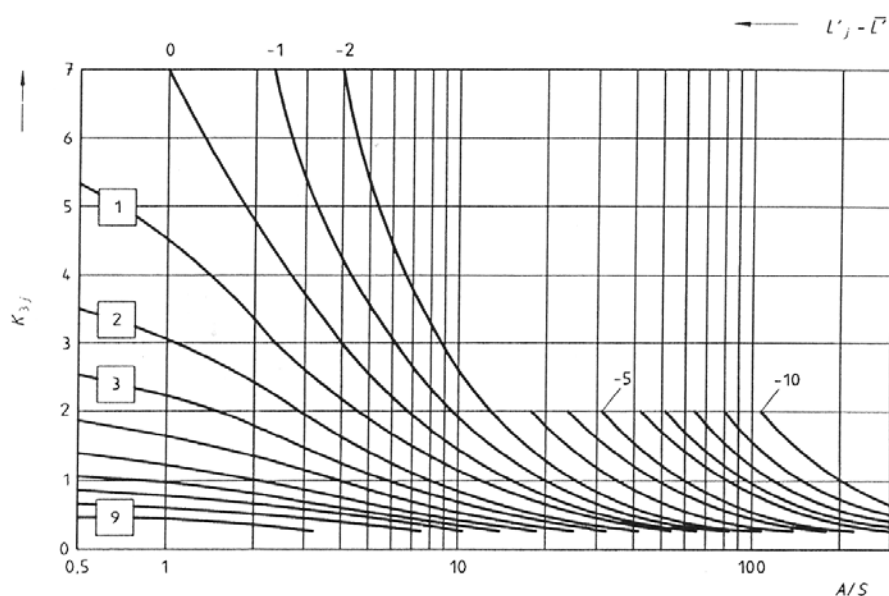
Za $(L_j - \bar{L}) > -3$ i $K_{3j} \leq 7$ i $-3 \geq (L_j - \bar{L}) \geq -10$ i $K_{3j} \leq 2$

$$K_{3j} = -10 \log \left[1 - \frac{1}{1 + A/4S} \times 10^{-0.1(L_j - \bar{L})} \right], \quad (3.9)$$

gde je: S - merna površina na kojoj je određen \bar{L} , a A - ekvivalentna apsorpciona površina merne prostorije.

Vrednost ekvivalentne apsorpcione površine određuje se ili proračunom ili merenjem vremena reverberacije i korišćenjem Sabinovog obrasca.

Sl. 3.3 daje grafičku prezentaciju jednačine (3.9).



Sl. 3.3 K_{3j} u funkciji A/S i $L_j - \bar{L}$ [40]

3.1.3.3 Indikator zvučnog polja u mernom okruženju

Indikator zvučnog polja u mernom okruženju, K_2 , definiše stepen odstupanja od idealnog slobodnog zvučnog polja, odnosno uticaj reflektovanog zvučnog talasa na izmerenu vrednost nivoa zvučnog pritiska. Indikator je frekvencijski zavistan i određuje se na osnovu sledeće jednačine [38,40]:

$$K_2 = 10 \log \left[1 + 4 \frac{S}{A} \right] [dB], \quad (3.10)$$

gde je: A - ekvivalentna apsorpciona površina merne prostorije, S - merna površina na kojoj se određuje nivo zvučnog pritiska.

Ekvivalentna apsorpciona površina merne prostorije može se odrediti primenom tri metode [38,40]:

1. *Aproksimativni metod*

Indikator zvučnog polja K_{2A} određuje se na osnovu ekvivalentne apsorpcione površine, $A = \bar{\alpha} S_V$, gde je $\bar{\alpha}$ - srednja vrednost koeficijenta apsorpcije merne prostorije koja se određuje iz tabele 3.1, a S_V - ukupna površina merne prostorije.

Tabela 3.1 *Aproksimativne vrednosti srednje vrednosti koeficijenta apsorpcije*

Opis prostorije	$\bar{\alpha}$
Skoro prazna prostorija sa glatkim, čvrstim zidovima od betona ili opeke, omalterisani ili popločani pločicama	0.05
Delimično prazna prostorija; prostorija sa glatkim zidovima	0.1
Prostorija sa nameštajem paralelopipednog oblika	0.15
Prostorija nepravilnog oblika sa nameštajem	0.2
Prostorija sa tapaciranim nameštajem; prostorija sa malom količinom apsorpcionog materijala na plafonu ili zidovima	0.25
Prostorija sa apsorpcionim materijalima na plafonu i na zidovima	0.35
Prostorija sa velikom količinom apsorpcionih materijala na plafonu i na zidovima	0.5

2. *Reverberacioni metod*

Indikator zvučnog polja K_2 određuje se na osnovu ekvivalentne apsorpcione površine, $A = 0.16V / T$ i merenja vremena reverberacije, gde je V - zapremina merne prostorije, a T - vreme reverberacije merne prostorije. Za određivanje indikatora K_{2A} koristi se vreme reverberacije izmereno na 1kHz.

3. *Metod dve merne površine*

Metod se koristi za merne prostorije čije su poprečne dimenzije (dužina i širina) tri puta manje od visine prostorije. Određuje se srednja vrednost nivoa zvučnog pritiska na dve površine: površini S_1 koja odgovara mernoj površini za određivanje zvučne snage izvora buke i površini S_2 koja treba da bude istog oblika kao površina S_1 , ali najmanje dva puta veća od nje (ukoliko je izvodljivo, odnos treba da bude veći od četiri). Odnos A/S određuje se iz jednačine:

$$\frac{A}{S} = \frac{4(M-1)}{1-MS/S_2} \quad (3.11)$$

Veličina M definiše se kao:

$$M = 10^{0,1*(\bar{L}_{p1} - \bar{L}_{p2})} \quad (3.12)$$

gde je: \bar{L}_{p1} - srednja vrednost nivoa zvučnog pritiska na mernoj površini S , a \bar{L}_{p2} - srednja vrednost nivoa zvučnog pritiska na mernoj površini S_2 .

3.2 INDIREKTNE METODE

3.2.1 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije na osnovu zvučne snage izvora buke

Međunarodnim standardom ISO 11203 [39] definisane su metode za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije, na unapred definisanim mernim pozicijama u blizini izvora buke, na osnovu podataka o nivou zvučne snage. Podaci o nivoima zvučne snage izvora buke dobijaju se primenom jedne od standardizovanih metoda koje su opisane u standardima serije ISO 3740 (merenje zvučnog pritiska) i ISO 9614 (merenje intenziteta zvuka).

Metod je primenljiv za izvore buke sledećih karakteristika [39]:

- a) izvori buke za koje postoje podaci o nivou zvučne snage pod odgovarajućim uslovima montiranja i rada;
- b) izvori buke za koje nisu unapred definisane pozicije operatera ili rukovaoca;
- c) izvori buke za koje je
 - 1) eksperimentom utvrđena tesna korelacija između nivoa zvučne snage i nivoa zvučnog pritiska emisije, ili
 - 2) se pozicija operatera ili rukovaoca izvorom buke može predstaviti kao tačka ili putanja na definisanoj površini koja obuhvata izvor buke (npr. merna površina koja se koristi pri određivanju nivoa zvučne snage);
- d) izvori buke koji ili zrače zvuk neusmereno ili su inače locirani blizu zida.

Nivo zvučnog pritiska emisije izračunava se na osnovu zvučne snage izvora buke primenom jednačine:

$$L'_p = L_w - Q \quad (3.13)$$

Frekvencijska ponderacija, spektralni sadržaj i vremensko usrednjavanje nivoa zvučnog pritiska emisije određeno je karakterom podataka o nivou zvučne snage.

Veličina Q u jednačini (3.13) određuje se eksperimentalno ili se proračunava na osnovu merne površine koja obuhvata izvor buke.

Veličina Q određuje se eksperimentalno ukoliko postoji odgovarajući test-kod za grupu posmatranih izvora buke koji definiše način određivanja vrednosti veličine Q . Veličina Q se može proračunati na osnovu merne površine koja obuhvata izvor buke, S , a na kojoj se nalazi pozicija operatera ili rukovaoca izvorom buke, na osnovu sledeće jednačine:

$$Q = 10 \log \frac{S}{S_0} [dB] \quad (3.14)$$

gde je $S_0 = 1m^2$.

Ovaj način proračuna veličine Q je posebno pogodan za:

- a) izvore buke koji zrače zvuk neusmereno;
- b) izvore buke koji su locirani blizu zida;
- c) izvore buke za koje se operater ili rukovaoc kreće na rastojanju d od površine izvora buke;
- d) izvore buke kod kojih nije definisana pozicija operatera ili rukovaoca, ali za koje se može pretpostaviti da je usrednjeni nivo zvučnog pritiska na mernoj površini na fiksnom rastojanju (npr. 1m) od površine izvora buke reprezentativan za izvor buke.

3.3 PROCEDURE ZA IZBOR METODE ZA ODREĐIVANJE NIVOVA ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE

Kod primene standardizovanih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke, neophodno je odlučiti koji je metod najpogodniji za specifični tip mašine, opreme ili uređaja i za planiranu svrhu testa.

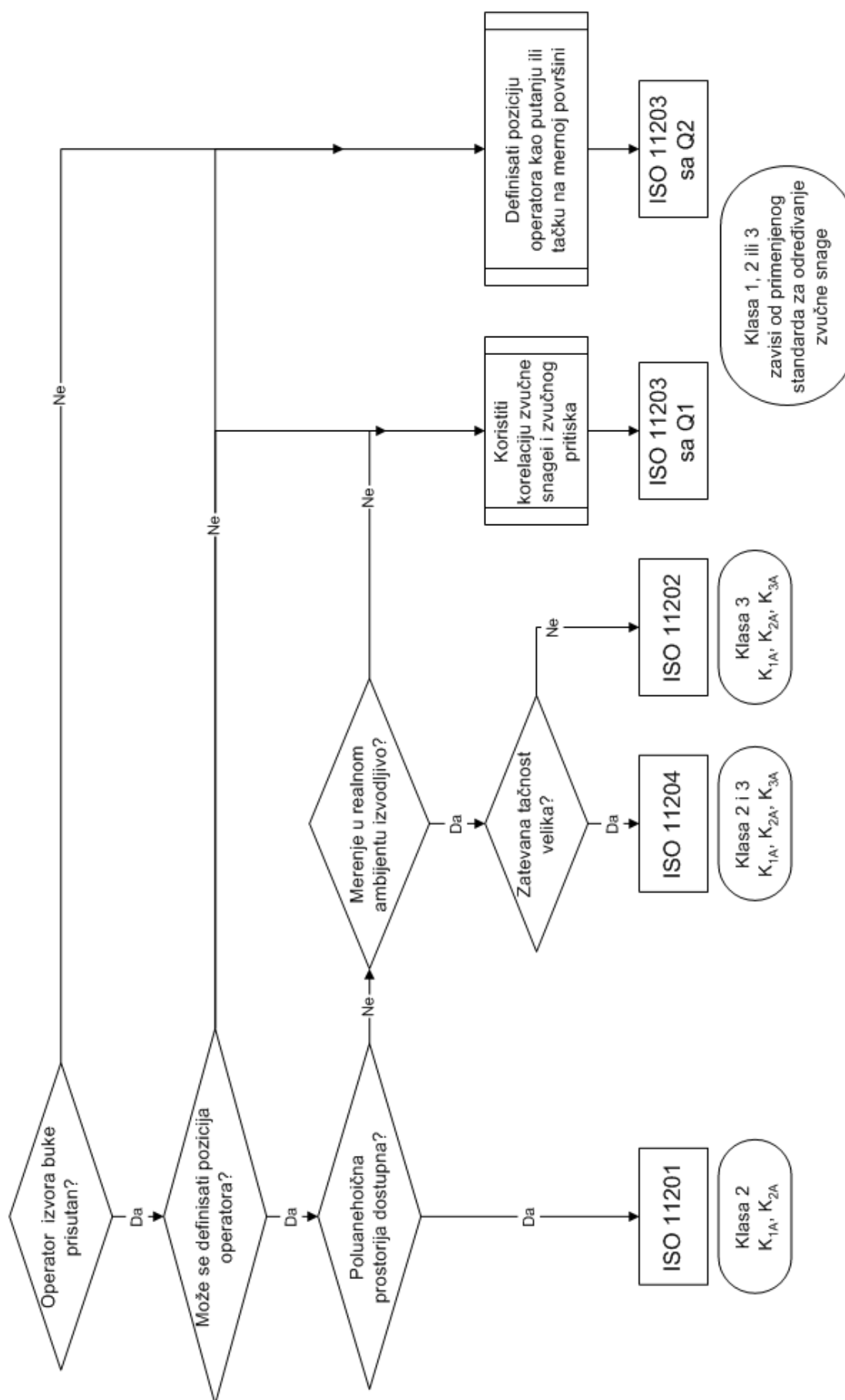
U principu, svaki od pomenutih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije primenljivi su za sve vrste izvora buke. Izbor metoda zavisi od tehničkih i praktičnih ograničenja, a faktori koji se razmatraju pri izboru standarda uključuju:

- a) veličina i prenosivost izvora buke;
- b) mogućnost identifikacije pozicije operatera ili rukovaoca izvorom buke u cilju definisanja mernih pozicija;
- c) merno okruženje koje je dostupno za merenje;
- d) klasa tačnost određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije.

Algoritamski pristup pri izboru odgovarajućeg metoda prikazan je na sl. 3.4. Pri tome treba uzeti u obzir osnovne karakteristike standardizovanih metoda prikazane u tabeli 3.2. Polje primene odgovarajuće metode u funkciji razlike izmerenog nivoa zvučnog pritiska i pozadinske buke i korekcije mernog okruženja, grafički je prikazano na sl. 3.5.

Standardi za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije, ISO 11202 i ISO 11204, podrazumevaju da prostorije u kojima se vrši merenje zadovoljavaju kriterijume za adekvatnost mernog okruženja, izraženog preko indikatora K_2 . Ukoliko odgovarajući kriterijum nije zadovoljen, da bi se posmatrana prostorija mogla koristiti za merenje, potrebno je:

- korekcijom apsorpcionih karakteristika graničnih prostorija prostorije zadovoljiti postavljeni kriterijum, ili
- povećati broj mernih tačaka pri određivanju merne površine, u cilju izbegavanja oblasti u kojima se javljaju značajne devijacije zvučnog polja



SI. 3.4 Algoritam za izbor metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije

Tabela 3.2 Pregled standardizovanih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije

Parametar	ISO 11201	ISO 11202	ISO 11203	ISO 11204
Klasa tačnosti	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 2 ili 3	Klasa 2 ili 3
Merno okruženje	Otvoreni ili zatvoreni prostor	Otvoreni ili zatvoreni prostor	Zavisi od izabranog standarda za određivanje zvučne snage	Otvoreni ili zatvoreni prostor
Kriterijum za merno okruženje	$K_{2A} \leq 2\text{dB}$	$K_{2A} \leq 7\text{dB}$	~ ~	$K_{2A} \leq 7\text{dB}$
Ograničenje korekcije okruženja	Bez korekcije	$K_{3A} \leq 2.5\text{dB}$	~ ~	$K_{3A} \leq 2\text{dB}$ (klasa 2) $K_{3A} \leq 7\text{dB}$ (klasa 3)
Veličina zvučnog izvora	Nema ograničenja; ograničeno samo mernim okruženjem	Nema ograničenja; ograničeno samo mernim okruženjem	Naročito pogodno za izvore buke malih serija	Nema ograničenja; ograničeno samo mernim okruženjem
Karakter buke	Nema ograničenja (širokopoljna, uskopopoljna, diskretna, konstantna, promenljiva, impulsna)		Zavisi od izabranog standarda za određivanje zvučne snage	Nema ograničenja
Ograničenje za pozadinsku buku	$\Delta L \geq 6\text{dB}$ (ili 15 dB) $K_{1A} \leq 1.3\text{dB}$	$\Delta L \geq 3\text{dB}$ $K_{1A} \leq 1.3\text{dB}$	~ ~	$\Delta L \geq 6\text{dB}$ (ili 15 dB) $K_{1A} \leq 1.3\text{dB}$
Merne tačke	Pozicije operatera ili rukovaoca izvorom buke			
Instrumenti: Merač nivoa zvuka Integracioni merač nivoa zvuka Filteri Kalibrator	tip 1 - IEC 651 tip 1 - IEC 651 klasa 1 - IEC 1260 klasa 1 - IEC 942	tip 2 tip 2 klasa 1 klasa 1	Zavisi od izabranog standarda za određivanje zvučne snage	tip 1 tip 1 klasa 1 klasa 1
Dobijene veličine	A, C_{peak} ; opciono frekvencijski spektar	A, C_{peak}	~ ~	A, C_{peak} ; opciono frekvencijski spektar
Preciznost metoda za određivanje L_{pA} izražena preko standardne devijacije ponovljivosti	$\leq 2.5\text{dB}$	$\leq 5\text{dB}^{2)}$	~ ~	$\leq 2.5\text{dB}$ (klasa 2) $\leq 5\text{dB}$ (klasa 3)
Odgovarajući standardi za određivanje zvučne snage	ISO 3744	ISO 3746	serija ISO 3740 serija ISO 9614	ISO 3744 (klasa 2) ISO 3746 (klasa 3)

K_{2A} [dB] ΔL [dB]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...		
1	Standardizovano merenje nije moguće												
2													
3	ISO 11202 (klasa 3)												
4													
5													
6	ISO 11201 (klasa 2)		ISO 11202 (klasa 3)										
7													
8	ISO 11202 (klasa 3)												
9													
10	ISO 11204 (klasa 2)											ISO 11204 (klasa 3)	
.													
.													

SI. 3.5 Ograničenja primene standardizovanih metoda [36]

INTENZITET ZVUKA - INDIKATOR PROSTIRANJA ZVUČNE ENERGIJE

DEFINICIJA INTENZITETA ZVUKA
INTENZITET ZVUKA RAVNIH TALASA
KOMPLEKSNI INTENZITET
KLASIFIKACIJA VEKTORSKOG POLJA INTENZITETA ZVUKA

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

4.1 DEFINICIJA INTENZITETA ZVUKA

Za razliku od zvučnog pritiska koji je skalarna veličina, intenzitet zvuka ili energetska fluks je vektorska veličina, određena pravcem i amplitudom. Intenzitet zvuka opisuje pravac i količinu protoka zvučne energije kroz jediničnu površinu u jedinici vremena.

Potencijalna i kinetička energija čestica elastične sredine, koje se nalaze na putanji zvučnog talasa, imaju nultu vrednost pre nego što talas stigne do njih. Energija im se povećava u toku prolaska zvučnog talasa i ponovo vraća na nultu vrednost nakon prolaska talasa. Pod uslovom da nije došlo do lokalnih transformacija energije u neakustičan oblik, energija koju čestice elastične sredine trenutno poseduju, u toku poremećaja sredine usled talasnog fronta, nastavlja put sa talasom. Intenzitet zvuka je indikator za energiju čestica elastične sredine koja se prostire zajedno sa talasnim frontom zvuka.

Definisanje izraza za intenzitet zvuka zahteva prethodno izvođenje jednačine energetske ravnoteže za čestice elastične sredine kroz koju se prostire zvučni talas, pri čemu treba pretpostaviti da male disipativne sile mogu biti zanemarene. Takođe, pretpostavlja se da nisu prisutni izvori ili gubici toplote i rada, i da je toplotna provodljivost zanemarljiva. Ove pretpostavke ukazuju da su promene unutrašnje energije čestica elastične sredine i odgovarajuće promene temperature, samo proizvod rada izvršenog na toj čestici u toku zapreminskih promena.

Porast energije u definisanoj zapremini elastične sredine V može se izračunati kao [96]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varepsilon dV = \int_V \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} dV, \quad (4.1)$$

gde je: ρ - gustina elastične sredine a ε - energija po jedinici površine.

Kako vektorska funkcija koja definiše energetska fluks, ili intenzitet zvuka, i njeni parcijalni izvodi predstavljaju neprekidne funkcije u oblasti V , ograničenoj površinom S tada se primenom teoreme Gaus-Ostrogradskog može uspostaviti relacija između površinskog integrala vektorske funkcije energetska fluksa, koji predstavlja protok energije u definisanu zapreminu, i zapreminskog integrala skalarne funkcije – divergencije energetska fluksa ili intenziteta zvuka:

$$\oint_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS = \int_V \text{div} \vec{I} dV, \quad (4.2)$$

gde je: I - vektor energetska fluksa ili intenzitet zvuka, S - površina koja obuhvata zapreminu V , a \vec{n} - jedinični vektor normalan na površinu S .

Kada ne postoje izvori zvučne energije unutar zapremine V , energetska fluks je jedini uzrok povećanja energije [20],

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varepsilon dV = - \oint_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS,$$

tako da se za elementarnu zapreminu elastične sredine bez izvora jednačina energetske ravnoteže može napisati:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = -\text{div} \vec{I}. \quad (4.3)$$

Kako veličina $\rho \varepsilon$ definiše gustinu zvučne energije E , jednačina energetske ravnoteže može se napisati i u obliku:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\mathbf{div} \vec{I}. \quad (4.4)$$

Ukoliko se na elementarnoj zapremini elastične sredine vrši dodatan rad nekom spoljnom silom, brzinom W' po jedinici zapremine, onda jednačina energetske ravnoteže postaje:

$$\mathbf{div} \vec{I}(t) = -\frac{\partial E}{\partial t} + W', \quad (4.5)$$

Ukupna gustina zvučne energije jednaka je zbiru kinetičke i potencijalne energije čestica elastične sredine kroz koju se prostire zvučni talas [10,53,58]:

$$E = \frac{1}{2} \rho_0 v^2 + \frac{p^2}{2 \rho_0 c^2}. \quad (4.6)$$

Diferenciranjem jednačine (4.6) po vremenu, u sva tri koordinatna pravca i korišćenjem relacija koje povezuju akustičke veličine [10,53,58]:

- jednačine kretanja: $\mathbf{grad} p = -\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$,
- jednačine kontinuiteta i gasnog zakona: $\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 \mathbf{div} \vec{v}$,
- odnosa pritiska i promene gustine pri adijabatskim procesima: $\frac{p}{\rho - \rho_0} = c^2$,

dobija se brzina promene gustine energije:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\left[\frac{\partial(pv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(pv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(pv_z)}{\partial z} \right]. \quad (4.7)$$

Kako se jednačina (4.4) može napisati u obliku:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\left[\frac{\partial I_x}{\partial x} + \frac{\partial I_y}{\partial y} + \frac{\partial I_z}{\partial z} \right], \quad (4.8)$$

sledi da je intenzitet zvuka, kao vektorska veličina, dat jednačinom:

$$\vec{I} = I_x \vec{i} + I_y \vec{j} + I_z \vec{k} = pv_x \vec{i} + pv_y \vec{j} + pv_z \vec{k}. \quad (4.9)$$

Odnosno, u sažetom obliku:

$$\vec{I} = p\vec{v}. \quad (4.10)$$

Dakle, protok zvučne energije kroz jediničnu površinu u jedinici vremena (energetski fluks ili intenzitet zvuka), određen je proizvodom zvučnog pritiska i vektora brzine oscilovanja čestica elastične sredine kroz koju se prostire zvučna energija.

4.2 INTENZITET ZVUKA RAVNIH TALASA

Oscilovanjem beskonačne ravni ili klipne membrane u pravoj cevi idealno krutih zidova, nastaje najprostiji oblik talasa, ravni talas. Talasni front, u obliku beskonačne ravni ili ravni klipne membrane, normalan je na pravac prostiranja talasa i na toj površini u svim tačkama, u bilo kojem trenutku vremena, svaka akustička promenljiva je uniformna bez obzira na vremensku zavisnost polja. Sve akustičke promenljive imaju dve komponente koje potiču od progresivnog ili incidentnog talasa (u daljem tekstu označeno sa +) i reflektujućeg talasa

(oznaka $-$). Relacija između pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine u jednodimenzionalnom ravanskom polju određena je karakterističnom impedancijom elastične sredine kroz koju se prostire zvučni talas:

$$v(x,t)^+ = \frac{p(x,t)^+}{\rho c} \quad \text{i} \quad v(x,t)^- = \frac{p(x,t)^-}{\rho c}. \quad (4.11)$$

Zamenom jednačina (4.11) u opšti izraz (4.10) dobija se intenzitet zvuka ravnih talasa u funkciji zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica:

$$I(x,t) = \frac{[p(x,t)^+]^2 - [p(x,t)^-]^2}{\rho c}, \quad (4.12)$$

$$I(x,t) = \rho c [v(x,t)^+]^2 - [v(x,t)^-]^2.$$

Ako je srednji intenzitet zvuka jednak nuli na bilo kojoj poziciji, onda ima vrednost nula na svim pozicijama, jer srednje kvadratni pritisci obe komponente ne zavise od pozicije u zvučnom polju. Međutim, trenutni intenzitet nije jednak nuli u svim tačkama, već njegova vrednost osciluje oko nule ukazujući na pravac protoka zvučne energije u određenoj tački (uticanje ili isticanje energije). U određenim vremenskim intervalima i na određenim tačkama, komponente pritiska mogu biti istog znaka i sličnih amplituda, što će usloviti da brzina čestice bude mala; suprotno, pritisci mogu biti slični po amplitudi, ali suprotnog znaka, i ukupan pritisak biće mali, ali će brzina čestica biti velika, tako da u svakoj oblasti postoji konstantno smenjivanje potencijalne i kinetičke energije, dok ukupna energija ostaje ista.

U svim vremenski stacionarnim akustičkim poljima trenutni intenzitet se može podeliti na dve komponente [47]:

- a) aktivna komponenta, čija je srednja vrednost različita od nule i koja karakteriše deo energije koja se prenosi na daljinu; aktivna komponenta odgovara komponenti brzine čestica koja je u fazi sa zvučnim pritiskom;
- b) reaktivna komponenta, čija je srednja vrednost nula i koja karakteriše deo energije koja se ne prenosi na daljinu već se "skladišti" u lokalnom zvučnom polju; reaktivna komponenta odgovara komponenti brzine čestica koja je u kvadraturi sa zvučnim pritiskom.

U cilju izvođenja izraza za aktivnu i reaktivnu komponentu intenziteta zvuka posmatra se harmonijski zvučni talas čiji se zvučni pritisak menja po zakonu:

$$p(x,t) = A_p(x) \exp[j(\omega t + \phi_p(x))] \quad (4.13)$$

gde je: $A_p(x)$ prostorno zavisna amplituda zvučnog pritiska $\phi_p(x)$ je prostorno zavisna faza zvučnog pritiska¹.

Pojavom zvučnih oscilacija, elastična sredina kroz koju se prostire talas izložena je atmosferskom, i zvučnom pritisku koji se menja od tačke do tačke. Promene pritiska dovode do poremećaja ravnoteže sila koje deluju na elemente elastične sredine, tako da dolazi do pomeranja ukupne mase fluida elastične sredine. Primenom II Njutnovog zakona na masu fluida u elementarnom paralelopipedu, može se izvesti jednačina kretanja u pravcu prostiranja zvučnih talasa. Jednačina daje vezu između gradijenta zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine u vremenskom domenu [10]:

¹ Eksplicitno izražavanje prostorne zavisnosti amplitude i faze u narednim izvođenjima biće izbegnuto zbog lakšeg pisanja

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial v_x}{\partial t} \Rightarrow v_x = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt, \quad (4.14)$$

ili u frekvencijskom domenu:

$$v_x = \frac{j}{\omega \rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (4.15)$$

Gradijent pritiska u pravcu prostiranja zvučne energije određuje se kao [20]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \left[\frac{dA_p}{dx} + j \frac{d\phi_p}{dx} A_p \right] \mathbf{exp}[j(\omega t + \phi_p)], \quad (4.16)$$

dok je brzina oscilovanja čestica:

$$v_x = \frac{j}{\omega \rho_0} \left[-A_p \frac{d\phi_p}{dx} + j \frac{dA_p}{dx} \right] \mathbf{exp}[j(\omega t + \phi_p)]. \quad (4.17)$$

Aktivna komponenta intenziteta zvuka određuje se kao proizvod zvučnog pritiska i komponente brzine čestice, koja je u fazi sa pritiskom:

$$I_a(x, t) = -\frac{1}{\omega \rho_0} A_p^2 \frac{d\phi_p}{dx} \mathbf{cos}^2(\omega t + \phi_p) = I_a(x) \mathbf{cos}^2(\omega t + \phi_p). \quad (4.18)$$

Srednja vrednost aktivnog intenziteta zvuka određuje se vremenskim usrednjavanjem jednačine (4.18):

$$\bar{I}_a(x) = -\frac{1}{2\omega \rho_0} A_p^2 \frac{d\phi_p}{dx}. \quad (4.19)$$

Reaktivna komponenta intenziteta zvuka određena je proizvodom zvučnog pritiska i komponente brzine čestice, koji je u kvadraturi sa pritiskom:

$$I_{re}(x, t) = -\frac{1}{4\omega \rho_0} \frac{dA_p^2}{dx} \mathbf{sin} 2(\omega t + \phi_p) = I_{re}(x) \mathbf{sin} 2(\omega t + \phi_p), \quad (4.20)$$

gde je srednja vrednost jednaka nuli.

Aktivna komponenta intenziteta proporcionalna je prostornom gradijentu faze zvučnog pritiska, dok je reaktivna komponenta proporcionalna prostornom gradijentu srednje-kvadratnog pritiska.

Ukupni intenzitet zvuka jednak je zbiru aktivne i reaktivne komponente:

$$\begin{aligned} I(x, t) &= -\frac{1}{\omega \rho_0} A_p^2 \frac{d\phi_p}{dx} \mathbf{cos}^2(\omega t + \phi_p) - \frac{1}{4\omega \rho_0} \frac{dA_p^2}{dx} \mathbf{sin} 2(\omega t + \phi_p) \\ &= 2\bar{I}_a(x) \mathbf{cos}^2(\omega t + \phi_p) + I_{re}(x) \mathbf{sin} 2(\omega t + \phi_p) \\ &= \bar{I}_a(x) [1 + \mathbf{cos} 2(\omega t + \phi_p)] + I_{re}(x) \mathbf{sin} 2(\omega t + \phi_p) \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.2.1 Progresivni ravni talas

Za slučaj nastajanja i prostiranja zvučnog talasa u cevi beskonačne dužine (ili slučaj prostiranja ravnih talasa u slobodnom zvučnom polju) prostire se samo progresivni ravni talas čiji se zvučni pritisak menja po zakonu:

$$p(x, t) = A_p \cos(\omega t - kx + \phi). \quad (4.22)$$

Amplituda progresivnog ravanskog talasa A_p je nezavisna od posmatrane pozicije, dok je faza proporcionalna rastojanju od mesta nastajanja zvučnih talasa ($-kx$).

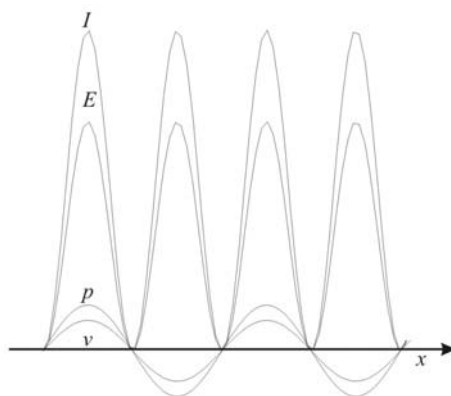
Gustine kinetičke i potencijalne energije su jednake i iznose

$$E_k(x, t) = E_p(x, t) = \frac{A_p^2}{2\rho c^2} \cos^2(\omega t - kx + \phi) = \frac{E(x, t)}{2}, \quad (4.23)$$

dok trenutni intenzitet ima vrednost

$$I(x, t) = \frac{A_p^2}{\rho c} \cos^2(\omega t - kx + \phi) = cE(x, t). \quad (4.24)$$

Odnos intenziteta i gustine zvučne energije je konstantan i nezavistan od pozicije i vremena, a arednji intenzitet ima vrednost $\bar{I} = \frac{1}{2}[A_p^2 / \rho_0 c] = c\bar{E}$. Prostorna raspodela akustičkih veličina za progresivni ravni talas prikazana je na sl. 3.1. Vidi se da je energija koncentrisana u periodično raspoređenim intervalima u razmacima od $\frac{1}{2}\lambda$. Intenzitet u bilo kojoj tački menja se sa vremenom, ali ni jednog trenutka nema negativnu vrednost.



Sl. 4.1 Prostorna raspodela akustičkih veličina za progresivni ravni talas [20]

Progresivni ravni talas je primer čistog aktivnog zvučnog polja, jer je vrednost reaktivne komponente intenziteta zvuka u bilo kojoj tački i u bilo kojem trenutku jednaka nuli, što proizilazi iz jednačine (4.20), za $A_p = \text{const}$.

Izraz (4.24), koji definiše trenutni ukupni intenzitet zvuka, identičan je izrazu za aktivnu komponentu intenziteta zvuka određenu jednačinom (4.18) za $\phi_p = -kx + \phi$:

$$I_a = -\frac{1}{\omega\rho_0} A_p^2 \frac{d(-kx + \phi)}{dx} \cos^2(\omega t - kx + \phi) = \frac{A_p^2}{\rho_0 c} \cos^2(\omega t - kx + \phi) = I(x, t).$$

Srednja vrednost ukupnog intenziteta zvuka jednaka je srednjoj vrednosti aktivne komponente intenziteta:

$$\bar{I} = \bar{I}_a = -\frac{1}{2\omega\rho_0} A_p^2 \frac{d\phi_p}{dx} = \frac{A_p^2}{2\rho_0 c} = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c}, \quad (4.25)$$

gde je: p_{rms} - efektivna vrednost zvučnog pritiska.

Jednačina (4.25) definiše veza između intenziteta zvuka i zvučnog pritiska u slobodnom zvučnom polju i za slučaj prostiranja ravnih zvučnih talasa.

4.2.2 Čist stojeći talas

Čist stojeći talas nastaje u cevi interferencijom progresivnog talasa i reflektovanog talasa na drugom kraju cevi, bez gubitaka. Izraz za zvučni pritisak ima oblik:

$$p(x,t) = 2A_p \cos(\omega t + \phi_1) \cos(kx + \phi_2). \quad (4.26)$$

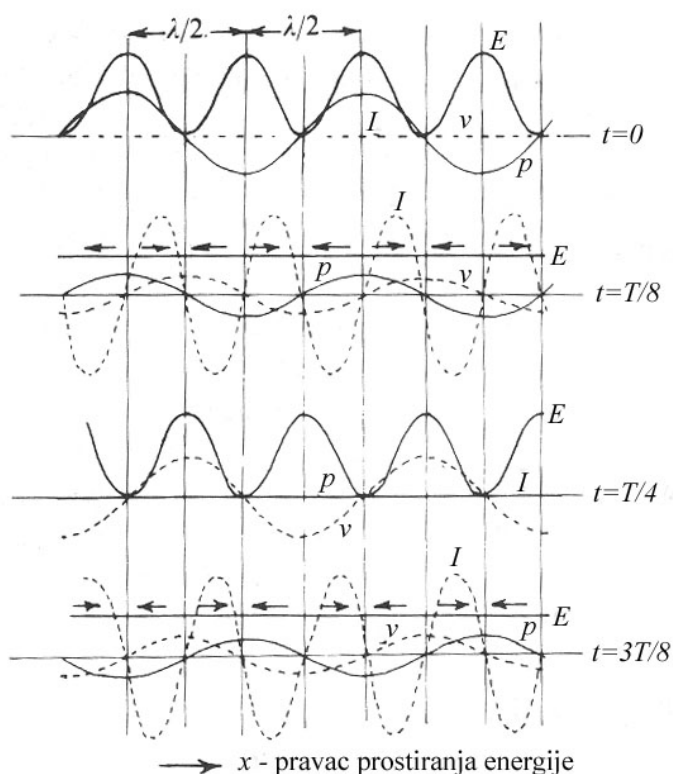
Ukupna gustina energije je data kao:

$$E(x,t) = \frac{A_p^2}{2\rho_0 c^2} [1 + \cos(2\omega t + 2\phi_1) \cos(2kx + 2\phi_2)], \quad (4.27)$$

a intenzitet zvuka kao

$$I(x,t) = \frac{A_p^2}{2\rho_0 c} [\sin(2\omega t + 2\phi_1) \sin(2kx + 2\phi_2)]. \quad (4.28)$$

Prostorna raspodela akustičkih veličina za stojeći talas u vremenskim intervalima od 1/8 perioda prikazana je na sl. 4.2.



Sl. 4.2 Prostorna raspodela akustičkih veličina za stojeći talas [20]

Za stojeći talas, odnos trenutnih vrednosti intenziteta zvuka i energije nije konstantan kao kod čistog progresivnog talasa. Takođe, srednja vrednost intenziteta zvuka je na svim pozicijama jednaka nuli.

Trenutna vrednost intenziteta zvuka, data jednačinom (4.28), oslikava proces naizmenične koncentracije energije zvučnih talasa u kinetički i potencijalni oblik energije.

Čist stojeći talas je primer čistog reaktivnog zvučnog polja, gde je ukupni intenzitet jednak reaktivnoj komponenti intenziteta zvuka dok je aktivna komponenta jednaka nuli, tako da u ovom slučaju nema prostiranja energije na daljinu.

Drugi primer čistog reaktivnog zvučnog polja je idealno difuzno zvučno polje, gde je po definiciji protok energije u svim pravcima isti, tako da je intenzitet jednak nuli, pa nema prostiranja zvučne energije.

4.2.3 Stojeći talas

Primer stojećeg talasa je zvučno polje koje nastaje u Kundtovoj cevi pri ispitivanju zvučne apsorpcije malih uzoraka materijala čiji koeficijent refleksije u kompleksnom obliku ima oblik $R \cdot \exp(j\theta)$.

Stojeći talas nastaje interferencijom progresivnog talasa i reflektovanog talasa na drugom kraju cevi sa gubicima koji su određeni apsorpcionim osobinama ispitivanog materijala. Rezultujući zvučni pritisak u cevi je predstavljen kompleksnom eksponencijalnom jednačinom:

$$\underline{p}(x,t) = A\{\exp[j(\omega t - kx)] + R \cdot \exp(j\theta)\exp[j(\omega t + kx)]\}, \quad (4.29)$$

koja se može napisati u opštem obliku kao:

$$\underline{p}(x,t) = A_p(x)\exp(j\phi_p)\exp(j\omega t), \quad (4.30)$$

gde je rezultujuća faza zvučnog pritiska:

$$\phi_p = \tan^{-1} \frac{R \sin(kx + \theta) - \sin kx}{R \cos(kx + \theta) + \cos kx}, \quad (4.31)$$

a kvadrat rezultujuće amplitude:

$$A_p^2 = A^2[1 + R^2 + 2R \cos(2kx + \theta)]. \quad (4.32)$$

Prostorni gradijenti karakterističnih veličina stojećeg talasa su [20]:

$$\frac{d\phi_p}{dx} = k \frac{R^2 - 1}{1 + R^2 + 2R \cos(2kx + \theta)} = k \frac{A^2(R^2 - 1)}{A_p^2}, \quad (4.33)$$

$$\frac{dA_p^2}{dx} = -4A^2kR \sin(2kx + \theta). \quad (4.34)$$

Zamenom jednačina (4.33) i (4.34) u jednačine (4.18) - (4.20), dobijaju se izrazi za izračunavanje aktivne i reaktivne komponente intenziteta zvuka [20]:

$$I_a(x,t) = \frac{A^2}{\rho_0 c} (1 - R^2) \cos^2(\omega t + \phi_p), \quad \bar{I}_a = \frac{A^2}{2\rho_0 c} (1 - R^2), \quad (4.35)$$

$$I_{re} = \frac{A^2}{\rho_0 c} R \sin(2kx + \theta) \sin 2(\omega t + \phi_p), \quad \bar{I}_{re}(x) = 0. \quad (4.36)$$

Ukupni trenutni intenzitet je suma aktivne i reaktivne komponente:

$$I(x,t) = \frac{A^2}{\rho_0 c} [(1 - R^2) \cos^2(\omega t + \phi_p) + R \sin(2kx + \theta) \sin 2(\omega t + \phi_p)] \quad (4.37)$$

Srednji aktivni intenzitet je nezavistan od promenljive x i uniforman je duž cevi, a srednja vrednost reaktivnog intenziteta je jednaka nuli. Odnos amplituda reaktivnog i aktivnog

intenziteta menja se sa pozicijom i ima maksimalnu vrednost $R/(1-R^2)$, na pozicijama maksimalne i minimalne srednje kvadratne brzine čestica, i minimalnu vrednost nula pri maksimalnom i minimalnom srednje-kvadratnom pritisku, respektvno.

4.3 KOMPLEKSNI INTENZITET

4.3.1 Definicija kompleksnog intenziteta

Kako su, u opštem slučaju, zvučni pritisak i brzina oscilovanja čestica elastične sredine kompleksne veličine koje se mogu predstaviti u kompleksnoj notaciji kao:

$$\underline{p}(x,t) = A_p(x) \exp(j\phi_p) \exp(j\omega t), \quad (4.38)$$

$$\underline{v}(x,t) = A_v(x) \exp(j\phi_v) \exp(j\omega t), \quad (4.39)$$

tako je i intenzitet zvuka kompleksna veličina čija realna i imaginarna komponenta predstavljaju aktivni i reaktivni intenzitet, respektivno [55]:

$$\underline{\Pi}(x) = I(x) + jJ(x). \quad (4.40)$$

Kompleksna priroda intenziteta zvuka je posledica činjenice da su dva činioaca energetskog toka, pritisak i brzina čestica, fazno pomereni.

Uvođenjem veličine kompleksnog intenziteta zvuka $\underline{\Pi}(x)$, ukupni trenutni intenzitet zvuka dat jednačinom (4.21), može se sažetije napisati kao [20]:

$$I(x,t) = \mathbf{Re}\{\underline{\Pi}(x)[1 + \exp(-2j(\omega t + \phi_p))]\}, \quad (4.41)$$

Kako aktivna komponenta intenziteta zvuka predstavlja najčešće merenu veličinu, uobičajeno je da se ta komponenta obeležava jednostavno samo kao I , što će i u daljem tekstu biti korišćeno.

Trenutna vrednost intenziteta zvuka određena je proizvodom zvučnog pritiska i brzine čestice:

$$I(x,t) = A_p A_v \cos(\omega t + \phi_p) \cos(\omega t + \phi_v) \quad (4.42)$$

Matematičkim transformacijama jednačina (4.42), može se svesti na oblik jednačine (4.41), odakle sledi da je kompleksni intenzitet dat kao:

$$\underline{\Pi} = I + jJ = \frac{1}{2} A_p A_v \exp(j\phi_r), \quad (4.43)$$

a njegove komponente:

$$I = \mathbf{Re}\{\underline{\Pi}\} = \frac{1}{2} A_p A_v \cos(\phi_r), \quad (4.44)$$

$$J = \mathbf{Im}\{\underline{\Pi}\} = \frac{1}{2} A_p A_v \sin(\phi_r), \quad (4.45)$$

gde je ϕ_r - fazna razlika zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica elastične sredine.

Ako se uvedu oznake za kompleksne amplitude zvučnog pritiska i brzine oscilovanja čestica, $\underline{A}_p = A_p \exp(j\phi_p)$ i $\underline{A}_v = A_v \exp(j\phi_v)$, tada se kompleksni intenzitet može izraziti kao [55]:

$$\underline{\Pi} = \frac{1}{2} \underline{A}_p \underline{A}_v^*, \quad (4.46)$$

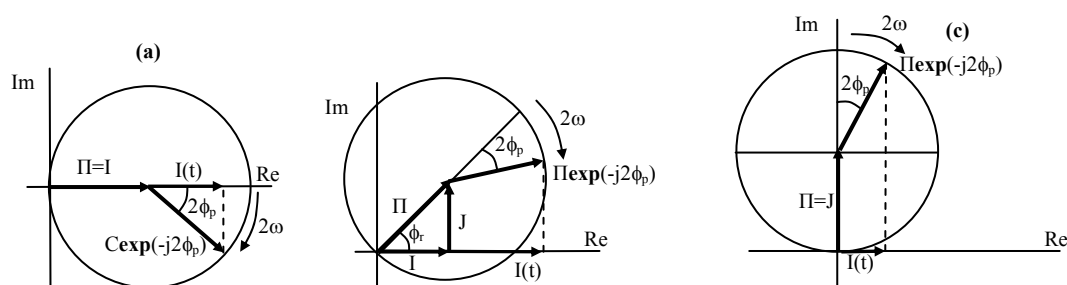
a njegove komponente, aktivna i reaktivna, kao:

$$I = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\underline{A}_p \underline{A}_v^*\}, \quad (4.47)$$

$$J = \frac{1}{2} \operatorname{Im}\{\underline{A}_p \underline{A}_v^*\}. \quad (4.48)$$

Trenutna vrednost intenziteta zvuka data jednačinom (4.41) može se grafički predstaviti korišćenjem fazorskog dijagrama, na kojem realna komponenta ukupnog fazora, čiji pokretni deo rotira u pravcu kazaljke na satu rotacionom brzinom 2ω , predstavlja trenutnu vrednost intenziteta zvuka [20]. Na sl. 4.3 dat je fazorski dijagram za tri karakteristična slučaja:

- pritisak i brzina u fazi, ravni progresivni talas: $\phi_r = 0 \Rightarrow I = \frac{1}{2} A_p A_v, J = 0$
- pritisak i brzina u kvadraturi: $\phi_r = \frac{\pi}{4} \Rightarrow I = J = \frac{A_p A_v}{2\sqrt{2}}$
- pritisak i brzina u protivfazi, čist stojeći talas: $\phi_r = \pi \Rightarrow I = 0, J = \frac{1}{2} A_p A_v$



Sl. 4.3 Fazorsko predstavljanje kompleksnog intenziteta zvuka

4.3.2 Kompleksni intenzitet kao vektorska veličina

Analiza kompleksnog intenziteta za zvučno polje koje nastaje prostiranjem zvučnih talasa u samo jednom pravcu može se uopštiti i za zvučna polja koja nastaju prostiranjem u sva tri ortogonalna pravca. Intenzitet zvuka je vektorska veličina

$$\underline{\underline{\Pi}}(\vec{r}) = \vec{I}(\vec{r}) + j\vec{J}(\vec{r}), \quad (4.49)$$

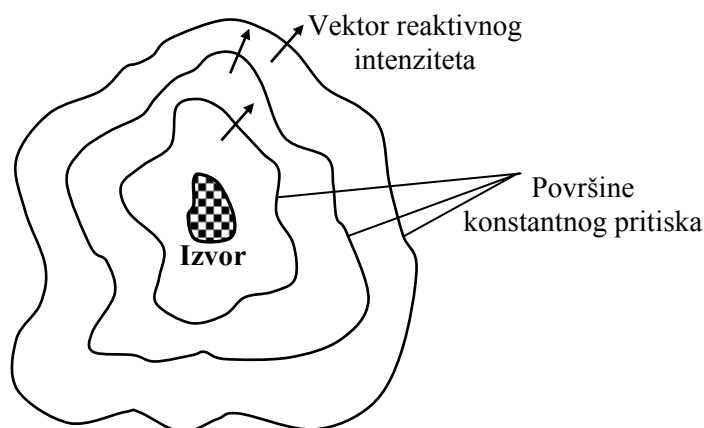
i njegove ortogonalne komponente aktivnog i reaktivnog intenziteta određene su odgovarajućim komponentama prostornih gradijenata faze pritiska i srednje-kvadratnog pritiska, respektivno [48]:

$$\vec{I}(\vec{r}) = \frac{1}{2\omega\rho_0} A_p^2(\vec{r}) \operatorname{grad} \phi_p(\vec{r}), \quad (4.50)$$

$$\vec{J}(\vec{r}) = -\frac{1}{4\omega\rho_0} \operatorname{grad} A_p^2(\vec{r}). \quad (4.51)$$

Prikazane jednačine za komponente aktivnog i reaktivnog intenziteta zvuka pokazuju da je aktivna komponenta intenziteta zvuka, u harmonijskom polju, usmerena normalno na površinu uniformne faze koja definiše talasni front, dok je vektor reaktivnog intenziteta usmeren normalno na površinu uniformnog srednje-kvadratnog pritiska (sl. 4.4.).

Proporcionalnost vektora aktivnog intenziteta i prostornog gradijenta faze zvučnog pritiska ukazuje da cirkulacija vektora aktivnog intenziteta pokazuje pravac protoka zvučne energije.



Sl. 4.4 Orijentacija vektora reaktivnog intenziteta [20]

Proporcionalnost vektora reaktivnog intenziteta i prostornog gradijenta srednje-kvadratnog pritiska ukazuje na prisustvo oscilatornog protoka energije, čak i onda kada je ukupni srednje-kvadratni pritisak uniforman, kao što je to slučaj sa zvučnim poljem u velikoj reverberacionoj komori [49]. Pravac reaktivne komponente intenziteta suprotan je pravcu gradijenta srednje-kvadratnog pritiska, tako da konvergencija reaktivne komponente vektora intenziteta ka tački ukazuje na oblast niskog akustičkog pritiska, odnosno ponore zvučnog polja, dok divergencija reaktivne komponente ukazuje na oblast koncentracije visokog pritiska (izvori zvučnog polja).

Navedene osobine komponenti intenziteta zvuka mogu se ilustrovati na primeru zvučnog polja koje nastaje interferencijom ravanskog talasa koji se prostire u x -pravcu i čistog stojećeg talasa koji se prostire u pravcu y -ose [20]:

$$p_1(x, y, t) = A \exp[j(\omega t - kx)],$$

$$p_2(x, y, t) = 2B \cos(ky) \exp(i\omega t).$$

Vektor kompleksnog intenziteta određuje se primenom jednačine (4.43), tako da su njegove međusobno ortogonalne komponente:

$$\underline{\Pi}_x = \frac{1}{2\rho_0 c} [A^2 + 2AB \cos(ky) \cos(kx) + j2AB \cos(ky) \sin(kx)], \quad (4.52)$$

$$\underline{\Pi}_y = \frac{1}{2\rho_0 c} [2AB \sin(kx) \sin(ky) + j(2AB \cos(kx) \sin(ky) + 2B^2 \sin(2ky))], \quad (4.53)$$

Međusobno ortogonalne komponente aktivnog intenziteta su:

$$I_x = \text{Re}\{\underline{\Pi}_x\} = \frac{1}{2\rho_0 c} [A^2 + 2AB \cos(ky) \cos(kx)], \quad (4.54)$$

$$I_y = \text{Re}\{\underline{\Pi}_y\} = \frac{AB}{\rho_0 c} \sin(kx) \sin(ky). \quad (4.55)$$

Slično, komponente reaktivnog intenziteta su:

$$J_x = \text{Im}\{\underline{\Pi}_x\} = \frac{AB}{\rho_0 c} \cos(ky) \sin(kx), \quad (4.56)$$

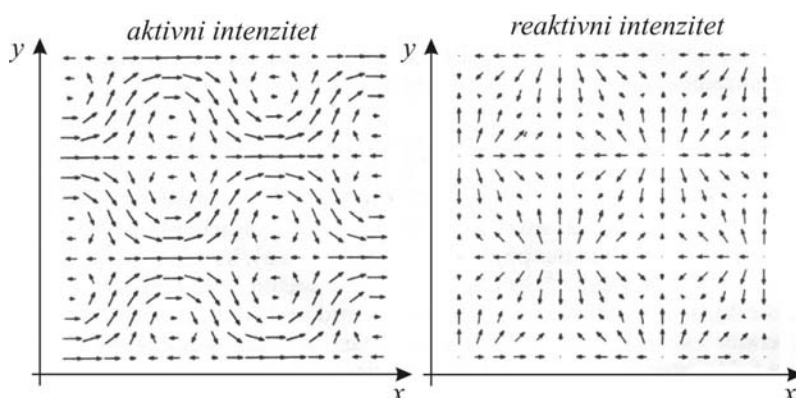
$$J_y = \mathbf{Im}\{\underline{\Pi}_y\} = \frac{1}{2\rho_0 c} [2AB \cos(kx) \sin(ky) + 2B^2 \sin(2ky)]. \quad (4.57)$$

Prostorni dijagram aktivnog i reaktivnog intenziteta za interferentno polje ravanskog i stojećeg talasa prikazan je na sl. 4.5. Amplitude aktivnog i reaktivnog intenziteta koje određuju dužine prikazanih vektora na dijagramima, određuju se kao:

$$|I| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$$

$$|J| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$$

Uglovi koje vektori aktivnog i reaktivnog intenziteta zaklapaju sa x -osom dati su kao $\tan^{-1}(I_y/I_x)$, odnosno $\tan^{-1}(J_y/J_x)$.



Sl. 4.5 Prostorni dijagram aktivne i reaktivne komponente intenziteta zvuka [20]

Kod prostornog dijagrama aktivnog intenziteta pojavljuju se oblasti sa cirkularnim protokom energije koja okružuje tačke nultog pritiska. Raspodela vektora reaktivnog intenziteta sadrži oblasti divergencije, skoncentrisane na oblasti maksimalnog akustičkog pritiska, i oblasti konvergencije skoncentrisane u oblasti gde je pritisak nula. Za razliku od raspodele aktivnog intenziteta, raspodela reaktivnog intenziteta ne pokazuje tendenciju postojanja vijugavih putanja.

Prostorna integracija komponente I_x po promenljivoj y , duž intervala koji odgovara talasnoj dužini, daje srednju snagu progresivnog ravanskog talasa, dok odgovarajuća integracija po promenljivoj x daje nulu, jer se radi o stojećem talasu.

4.4 KLASIFIKACIJA VEKTORSKOG POLJA INTENZITETA ZVUKA

Klasifikacija vektorskih polja može se izvršiti na osnovu njihovih osnovnih karakteristika, izvornosti i vrtložnosti, koje su definisane divergencijom i rotorom odgovarajuće vektorske veličine.

Divergencija vektorske veličine određuje oblasti u kojima postoje izvori i ponori vektorskih polja. U oblastima gde je divergencija pozitivna postoji barem jedna tačka koja predstavlja izvor polja, a u oblastima gde je divergencija negativna postoji barem jedna tačka koja predstavlja ponor polja. U oblastima gde je divergencija jednaka nuli ne postoje ni izvori ni ponori polja.

Rotor vektorske funkcije definiše vrtložnost vektorskog polja. Kod vektorskih polja sa rotorom ili cirkulacijom vektora jednakim nuli, linije polja su bezvrtložne, dok su kod vektorskih polja sa rotorom različitim od nule linije polja vrtložne.

U teoriji polja postoje sledeće četiri kategorije vektorskih polja:

- *potencijalna* (bezvrtložna ili laminarna) *polja* u čijim je svim tačkama cirkulacija vektora definisana rotorom jednaka nuli, a divergencija vektora različita od nule, $\mathbf{rot} \vec{A} = 0, \mathbf{div} \vec{A} \neq 0$,
- *solenoidna* (vrtložna) *polja* u čijim je svim tačkama $\mathbf{rot} \vec{A} \neq 0, \mathbf{div} \vec{A} = 0$,
- *Laplace-ova polja* u čijim je svim tačkama $\mathbf{rot} \vec{A} = 0, \mathbf{div} \vec{A} = 0$, i
- *složena polja* u čijim je svim tačkama $\mathbf{rot} \vec{A} \neq 0, \mathbf{div} \vec{A} \neq 0$.

Dakle, definisanjem rotora i divergencije komponenti intenziteta zvuka mogu se bliže odrediti karakteristike vektorskog polja intenziteta zvuka. S obzirom da je raspodela za trodimenzionalna polja suviše komplikovana, za ilustraciju osobina komponenti intenziteta zvuka može se posmatrati dvodimenzionalno polje, odnosno prostiranje zvučne energije u dva ortogonalna pravca.

U opštem slučaju, cirkulacija vektora polja se matematički izračunata uz pomoć rotora polja koji se definiše kao vektorski proizvod operatora ∇ sa vektorom polja. Za vektor kompleksnog intenziteta, $\vec{\Pi} = \Pi_x \vec{i} + \Pi_y \vec{j} + \Pi_z \vec{k}$, u pravougaonom koordinatnom sistemu, rotor polja definisan je kao:

$$\mathbf{rot} \vec{\Pi} = \nabla \times \vec{\Pi} = \left(\frac{\partial \Pi_z}{\partial y} - \frac{\partial \Pi_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial \Pi_x}{\partial z} - \frac{\partial \Pi_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial \Pi_y}{\partial x} - \frac{\partial \Pi_x}{\partial y} \right) \vec{k}. \quad (4.58)$$

Za slučaj prostiranja zvučne energije u dva ortogonalna pravca (x, y) , rotor vektora kompleksnog intenziteta ima samo komponentu u pravcu jediničnog vektora \vec{k} . Izražavanjem vektora intenziteta zvuka preko proizvoda pritiska i vektora brzine oscilovanja čestica elastične sredine koji, s obzirom na karakter zvučnog polja, ima komponente u dva međusobno ortogonalna pravca, izraz za rotor vektora intenziteta zvuka može se predstaviti kao:

$$\mathbf{rot} \vec{\Pi}(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial (p v_y^*)}{\partial x} - \frac{\partial (p v_x^*)}{\partial y} \right] \vec{k} = \frac{1}{2} \left[p \left\{ \frac{\partial v_y^*}{\partial x} - \frac{\partial v_x^*}{\partial y} \right\} + v_y^* \frac{\partial p}{\partial x} - v_x^* \frac{\partial p}{\partial y} \right] \vec{k}. \quad (4.59)$$

Polazeći od jednačina kretanja u kompleksnom obliku, izvedenih za nestišljive fluide [10,20], za oba pravca prostiranja zvučne energije može se pokazati da izraz u uglastoj zagradi, koji predstavlja rotor vektora brzine oscilovanja, ima vrednost nula za prostiranje talasa u nestišljivim fluidima.

Dakle, pri prostiranju zvučnih talasa u nestišljivim fluidima rotor kompleksnog intenziteta ima vrednost:

$$\mathbf{rot} \vec{\Pi}(t) = \frac{1}{2} \left[v_y^* \frac{\partial p}{\partial x} - v_x^* \frac{\partial p}{\partial y} \right] \vec{k}. \quad (4.60)$$

Zamenom jednačina kretanja u kompleksnom obliku u jednačinu (4.60) dobija se opšti izraz za rotor kompleksnog intenziteta u dvodimenzionalnom zvučnom polju kao:

$$\mathbf{rot} \vec{\Pi}(t) = \frac{j \omega \rho_0}{2} \left[v_x^* v_y - v_y^* v_x \right] \vec{k}. \quad (4.61)$$

Za harmonijsko zvučno polje, dobija se izraz za rotor kompleksnog intenziteta u obliku [20]:

$$\mathbf{rot} \vec{\Pi}(t) = \rho_0 \omega A_{v_x} A_{v_y} \sin(\phi_{v_x} - \phi_{v_y}) \vec{k}, \quad (4.62)$$

gde su A_{vx} i A_{vy} amplitude brzine oscilovanja čestica, a ϕ_{vx} i ϕ_{vy} početne faze brzine oscilovanja čestica za x i y pravac.

S obzirom da je rotor algebarskog zbira vektorskih funkcija jednak algebarskom zbiru rotora vektorskih funkcija, rotor kompleksnog intenziteta može se predstaviti kao zbir rotora aktivne i reaktivne komponente intenziteta zvuka:

$$\mathbf{rot} \underline{\underline{I}}(t) = \mathbf{rot} \vec{I}(t) + j \mathbf{rot} \vec{J}(t). \quad (4.63)$$

Poređenjem jednačina (4.62) i (4.63) dobija se da je:

$$\begin{aligned} \mathbf{rot} \vec{I}(t) &= \mathbf{rot} \vec{I} = \rho_0 \omega A_{vx} A_{vy} \mathbf{sin}(\phi_{vx} - \phi_{vy}) \vec{k}, \\ \mathbf{rot} \vec{J}(t) &= \mathbf{rot} \vec{J} = 0. \end{aligned} \quad (4.64)$$

Dakle, za harmonijsko dvodimenzionalno zvučno polje, rotor reaktivne komponente intenziteta zvuka jednak je nuli, dok je rotor aktivne komponente trenutnog intenziteta zvuka veličina koja nije vremenski zavisna i stoga je jednaka rotoru srednjeg aktivnog intenziteta.

Za harmonijsko dvodimenzionalno zvučno polje predstavljeno preko kompleksnog zvučnog pritiska, \underline{p} , i komponentama brzine oscilovanja čestice \underline{v}_x i \underline{v}_y , komponente aktivnog i reaktivnog intenziteta su date kao:

$$\vec{I} = I_x \vec{i} + I_y \vec{j} = \frac{1}{2} \mathbf{Re}\{\underline{p} \underline{v}_x^*\} \vec{i} + \frac{1}{2} \mathbf{Re}\{\underline{p} \underline{v}_y^*\} \vec{j}, \quad (4.65)$$

$$\vec{J} = J_x \vec{i} + J_y \vec{j} = \frac{1}{2} \mathbf{Im}\{\underline{p} \underline{v}_x^*\} \vec{i} + \frac{1}{2} \mathbf{Im}\{\underline{p} \underline{v}_y^*\} \vec{j}. \quad (4.66)$$

Zamenom jednačina kretanja u kompleksnom obliku u prikazanim jednačinama, i diferenciranjem po prostornim koordinatama komponenti aktivnog i reaktivnog intenziteta u oba ortogonalna pravca, dobijaju se odgovarajuće komponente divergencije vektora [20]:

$$\mathbf{div} \vec{I} = \frac{1}{2\omega\rho_0} \mathbf{Im}\left\{p \left(\frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial y^2} \right)^*\right\}, \quad (4.67)$$

$$\mathbf{div} \vec{J} = -\frac{1}{2\omega\rho_0} \left[\left| \frac{\partial \underline{p}}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \underline{p}}{\partial y} \right|^2 + \mathbf{Re}\left\{p \left(\frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial y^2} \right)^*\right\} \right]. \quad (4.68)$$

Za slučaj harmonijskog dvodimenzionalnog zvučnog polja talasna akustička jednačina dobija oblik *Helmholtz*-ove jednačine:

$$\frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial y^2} = k^2 \underline{p} \Rightarrow \frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{p}}{\partial y^2} = k^2 \underline{p}^*$$

odakle sledi da je:

$$\mathbf{div} \vec{I} = \frac{1}{2\omega\rho_0} \mathbf{Im}\{k^2 \underline{p} \underline{p}^*\} = \frac{1}{2\omega\rho_0} \mathbf{Im}\{-k^2 |\underline{p}|^2\}, \quad (4.69)$$

$$\mathbf{div} \vec{J} = -\frac{1}{2\omega\rho_0} [\omega^2 \rho_0^2 (v_x^2 + v_y^2) + \mathbf{Re}\{-k^2 \underline{p} \underline{p}^*\}] = \omega \left[\frac{|\underline{p}|^2}{2\rho_0 c^2} - \frac{1}{2} \rho_0 (v_x^2 + v_y^2) \right]. \quad (4.70)$$

Na kraju se mogu sumirati izrazi za divergenciju aktivne i reaktivne komponente intenziteta zvuka za dvodimenzionalno harmonijsko polje:

$$\mathbf{div} \vec{I} = 0,$$

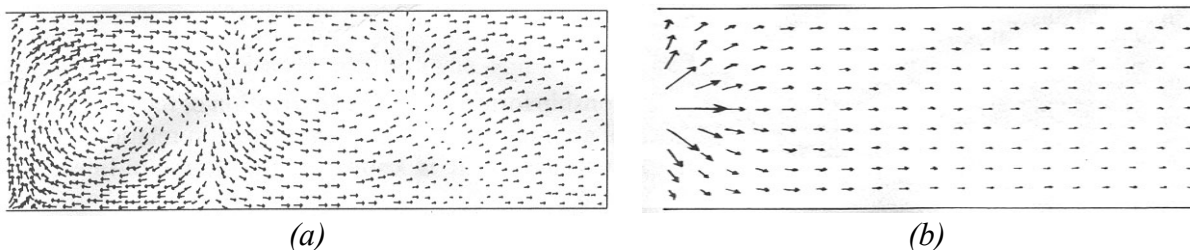
$$\mathbf{rot} \vec{I} = \rho_0 \omega A_{vx} A_{vy} \sin(\phi_{vx} - \phi_{vy}) \vec{k},$$

$$\mathbf{div} \vec{J} = \omega(E_p - E_k),$$

$$\mathbf{rot} \vec{J} = 0.$$

Prikazane jednačine pokazuju da je vektorsko polje aktivnog intenziteta zvuka solenoidnog (vrtložnog) tipa, dok je vektorsko polje reaktivnog intenziteta zvuka potencijalnog (bezvrtložnog) tipa. Promene potencijalne i kinetičke energije definišu oblasti u vektorskom polju reaktivnog intenziteta, gde postoje izvori ($E_p > E_k$), odnosno ponori ($E_p < E_k$).

Primeri vektorskog polja (sl. 4.6) aktivnog i reaktivnog intenziteta za slučaj prostiranja zvučnih talasa kroz kanal beskonačne dužine, ilustruju navedene osobine vektorskih polja.



Sl. 4.6 Prostorni dijagram (a) aktivne i (b) reaktivne komponente intenziteta zvuka za slučaj prostiranja zvučnih talasa kroz kanal [20]

FREKVENCIJSKI OPSEG POUZDANOG MERENJA INTENZITETA ZVUKA

PRINCIPI MERENJA INTENZITETA ZVUKA
SISTEMI ZA MERENJE INTENZITETA ZVUKA
OGRANIČENJA FREKVENCIJSKOG OPSEGA POUZDANOG MERENJA
PROŠIRENJE FREKVENCIJSKOG OPSEGA

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

5.1 PRINCIPI MERENJA INTENZITETA ZVUKA

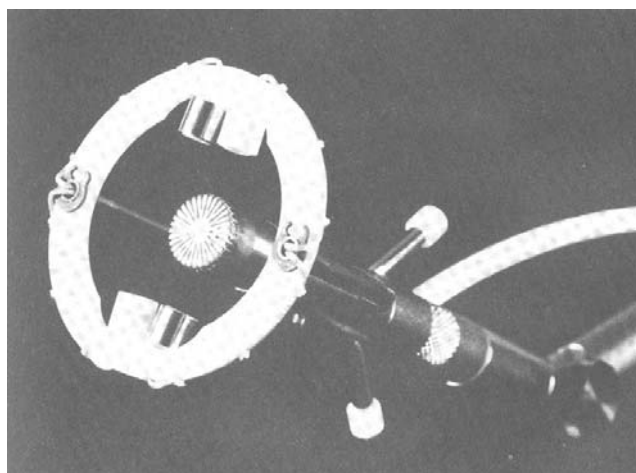
Za razliku od zvučnog pritiska koji je skalarna veličina, intenzitet zvuka ili energetski fluks je vektorska veličina određena pravcem, smerom i amplitutom. Zvučni pritisak, kao jedna od najčešće identifikovanih mernih veličina, može se bez većih teškoća identifikovati postavljanjem mernog mikrofona u ispitivano zvučno polje.

S obzirom da intenzitet zvuka predstavlja usrednjenu vrednost proizvoda zvučnog pritiska i odgovarajuće brzine oscilovanja čestica elastične sredine kroz koju se zvučni talas prostire, za merenje intenziteta zvuka potrebno je poznavati obe merne veličine. Postoje tri glavna merna principa na kojima se zasnivaju svi merni sistemi, počev od Olsonovog patenta iz 1931. godine pa sve do današnjih digitalnih mernih sistema [42]:

- *p-u* princip: korišćenje odvojenih pretvarača za zvučni pritisak i brzinu čestica,
- *p-p* princip: korišćenje dva (il više) identična pretvarača za merenje zvučnog pritiska, smeštena na zajedničkom držaču u različitim konfiguracijama,
- mikrofonski niz koji se koristi za rekonstrukciju zvučnog polja.

5.1.1 p-u princip

Intenzitet zvuka u pravcu ose merne sonde dobija se množenjem izlaznih signala pretvarača za zvučni pritisak i pretvarača za brzinu čestica. Na sl. 5.1 prikazana je komercijalna sonda norveškog proizvođača *Norwegian Electronics*, tip 216, koja ima standardni kondenzatorski mikrofoni i ultrazvučni pretvaračem za brzinu čestica sastavljen iz dva emitera i dva prijemnika ultrazvučnog snopa na međusobnom rastojanju od 28mm. Princip merenja brzine čestica zasniva se na ispaljivanju dva paralelna ultrazvučna snopa koji se prostoru kroz postojeće zvučno polje. Oscilatorno kretanje čestica fluida prouzrokovano postojećim zvučnim poljem utiče da, na mestu prijema ultrazvučnih talasa, postoji fazna razlika primljenih ultrazvučnih talasa. Ova fazna razlika se može povezati sa komponentom brzine čestica u pravcu prostiranja ultrazvučnog snopa [42].



Sl. 5.1 Sonda za merenje intenziteta zvuka na *p-u* principu [20]

U bilo kojoj tački između emitera i prijemnika brzina prostiranja ultrazvučnog talasa $u(x,t)$ kada ne postoji zvučno polje, jednaka je brzini prostiranja zvuka, c .

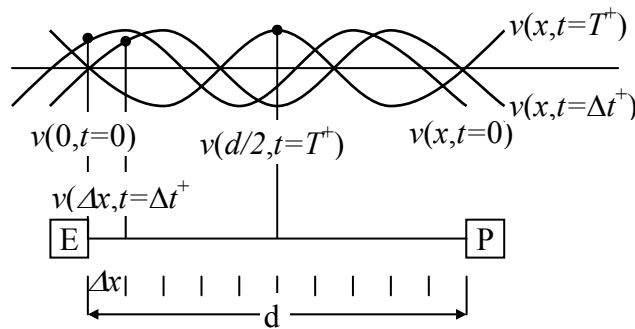
Kada se merna sonda pozicionira u zvučno polje postojećoj brzini prostiranja ultrazvučnog talasa superponira se brzina oscilovanja čestica $v(x,t)$ prouzrokovana postojećim zvučnim poljem. Tada je:

$$\begin{aligned} u^+(x,t) &= c + v(x,t), \\ u^-(x,t) &= c - v(x,t). \end{aligned} \quad (5.1)$$

gde je sa "+" označen ultrazvučni snop koji se prostire u pozitivnom smeru x -ose, a sa "-" ultrazvučni snop koji se prostire u negativnom smeru x -ose.

Ako rastojanje emitera i prijemnika ultrazvučnog snopa podelimo na M jednakih odsečaka, dužine Δx (sl. 5.2), tada vreme koje je potrebno da ultrazvučni snop pređe rastojanje Δx iznosi:

$$\begin{aligned} \Delta t^+ &= \frac{\Delta x}{c + v(x,t)} \\ \Delta t^- &= \frac{\Delta x}{c - v(x,t)} \end{aligned} \quad (5.2)$$



Sl. 5.2 Ilustracija stanja brzine čestica u različitim vremenskim intervalima [20]

Kako je $v \ll c$, to se prethodno navedene jednačine, korišćenjem *Taylor*-ovog niza, mogu aproksimirati sa:

$$\begin{aligned} \Delta t^+ &= \frac{\Delta x}{c} \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \approx \frac{\Delta x}{c} \left(1 - 1.2 \frac{v}{c}\right), \\ \Delta t^- &= \frac{\Delta x}{c} \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \approx \frac{\Delta x}{c} \left(1 + 0.8 \frac{v}{c}\right). \end{aligned} \quad (5.3)$$

Za ultrazvučni snop koji se prostire u pozitivnom smeru x -ose, ukupno vreme koje je potrebno da snop pređe rastojanje d , između emitera i prijemnika, dobija se kao suma M elementarnih vremena Δt^+ , koja se mogu izračunati koristeći jednačinu (5.3), vodeći računa da brzina čestice v na poziciji x zavisi od trenutka u kome se računa, a da to vreme zavisi od potrebnog vremena da ultrazvučni snop dospe do posmatrane pozicije. Imajući to u vidu ukupno vreme se može izračunati kao [20]:

$$t^+ = \sum_{j=1}^M \Delta t_j^+ = \frac{\Delta x}{c} \sum_{j=1}^M \left[1 - 1.2 \frac{v((N-1)\Delta x, \sum_{i=0}^{N-1} \Delta t_i^+)}{c}\right]. \quad (5.4)$$

Dakle, ultrazvučni snop, koji se prostire u pozitivnom smeru x -ose, stiže na poziciju prijemnika nakon vremenskog intervala t^+ od trenutka emisije snopa.

Prostiranje ultrazvučnog snopa u negativnom smeru x -ose posmatra se od trenutka emisije, t^+ , do trenutka prijema. U ovom slučaju, ukupno vreme koje je potrebno da snop pređe rastojanje

d , između prijemnika i emitera, dobija se kao suma M elementarnih vremena Δt^- , koja se mogu izračunati koristeći jednačinu (5.3). Ukupno vreme iznosi [20]:

$$t^- = \sum_{j=1}^M \Delta t_j^- = \frac{\Delta x}{c} \sum_{j=1}^M \left[1 + 0.8 \frac{v(N\Delta x, t^+ - \sum_{i=0}^{N-1} \Delta t_i^-)}{c} \right]. \quad (5.5)$$

Fazna razlika ultrazvučnih snopova, na frekvenciji ω_0 , data je izrazom:

$$\Delta\phi_0 = \Delta\phi_0^+ - \Delta\phi_0^- = \omega_0(t^+ - t^-) = \omega_0 \left(\frac{d}{c-v} - \frac{d}{c+v} \right) = \frac{2\omega_0 v d}{c^2 + v^2}. \quad (5.6)$$

Kako je ispunjen uslov da je $v \ll c$, tada je:

$$\Delta\phi_0 \approx \frac{2\omega_0 v d}{c^2}. \quad (5.7)$$

Dobijena jednačina opisuje princip merenja brzine oscilovanja čestica elastične sredine, konvertovanjem signala fazne razlike ultrazvučnih snopova u signal koji je analogan sa brzinom čestice.

Trenutna vrednost komponente intenziteta zvuka u pravcu ose merne sonde dobija se množenjem signala na izlazu kondenzatorskog mikrofona, koji je proporcionalan zvučnom pritisku, i signala koji je proporcionalan brzini čestica. Signal se dalje može vremenski usrednjavati u cilju dobijanja srednje vrednosti komponente aktivnog intenziteta.

5.1.2 p-p princip

Intenzitet zvuka u pravcu ose merne sonde dobija se obradom izlaznih signala dva pretvarača za zvučni pritisak. Na sl. 5.3 prikazana je komercijalna merna sonda danskog proizvođača *Brüel&Kjær*, tip 3583, sa dva standardna kondenzatorska mikrofona.



Sl. 5.3 Sonda za merenje intenziteta zvuka na p-p principu

Teorijskom razradom II Njutnovog zakona na modelu definisanog fluidnog prostora, zapreminske gustine ρ_0 , čije kretanje izazivaju promene zvučnog pritiska definisane gradijentom pritiska, brzina oscilovanja čestica fluidnog prostora može se povezati sa gradijentom pritiska pomoću jednačine kretanja čiji je opšti oblik [10,84,85]:

$$\mathbf{grad} p = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}. \quad (5.8)$$

Komponenta gradijenta pritiska u pravcu prostiranja zvučnih talasa, r , proporcionalna je komponenti ubrzanja čestice u istom pravcu:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial v_r}{\partial t}, \quad (5.9)$$

tako da se brzina čestica može dobiti integraljenjem gradijenta pritiska po vremenu

$$v_r(t) = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial r} d\tau . \quad (5.10)$$

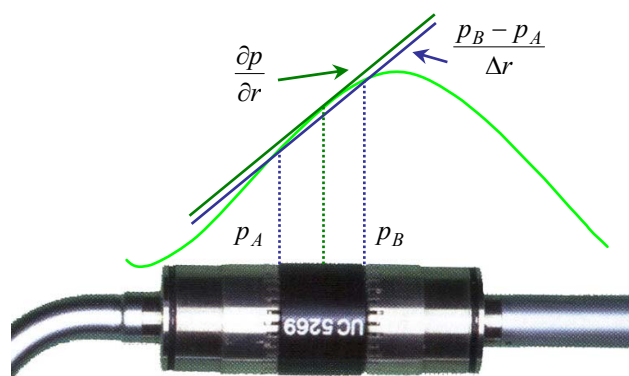
Činjenica da gradijent pritiska predstavlja kontinualnu funkciju koja opisuje brzinu kojom se trenutni pritisak menja sa rastojanjem, omogućuje proceduru aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom na nivou objektivnog i realnog rešenja koje uključuje korišćenje dva bliska, fazno uparena kondenzatorska mikrofona [1,23,84].

Primenom dva bliska, fazno uparena kondenzatorska mikrofona aproksimira se gradijent pritiska pravom linijom, deljenjem konačne razlike pritisaka na pozicijama mikrofona sa njihovim međusobnim rastojanjem (sl. 5.4). Dobijeni gradijent pritiska integrali se u cilju dobijanja brzine čestica elastične sredine:

$$v_r(t) = -\frac{1}{\rho_0 \Delta r} \int_{-\infty}^t [p_B(\tau) - p_A(\tau)] d\tau , \quad (5.11)$$

gde je Δr - rastojanje akustičkih centara kondenzatorskih mikrofona.

Dobijena vrednost brzine čestica odgovara brzini na poziciji akustičkog centra između dva mikrofona. Ova aproksimacija važi samo ako je rastojanje mikrofona malo u poređenju sa talasnom dužinom emitovanog zvuka ($\Delta r \ll \lambda$).



Sl. 5.4 Aproksimacija gradijenta pritiska konačnom razlikom [67]

Pritisak u središnjoj tački može takođe da se aproksimira srednjom aritmetičkom sredinom zvučnih pritisaka na pozicijama mikrofona:

$$p(t) \approx \frac{p_A(t) + p_B(t)}{2} . \quad (5.12)$$

Konačno, komponenta trenutnog intenziteta u pravcu prostiranja zvučnih talasa dobija se množenjem jednačina (5.11) i (5.12):

$$I_r(t) = -\frac{1}{2\rho_0 \Delta r} [p_A(t) + p_B(t)] \int_{-\infty}^t [p_B(\tau) - p_A(\tau)] d\tau . \quad (5.13)$$

Za primenu gornje jednačine neophodno je da kondenzatorski mikrofoni imaju identične impulsne odzive u mernom frekvecijskom opsegu i da integrator vrši tačnu integraciju.

5.2 SISTEMI ZA MERENJE INTENZITETA ZVUKA

Prvi pokušaj merenja intenziteta zvuka u složenim zvučnim poljima zabeležen je 1931 godine, kada je *Harry Olson*, zaposlen u Radio korporaciji Amerike, patentirao sistem za detekciju energetskog protoka zvučnih talasa, tzv. *Field-type Acoustic Wattmeter* (sl. 5.5), za koji je sledeće godine dobio i nagradu [20]. Intenzitet zvuka je određen kao proizvod dva signala dobijenih pomoću pretvarača za merenje zvučnog pritiska i pretvarača za merenje brzine čestica. Dobijanje proizvoda dva signala zasnivalo se na principa da se proizvod može dobiti iz razlike kvadrata zbira i razlike signala. Nekoliko godina kasnije isti autor razvio je sistem koji je omogućavao i frekvencijsku analizu signala uključivanjem pojasnih filtera (sl. 5.6).

Dec. 27, 1932.

H. F. OLSON

1,892,644

SYSTEM RESPONSIVE TO THE ENERGY FLOW OF SOUND WAVES

Filed May 29, 1931

Fig. 1.

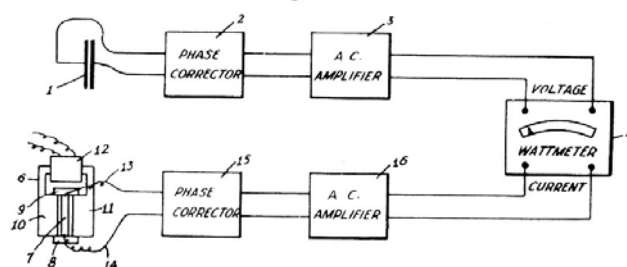


Fig. 2.

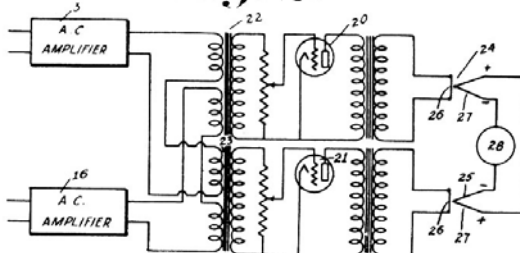
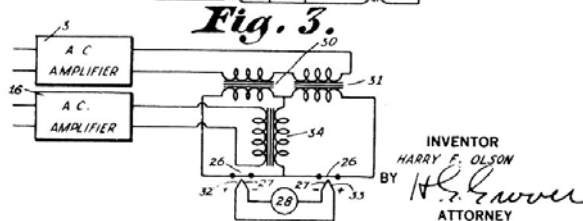
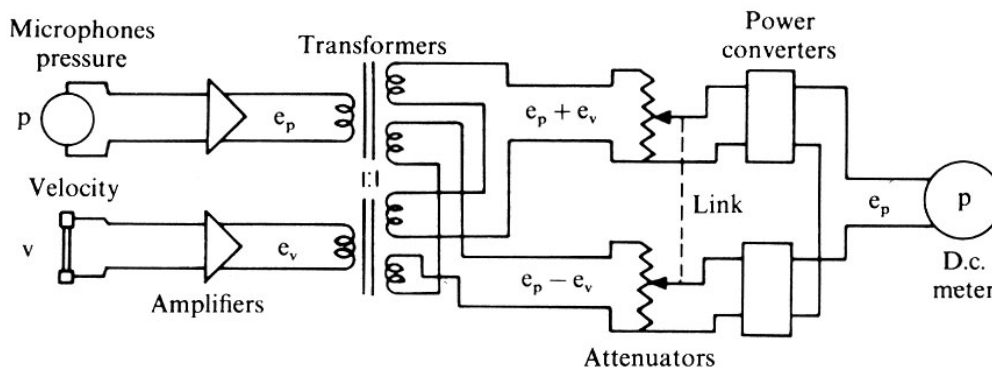


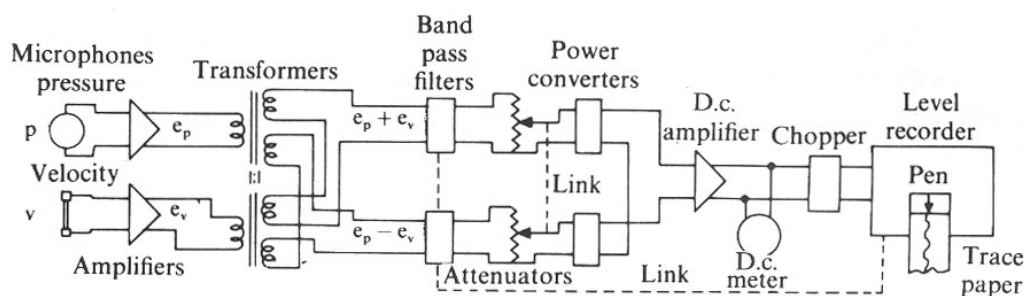
Fig. 3.



INVENTOR
HARRY F. OLSON
BY *H. F. Olson*
ATTORNEY



Sl. 5.5 Skica Olsonovog sistema za merenje intenziteta zvuka [20]



Sl. 5.6 Skica Olsonovog sistema za merenje intenziteta zvuka sa pojasnim filterima i pisacem [20]

Narednih dvadestak godina bilo je pokušaja razvijanja sistema za merenje intenziteta zvuka, ali bez značajnog uspeha, pre svega zbog velike osetljivosti sistema na ambijentalne uslove.

Značajan doprinos razvoju praktičnih mernih sistema dao je *Schultz*, 1956. godine, primenivši dvomikrofonski princip merenja koji je i danas u širokoj upotrebi, i to na bazi teorijske razrade aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom [85,86]. Signal brzine čestica dobijen je integracijom razlike signala koji potiču iz dva pretvarača za zvučni pritisak, na malom međusobnom rastojanju u poređenju sa talasnom dužinom zvuka na najvišoj ispitivanoj frekvenciji. Osnovni, ograničavajući faktor kod ovog sistema bili su pretvarači u obliku diskova koji su imali zadovoljavajuće performanse u laboratorijskim uslovima ali ne i u realnim poljima.

Pionirski doprinos primeni intenziteta zvuka u određivanju zvučne snage izvora dali su sedamdesetih godina istraživači Južne Afrike: *Van Zyl, Anderson i Burger* [20]. Iako su u početku koristili dva posebna pretvarača za zvučni pritisak i brzinu čestica, kasnije su razvili prvi analogni merač intenziteta zvuka sa širokim frekvencijskim i dinamičkim opsegom zasnovan na primeni dva identična pretvarača za zvučni pritisak.

Prvi hibridni analogno-digitalni sistem razvio je jugoslovenski istraživač *Goran Pavić* krajem sedamdesetih godina [20]. Sistem je baziran na primeni Olsonovog principa, dva kondenzatorska mikrofona i jednog merača nivoa zvuka.

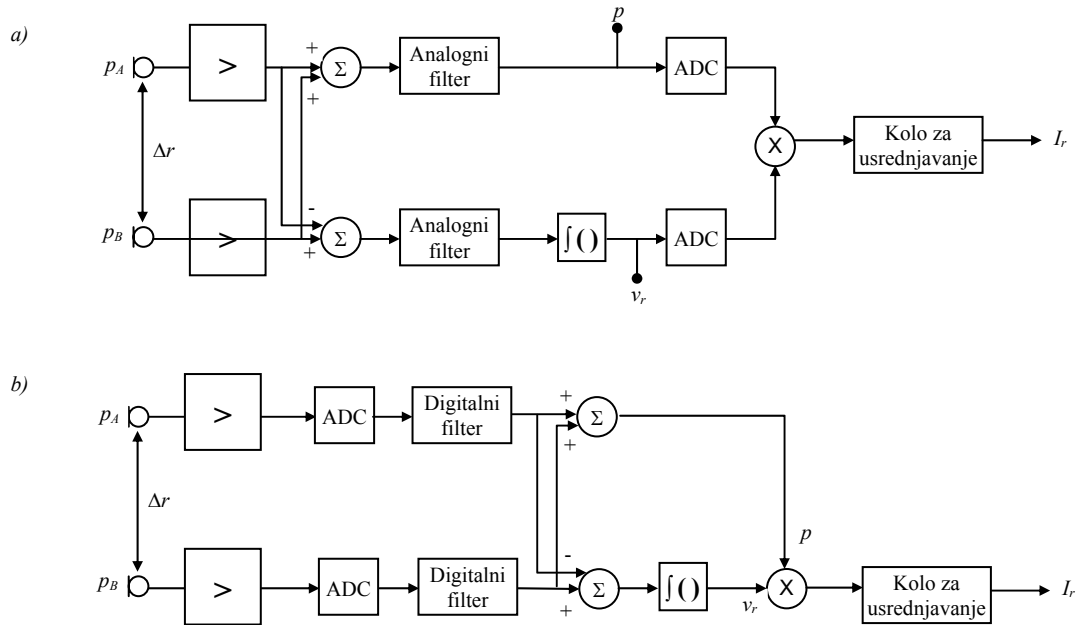
Nakon 1977. razvoj u polju kondenzatorskih mikrofona, specijalnih sonde za merenje intenziteta zvuka i digitalnih tehnika za obradu signala, omogućio je brzi razvoj i široko korišćenje savremenih instrumenata za merenje i frekvencijsku dekompoziciju signala intenziteta zvuka, koji se zasnivaju na primeni:

- direktne metode merenja, ili
- indirektna (FFT) metode merenja.

5.2.1 Sistemi za direktno merenje intenziteta zvuka

Sistemi za direktno merenje intenziteta zvuka zasnivaju se na direktnoj primeni jednačine (5.13) u vremenskom domenu i kola za sumiranje, oduzimanje i množenje signala kao i kola za integraciju i usrednjavanje signala. Frekvencijska dekompozicija signala vrši se identičnom primenom analognih (sl. 5.7a) ili digitalnih filteta (sl. 5.7b) oba signala dobijena na izlazu kondenzatorskih mikrofona. Na taj način dobija se frekvencijski spektar komponente intenziteta zvuka.

Primena sistema za direktno merenje intenziteta zvuka rezultira na izlazu sistema oktavnim spektrom intenziteta zvuka ili drugim užim pojasnim spektrom čija je širina propusnog opsega proporcionalna centralnoj frekvenciji.



Sl. 5.7 Blok dijagram sistema za direktno merenje intenziteta zvuka a) sa analognim filterima b) sa digitalnim filterima [26]

Veoma bitna prednost ovih sistema je da na izlazu mogu generisati signal koji je proporcionalan brzini čestica, što može biti veoma korisno pri merenju akustičke impedance i efikasnosti zračenja vibracionih površina.

5.2.2 Sistemi za indirektno merenje intenziteta zvuka

Sistemi za indirektno merenje intenziteta zvuka zasnivaju se na primenu algoritma za brzu Furijeovu transformaciju (FFT algoritmi) i činjenice da signali zvučnog pritiska i brzine čestica u vremenskom i frekvencijskom domenu, čine Furijeov transformacioni par [26], tako da je:

$$\underline{V}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (5.14)$$

$$\underline{P}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Primenom osobina Furijeove transformacije na jednačie (5.11) i (5.12) dobija se da je:

$$\underline{V}(\omega) = -\frac{1}{j\omega\rho_0\Delta r} [\underline{P}_B(\omega) - \underline{P}_A(\omega)] \quad (5.15)$$

$$\underline{P}(\omega) = \frac{1}{2} [\underline{P}_A(\omega) + \underline{P}_B(\omega)]$$

Spektar intenziteta zvuka u pravcu ose merne sonde, kao kompleksna veličina, izračunava se kao proizvod signala zvučnog pritiska i brzine čestica u frekvencijskom domenu:

$$\underline{\Pi}(\omega) = \underline{P}(\omega) \underline{V}^*(\omega) = -\frac{j}{2\omega\rho_0\Delta r} \{[\underline{P}_A(\omega) + \underline{P}_B(\omega)] \{ \underline{P}_B^*(\omega) - \underline{P}_A^*(\omega) \} \}. \quad (5.16)$$

Koristeći definicije autospektra i unakrsnog spektra signala na izlazu oba kondenzatorska mikrofona [26], intenzitet zvuka se može definisati kao:

$$\underline{\Pi}(\omega) = -\frac{1}{2\omega\rho_0\Delta r} [j\{G_{BB}(\omega) - G_{AA}(\omega)\} - j\{G_{AB}(\omega) - G_{BA}(\omega)\}]. \quad (5.17)$$

Kako za proizvod dva Furijeova spektra važi da je $\underline{G}_{AB}^* = \underline{G}_{BA}$, primenom ove osobine dobija se konačni izraz za spektar kompleksnog intenzitet zvuka:

$$\underline{\Pi}(\omega) = I(\omega) + jJ(\omega) = -\frac{1}{2\omega\rho_0\Delta r} [j\{G_{BB}(\omega) - G_{AA}(\omega)\} + 2\mathbf{Im}\{\underline{G}_{AB}(\omega)\}]. \quad (5.18)$$

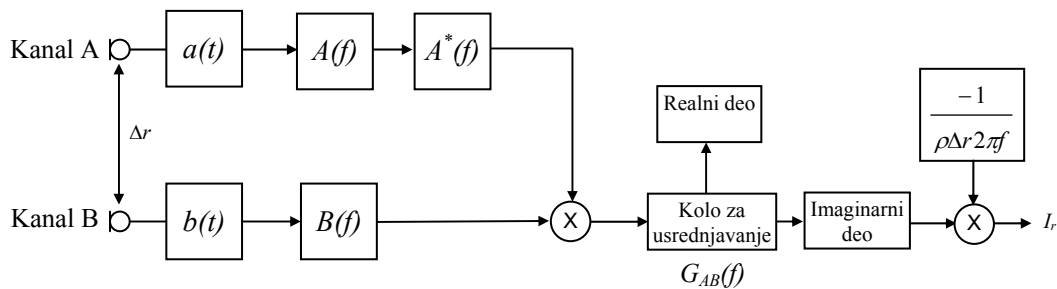
Spektar aktivnog intenziteta zvuka predstavlja realni deo jednačine (5.18):

$$I(\omega) = -\frac{\mathbf{Im}\{\underline{G}_{AB}(\omega)\}}{\omega\rho_0\Delta r}, \quad (5.19)$$

dok se ukupni aktivni intenzitet dobija integracijom gornje jednačine po frekvenciji [26]:

$$I = -\frac{1}{\rho_0\Delta r} \int_0^\infty \frac{\mathbf{Im}\{\underline{G}_{AB}(\omega)\}}{\omega} d\omega. \quad (5.20)$$

Sistemi za indirektno merenje intenziteta zvuka baziraju se na realizaciji jednačine (5.19) i na sl. 5.8 prikazana je blok-šema jednog takvog sistema.



Sl. 5.8 Blok dijagram sistema za indirektno merenje intenziteta zvuka [26]

Kod sistema za indirektno merenje nije neophodno formirati sumu i razliku izlaznih signala mikrofona pre spektralne obrade signala. Sistemi generišu spektralne linije sa uniformnom frekvencijskom rezolucijom koja je jednaka inverznoj dužini segmenta analiziranog signala FFT algoritmom. FFT sistemi obično generišu 400, 500, 800 ili 1600 spektralnih linija. Frekvencijska rezolucija je određena izabranim frekvencijskim opsegom za analizu.

Glavni nedostaci FFT sistema su duže vreme usrednjavanja u cilju dobijanja analize u realnom vremenu i postojanje mnogo spektralnih linija, što predstavlja teškoću u interpretaciji rezultata i brzou proceni prostorne raspodele intenziteta zvuka oko izvora, zbog brzih promena vrednosti komponenti na više spektralnih linija istovremeno.

5.3 OGRANIČENJA FREKVENCIJSKOG OPSEGA POUZDANOG MERENJA

Korišćenje dvomikrofonske procedure merenja intenziteta zvuka ograničava frekvencijski opseg pouzdanog merenja i unosi određene greške pri merenju [20,25,27,43,50,64,87,102]. Frekvencijski opseg pouzdanog merenja definisan je zahtevima da se minimiziraju:

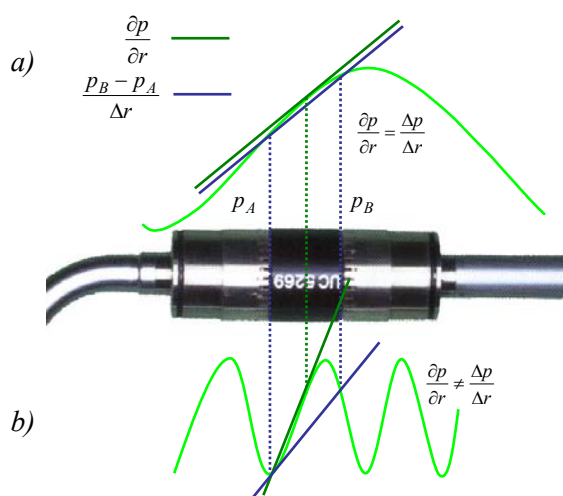
- greška aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom, i
- fazna greška.

Podatak da se metod bazira na aproksimaciji gradijenta pritiska konačnom razlikom pritisaka, nameće ograničenje korisnog frekvencijskog opsega mernog sistema gornjom graničnom frekvencijom, inverzno proporcionalnom međusobnom rastojanju mikrofona. Proširenje frekvencijskog opsega može se postići smanjivanjem rastojanja između mikrofona, ali samo do neke granice s obzirom da je fazna greška koja definiše donju graničnu frekvenciju inverzno proporcionalna međusobnom rastojanju mikrofona, što uslovljava njeno povećanje smanjivanjem rastojanja između mikrofona [42].

5.3.1 Gornja granična frekvencija

Gornja granična frekvencija opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka korišćenjem dvomikrofonske procedure određena je greškom koja nastaje zbog aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom pritisaka na pozicijama mikrofona. Ova vrsta greške prouzrokuje da izmereni intenzitet bude uvek manji od stvarnog.

Dva mikrofona aproksimiraju gradijent krive promene zvučnog pritiska pravom linijom između dve tačke na poziciji centra mikrofona. Ukoliko se zvučni pritisak sporo menja sa rastojanjem, odnosno ako je talasna dužina velika u poređenju sa efektivnim rastojanjem mikrofona, konačna razlika pritisaka na pozicijama mikrofona biće približno jednaka gradijentu pritiska (sl. 5.9a), tako da će merna greška biti mala. U suprotnom, ako su promene zvučnog pritiska brze, odnosno ako je talasna dužina mala u poređenju sa efektivnim rastojanjem mikrofona, konačna razlika pritisaka na pozicijama mikrofona može se znatno razlikovati od gradijenta pritiska (sl. 5.9b) što prouzrokuje veću mernu grešku.



Sl. 5.9 Ilustracija greške zbog aproksimacije gradijenta konačnom razlikom pritiska

Greška aproksimacije konačnom razlikom zavisi od tipa zvučnog polja i ona se može proceniti ukoliko je poznata zavisnost promene zvučnog pritiska i brzine čestica u funkciji vremena i prostora. Praksa je pokazala da se gornja granična frekvencija opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka može proceniti na osnovu poznavanja greške pri merenju intenziteta zvuka, L_ϵ , za slučaj prostiranja ravnih talasa u pravcu ose merne sonde.

Za harmonijsko zvučno polje na pozicijama mikrofona A i B dati su izrazima:

$$\begin{aligned} p_A(r,t) &= A_p e^{-jkr} e^{j\omega t}, \\ p_B(r,t) &= A_p e^{-jk(r+\Delta r)} e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Pritisak u središnjoj tački aproksimira se aritmetičkom sredinom zvučnih pritisaka na pozicijama oba mikrofona:

$$p(r,t) \approx \frac{p_A(r,t) + p_B(r,t)}{2} = \frac{1}{2} A_p e^{-jkr} (e^{-kr\Delta r} + 1) e^{j\omega t}. \quad (5.22)$$

Zamenom razlike zvučnih pritisaka u jednačinu (5.11) dobija se vrednost brzine čestica u središnjoj tački:

$$v(r,t) = -\frac{1}{\rho_0 \Delta r} \frac{A_p}{j\omega} e^{-jkr} A_p (e^{-jk\Delta r} - 1) e^{j\omega t}. \quad (5.23)$$

Procenjena vrednost intenziteta zvuka, \hat{I} , dvomikrofonskom procedurom dobija se kao:

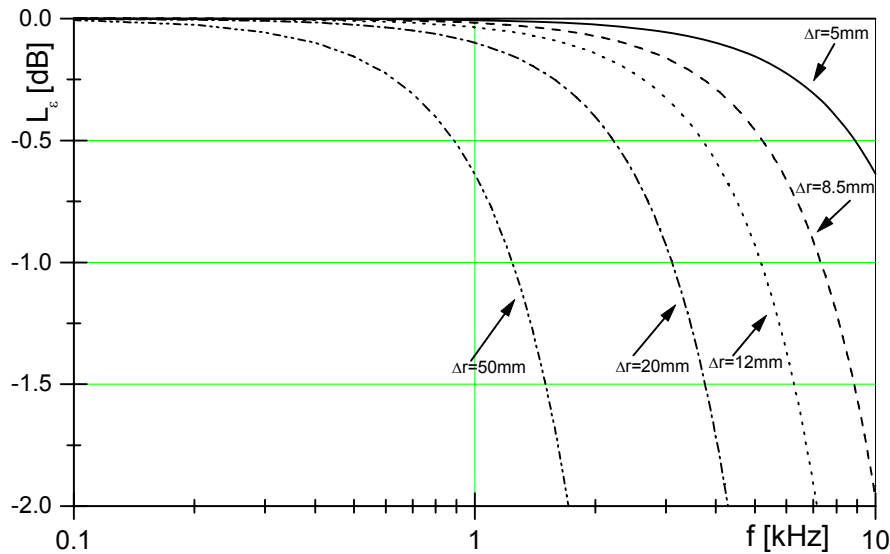
$$\hat{I} = \frac{1}{2} p(r,t) v^*(r,t) = \frac{1}{2\rho_0 \Delta r} \frac{A_p^2}{j\omega} \frac{(e^{-jk\Delta r} + 1)(e^{jk\Delta r} - 1)}{2} = \frac{A_p^2}{2\rho_0 c} \frac{1}{k\Delta r} \frac{(e^{jk\Delta r} - e^{-jk\Delta r})}{2j}, \quad (5.24)$$

$$\hat{I} = I \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r}$$

gde je: I - stvarni intenzitet zvuka u središnjoj tački merne sonde.

Procenjeni intenzitet zvuka uvek je manji od stvarnog. Apsolutna greška aproksimacije konačnom razlikom za različita rastojanja između mikrofona prikazana je na sl. 5.10 i može se izračunati pomoću izraza:

$$L_\varepsilon = 10 \log \frac{\hat{I}}{I} = 10 \log \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r}. \quad (5.25)$$



Sl. 5.10 Greška aproksimacije konačnom razlikom [65]

Relativna normalizovana greška aproksimacije, izražena u procentima data je izrazom:

$$e(I) = \frac{\hat{I} - I}{I} \cdot 100 = \left\{ \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} - 1 \right\} \cdot 100 = \{10^{0.1L_\varepsilon} - 1\}. \quad (5.26)$$

Apsolutna greška ne sme biti veća od -0.2dB da bi relativna normalizovana greška bila manja od 5%. Iz ovog uslova izračunava se gornja granična frekvencija pouzdanog merenja u funkciji međusobnog rastojanja mikrofona:

$$e(I) < 5\% \Rightarrow L_\varepsilon < -0.2\text{dB} \Rightarrow k\Delta r < 0.55 \Rightarrow f_g \Delta r < 30.$$

Za tačnost merenja definisanu većinom standarda, apsolutna greška merenja treba da bude manja od 1dB, tako da je:

$$L_\varepsilon < -0.2\text{dB} \Rightarrow e(I) < 20\% \Rightarrow k\Delta r < 1.15 \Rightarrow f_g \Delta r < 63.$$

Iz prethodno definisanog uslova određuje se gornja granična frekvencija pouzdanog merenja:

$$f_g = \frac{63}{\Delta r}. \quad (5.27)$$

Za uobičajeno korišćena međusobna rastojanja mikrofona merne sonde, gornja granična frekvencija pouzdanog merenja intenziteta zvuka data je u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Gornja granična frekvencija pouzdanog merenja za različita međusobna rastojanja mikrofona merne sonde

Δr [mm]	5	8.5	12	20	50
f_g [Hz]	12600	7412	5250	3150	1260

Kada se pravac prostiranja zvučnih talasa i osa merne sonde ne poklapaju, greška data jednačinom (5.25) postaje:

$$L_\varepsilon = 10 \log \frac{\hat{I}}{I} = 10 \log \frac{\sin(k\Delta r \cos \alpha)}{k\Delta r}, \quad (5.28)$$

gde je: α - ugao između pravca prostiranja zvučnih talasa i pravca orijentacije merne sonde. Za ugao $\alpha = 60^\circ$, gornja granična frekvencija je dva puta veća od gornje granične frekvencije za aksijalnu incidenciju zvučnih talasa.

Kako je u realnom zvučnom polju, pravac prostiranja zvučnih talasa promenljiv zavisno od pozicije merne sonde, ne preporučuje se bilo kakav pokušaj korekcije izmerenog intenziteta zvuka datim jednačinama. Gornje jednačine daju samo informaciju o frekvencijskom opsegu pouzdanog merenja, odnosno mogu se koristiti za određivanje gornje granične frekvencije pouzdanog merenja intenziteta zvuka izabranom konfiguracijom merne sonde.

5.3.2 Donja granična frekvencija

Razlika u faznom odzivu dva paralelna merna kanala u sistemima za merenje intenziteta unosi grešku pri merenju intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom. Fazna razdešenost mernih kanala, iskazana preko faznog kašnjenja signala, utiče da izmerena fazna razlika signala zvučnih pritisaka bude različita od stvarne. Pri tome, nastala fazna greška određena je odnosom faznog kašnjenja mernih kanala, φ , i fazne razlike signala zvučnih pritisaka na pozicijama mernih mikrofona, Φ , koja zavisi od prirode zvučnog polja u kome se nalazi merna sonda. Ograničavanjem vrednosti fazne greške može se odrediti donja granična frekvencija opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka.

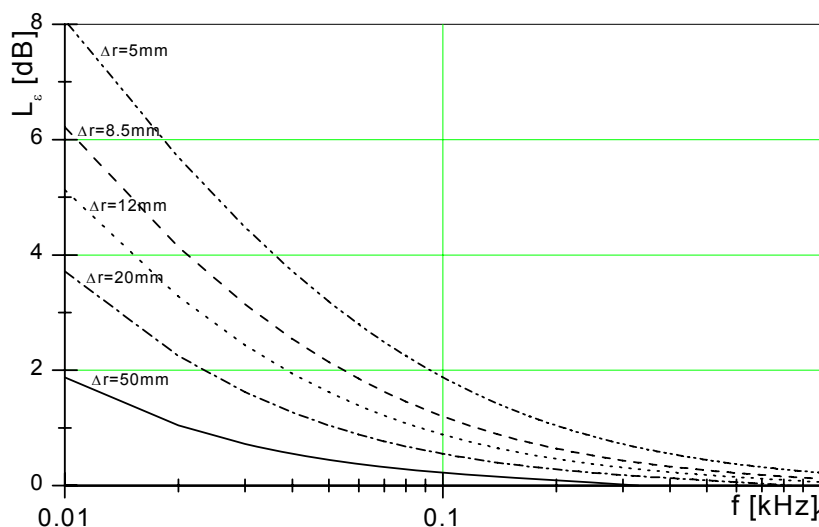
Kada se merna sonda nalazi u ravanskom zvučnom polju, fazna razlika signala pritisaka na pozicijama mernih mikrofona može imati vrednosti od $\Phi = 0$ za normalnu incidenciju ravnih talasa, do vrednosti $\Phi = k\Delta r$ za aksijalnu incidenciju. Ako je φ fazno kašnjenje dva merna kanala, pri aksijalnoj incidenciji ravnih talasa detektovana ukupna fazna razlika biće $k\Delta r + \varphi$, što će modifikovati jednačinu (5.24) za procenjenu vrednost intenziteta zvuka [27,86]:

$$\hat{I} = I \frac{\sin(k\Delta r + \varphi)}{k\Delta r}, \quad (5.29)$$

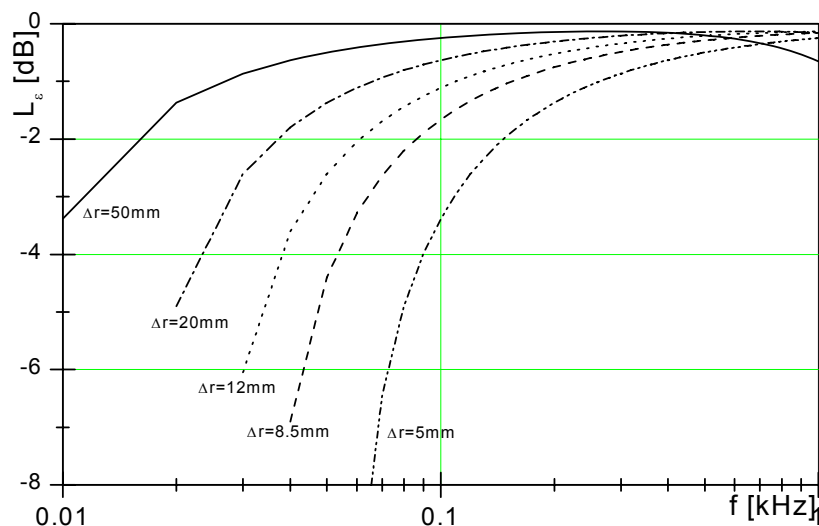
Apsolutna fazna greška za različita međusobna rastojanja mikrofona može se procenti iz jednačine:

$$L_\varepsilon = 10 \log \frac{\hat{I}}{I} = 10 \log \frac{\sin(k\Delta r + \varphi)}{k\Delta r}. \quad (5.30)$$

Veličina procenjenog intenziteta zvuka zavisi od znaka faznog kašnjenja mernih kanala. Ako fazno kašnjenje ima pozitivnu vrednost, izmereni intenzitet zvuka dvomikrofonskom procedurom biće veći od stvarnog intenziteta (sl 5.11), a ako fazno kašnjenje ima negativnu vrednost, izmereni intenzitet zvuka biće veći od stvarnog intenziteta (sl. 5.12).



Sl. 5.11 Fazna greška za fazno kašnjenje mernih kanala 0.3° [65]



Sl. 5.12 Fazna greška za fazno kašnjenje mernih kanala -0.3° [65]

Ukoliko je izmerena faza mala, fazna greška u slobodnom zvučnom polju može se aproksimirati izrazom:

$$L_\varepsilon \approx 10 \log \frac{k\Delta r \pm \varphi}{k\Delta r}. \quad (5.31)$$

Evidentno je da je fazna greška najkritičnija za male vrednosti međusobnog rastojanja mikrofona, kao i na niskim frekvencijama gde je fazna razlika signala pritiska na pozicijama mernih mikrofona mala u odnosu na fazno kašnjenje mernih kanala. Greška se može smanjiti ako se poveća rastojanje između mikrofona, čime se povećava fazna razlika signala pritiska na pozicijama mernih mikrofona.

Fazna greška definiše donju graničnu frekvenciju pouzdanog merenja, i može se izračunati za uslove realnog zvučnog polja ukoliko je poznata vrednost izmerene faze realnog zvučnog polja, Φ , i faznog kašnjenja φ kao:

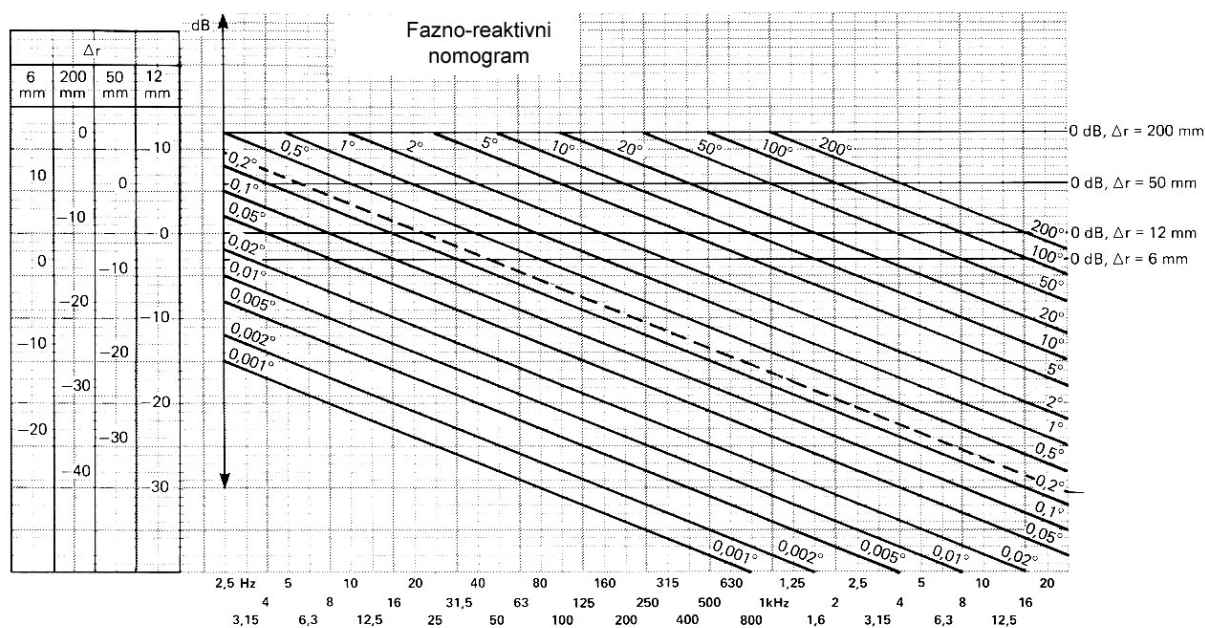
$$L_{\epsilon} \approx 10 \log \frac{\Phi + \varphi}{\Phi} \quad (5.32)$$

Uvođenjem indikatora zvučnog polja - indeksa reaktivnosti δ_{pl} [20]:

$$\delta_{pl} = L_p - L_I, \quad (5.33)$$

definiše se reaktivnost zvučnog polja, odnosno odstupanje realnog zvučnog polja od idealnog, slobodnog zvučnog polja. Na osnovu indeksa reaktivnosti definiše se jednačina fazno-reaktivnog nomograma koja daje vezu između frekvencije, indeksa reaktivnosti i mikrofonskog rastojanja korišćene konfiguracije merne sonde. Jednačina fazno-reaktivnog nomograma definisana je sledećim izrazom [25,87]:

$$\delta_{pl} = 10 \log \frac{k \Delta r}{\Phi} \quad (5.34)$$



Sl. 5.13 Fazno-reaktivni nomogram [25,87]

Korišćenjem nomograma prikazanog na sl. 5.13 može se odrediti, na osnovu izmerenog indeksa reaktivnosti zvučnog polja i karakteristika mernog sistema (fazno kašnjenje i međusobno rastojanje mikrofona), izmerena faza i maksimalna fazna greška, kao i donja granična frekvencija opsega pouzdanog merenja u kome se apsolutna fazna greška nalazi u opsegu ± 1 dB.

Analitički izraz za izračunavanje donje granične frekvencije opsega pouzdanog merenja izvodi se za uslov da apsolutna fazna greška definisana jednačinom (5.32) bude u opsegu ± 1 dB. Definisani uslov određuje maksimalnu dozvoljenu izmerenu fazu realnog zvučnog polja za poznato fazno kašnjenje mernog sistema:

$$\Phi_{\max} = \begin{cases} \frac{\varphi}{10^{0.1} - 1}, & \varphi > 0 \\ \frac{|\varphi|}{1 - 10^{-0.1}}, & \varphi < 0 \end{cases}. \quad (5.35)$$

Zamenom jednačine (5.35) u jednačinu fazno-reaktivnog nomograma (5.34) definiše se izraz za donju graničnu frekvenciju opsega pouzdanog merenja kao:

$$f_d = \begin{cases} \frac{c\varphi 10^{\delta_{pl}/10}}{2\pi\Delta r(10^{0.1} - 1)}, & \varphi > 0 \\ \frac{c|\varphi| 10^{\delta_{pl}/10}}{2\pi\Delta r(1 - 10^{-0.1})}, & \varphi < 0 \end{cases}. \quad (5.36)$$

Donja granična frekvencija je obrnuto proporcionalna međusobnom rastojanju mikrofona, tako da se proširenje frekvencijskog opsega sa donje strane može postići povećanjem rastojanja, ali samo do određene granice jer treba voditi računa i o grešci aproksimacije na višim frekvencijama koja raste sa povećanjem međusobnog rastojanja mikrofona.

Za uobičajena međusobna rastojanja mikrofona merne sonde, donja granična frekvencija pouzdanog merenja intenziteta zvuka data je u tabeli 5.2, za indekse reaktivnosti zvučnog polja od 0, 3 i 10 dB i za fazno kašnjenje mernog sistema 0.1, 0.2 i 0.3°.

Tabela 5.2 Donja granična frekvencija pouzdanog merenja za različita međusobna rastojanja mikrofona merne sonde, reaktivnosti zvučnog polja i faznog kašnjenja

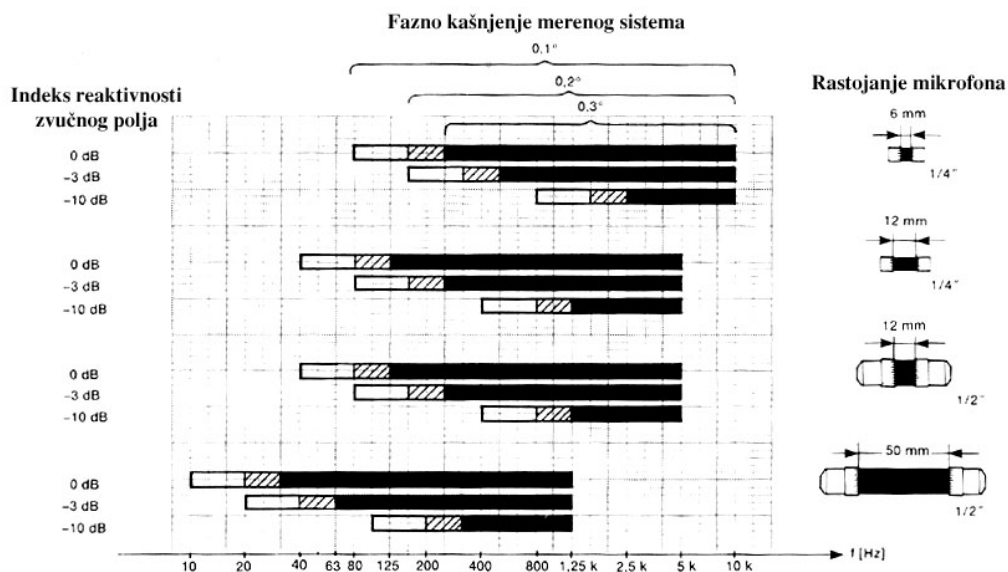
Δr [mm]	5			8.5			12			20			50		
δ_{pl} [dB]	0	3	10	0	3	10	0	3	10	0	3	10	0	3	10
$\varphi = 0.1^\circ$															
f_d [Hz]	92.6	184.9	926.5	54.5	108.7	545.0	38.6	77.0	386.0	23.2	46.2	231.6	9.3	18.5	92.7
$\varphi = 0.2^\circ$															
f_d [Hz]	185.3	369.7	1853	109.0	217.5	1090	77.2	154.1	772.1	46.3	92.4	463.3	18.5	37.0	185.3
$\varphi = 0.3^\circ$															
f_d [Hz]	278.0	554.6	2779	163.5	326.2	1635	115.8	231.1	1158	69.5	138.6	694.9	27.8	55.5	278.0

5.3.3 Dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja intenziteta zvuka

Korišćenje dvomikrofonске procedure merenja intenziteta zvuka ograničava frekvencijski opseg pouzdanog merenja zbog težnje da se pri merenju minimiziraju sistematske greške merenja, pre svega fazna greška na nižim frekvencijama i greška aproksimacije na višim frekvencijama.

Smanjenje sistematskih grešaka koje nastaju pri merenju može se ostvariti optimalnim izborom veličine mernih mikrofona i rastojanja između njih. Pri tome, treba voditi računa da povećanje rastojanja mikrofona smanjuje faznu grešku ali istovremeno povećava grešku aproksimacije, i obrnuto smanjenje rastojanja mikrofona smanjuje grešku aproksimacije ali povećava faznu grešku.

Na osnovu sprovedene analize donje i gornje granične frekvencije pouzdanog merenja intenziteta zvuka i objedinjavanjem dobijenih rezultata, može se definisati dijagram za optimalni izbor konfiguracije merne sonde, za tačnost merenja u opsegu ± 1 dB, u zavisnosti od reaktivnosti zvučnog polja i faznog kašnjenja mernog sistema. Primer dijagrama, za mernu sondu tip 3519, danskog proizvođača *Brüel&Kjær*, prikazan je na sl. 5.14.



Sl. 5.14 Dijagram za izbor optimalne konfiguracije merne sonde [25,87]

Pokrivanje frekventijskog opsega od 50 Hz do 10 kHz, koji se najčešće zahteva standardima, može se postići korišćenjem tri različite konfiguracije merne sonde:

- mikrofoni veličine 1/2" na rastojanju od 50 mm - donji frekventijski opseg -
- mikrofoni veličine 1/2" na rastojanju od 12 mm – srednji frekventijski opseg, i
- mikrofoni veličine 1/4" na rastojanju od 6 mm - pokrivanje gornjeg frekventijskog opsega,

ali se pri tome:

- povećava vreme neophodno za sprovođenje merne procedure, i
- postoji mogućnost unošenja dodatne nesigurnosti u merenju zbog eventualane greške pri pozicioniranju tri različite konfiguracije merne sonde u istu mernu tačku.

Fazna greška određuje i dinamički opseg pouzdanog merenja intenziteta zvuka. Pri tome je potrebno odrediti rezidualni indeks reaktivnosti merne sonde, $\delta_{pl,0}$. Kada se širokopojasni signal dovede na oba merna mikrofona, simulirajući zvučno polje sa faznom razlikom od 0° između dve merne pozicije, razlika izmerenog nivoa zvučnog pritiska, $L_{p,0}$, i nivoa intenziteta zvuka, $L_{I,0}$, predstavlja rezidualni indeks reaktivnosti mernog sistema [20,22]:

$$\delta_{pl,0} = L_{p,0} - L_{I,0} \quad (5.37)$$

Rezidualni indeks reaktivnosti je, takođe, mera faznog kašnjenja mernog sistema:

$$\delta_{pl,0} = 10 \log \frac{k\Delta r}{\varphi}. \quad (5.38)$$

Kada u mernom sistemu postoji fazno kašnjenje, jednačina fazno-reaktivnog nomograma definisana je sledećim izrazom:

$$\delta_{pl} = 10 \log \frac{k\Delta r}{\Phi + \varphi}, \quad (5.39)$$

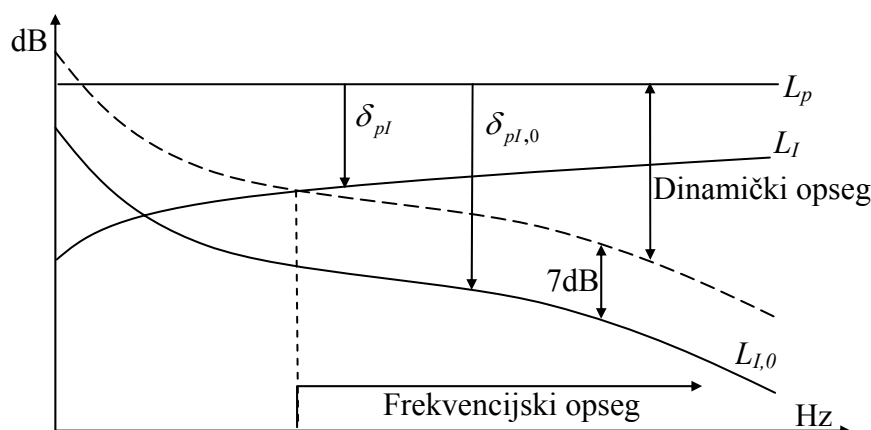
tako da je fazna greška:

$$L_{\varepsilon} = 10 \log \frac{k\Delta r \cdot 10^{-\delta_{pl}}}{k\Delta r(10^{-\delta_{pl}} - 10^{-\delta_{pl,0}})} = 10 \log \frac{1}{1 - 10^{(\delta_{pl} - \delta_{pl,0})/10}}. \quad (5.40)$$

Da bi normalizovana greška u proceni intenziteta zvuka bila manja od ± 0.25 , odnosno apsolutna greška manja od ± 1 dB, potrebno je da bude zadovoljen uslov:

$$\delta_{pl} - \delta_{pl,0} < -7 \text{ dB}. \quad (5.41)$$

Prikazani uslov definiše dinamički opseg pouzdanog merenja intenziteta zvuka, po kome, da bi fazna greška merenja bila manja od ± 1 dB, potrebno je da indeks reaktivnosti zvučnog polja bude manji od rezidualnog indeksa reaktivnosti mernog sistema za više od 7 dB, što je ilustrovano na sl. 5.15.



Sl. 5.15 Dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja

5.4 PROŠIRENJE FREKVENCIJSKOG OPSEGA

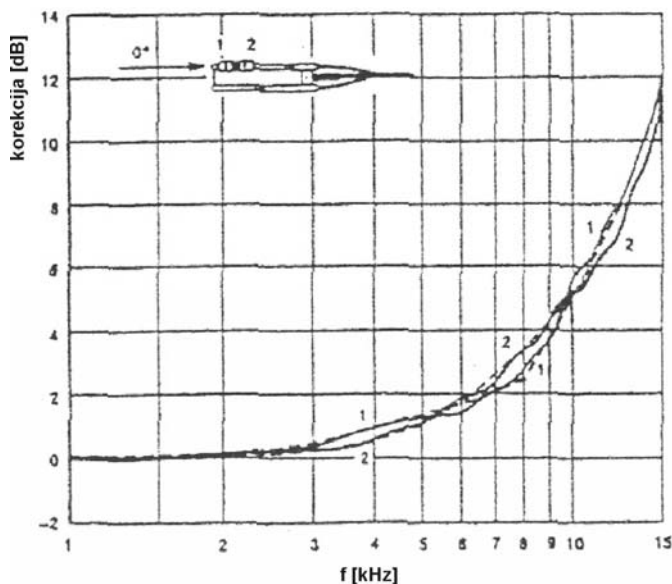
5.4.1 Povećanje gornje granične frekvencije

Merne greške koje nastaju pri merenju intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom analizirane su uz pretpostavku da mikrofoni merne sonde registruju zvučni pritisak koji bi na posmatranoj poziciji postojao bez prisustva merne sonde. Prisustvo merne sonde u realnim situacijama dovodi do pojave difrakcije i rasipanja zvučnih talasa, što utiče na rezultat merenja intenziteta zvuka. Efekat difrakcije i rasipanja zvučnih talasa zavistan je od korišćene konfiguracije merne sonde, pre svega veličine mernih mikrofona, dužine merne sonde i orijentacije mernih mikrofona [1].

Istraživanja performansi različitih konfiguracija mernih sondi pokazuju da najčešće korišćeni raspored mikrofona "face to face" sa kompaktnim umetkom između mikrofona i sa dužim predpojačavačima, daje najbolje performanse [23]. Jedna od karakteristika ove konfiguracije je postojanje male šupljine ispred membrane svakog mikrofona, koja je sa okolinom povezana preko proreza u zaštitnoj rešetki mikrofona. Eksperimentalni rezultati [8,45,46] pokazuju da efekat difrakcije zvučnih talasa zbog cilindričnog oblika merne sonde, u kombinaciji sa rezonansom koja nastaje u šupljinama, dovodi do povećanja nivoa zvučnog pritiska. Ovo povećanje zvučnog pritiska može se iskoristiti za kompezaciju greške koja nastaje usled aproksimacije konačnom razlikom i koja rezultira manjim izmerenim intenzitetom zvuka od stvarnog.

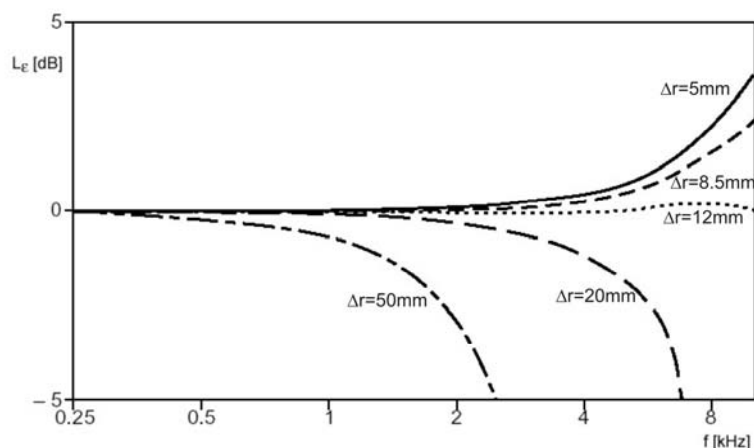
Numerička simulacija, zasnovana na metodi konačnih elemenata i primeni *Hemholtz*-ove jednačine, pogodnija je za analizu efekta difrakcije i ima značajne prednosti u odnosu na eksperimentalno određivanje, jer na eksperimentalne rezultate pre svega mogu da utiči performanse i određeni nedostaci anehoične prostorije, kao i poremećaj zvučnog polja izazvan primenjenim konstrukcijama za oslanjanje sonde [46].

Numeričkom simulacijom analiziran je efekat difrakcije za mernu sondu cilindričnog oblika, dužine cilindra 63.5mm i cilindra 12.7mm, sa zazorom od 1.1mm između membrane i kompaktnog umetka. Korišćena konfiguracija odgovara karakteristikama merne sonde model B&K 3519 sa $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima i kompaktnim umetkom od 12mm. Dobijeni rezultati, prikazani na sl. 5.16, ukazuju na porast nivoa zvučnog pritiska zbog difrakcije i rezonanse u šupljinama ispred membrane mikrofona, na pozicijama oba mikrofona, na frekvencijama iznad 2kHz. Povećanje zvučnog pritiska, dobijeno za uslov slobodnog zvučnog polja, ravnih talasa i aksijalnu incidenciju u odnosu na osu merne sonde kreće se u opsegu do 5dB na 10kHz.



Sl. 5.16 Povećanje zvučnih pritisaka na poziciji $\frac{1}{2}$ "-mikrofona merne sonde zbog difrakcije i rezonanse u šupljinama [8,46]

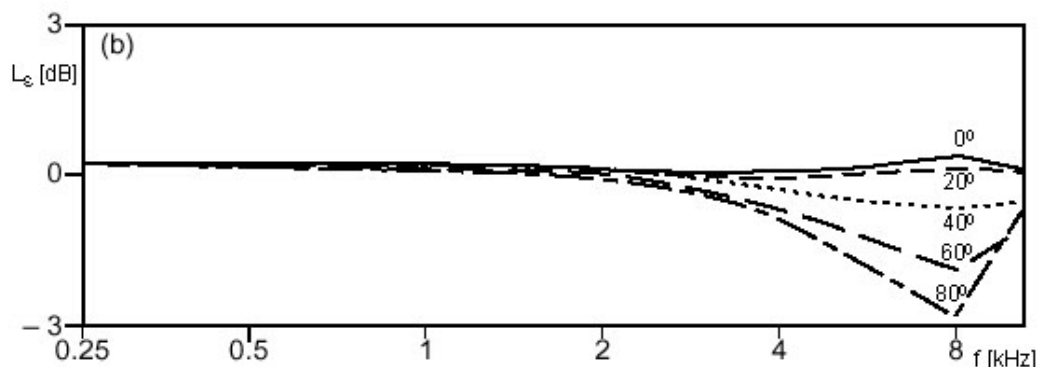
Kombinujući efekat povećanja zvučnog pritiska zbog difrakcije zvučnih talasa i rezonanse u šupljinama ispred membrane mikrofona (sl. 5.16), sa mernom greškom koja nastaje zbog aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom pritisaka (sl. 5.10), pri korišćenju $\frac{1}{2}$ "-mikrofona sa kompaktnim umetkom od 12mm, dobija se rezultujuća merna greška prikazana na sl. 5.17, za uslov slobodnog zvučnog polja, ravnih talasa i aksijalnu incidenciju u odnosu na osu merne sonde.



Sl. 5.17 Rezultujuća greška merne sonde sa $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima za aksijalnu incidenciju ravnih talasa i različita rastojanja mikrofona [45]

Numerički rezultati pokazuju da se najpravnija frekvencijska karakteristika, sa minimiziranom mernom greškom, dobija za međusobno rastojanje mikrofona od 12mm. Manja rastojanja prouzrokuju da izmereni intenzitet bude veći od stvarnog, dok veća rastojanja daju intenzitet koji je manji od stvarnog. Na ovaj način se pokazuje da se za konfiguraciju merne sonde sa $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima i sa međusobnim rastojanjem mikrofona od 12mm, gornja granična frekvencija pouzdanog merenja povećava sa 5kHz na 10kHz.

Na sl. 5.18 prikazana je rezultujuća greška merne sonde za neaksijalnu incidenciju, za različite uglove incidencije i za dužinu kompaktnog umetka između mikrofona od 12mm. Dobijeni rezultati pokazuju da se rezultujuća greška povećava sa povećanjem ugla incidencije i da je najveća za uglove incidencije zvučnih talasa koji se približavaju normalnoj incidenciji u odnosu na osu merne sonde.



Sl. 5.18 Rezultujuća greška merne sonde sa $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima i kompaktnim umetkom od 12mm za različite uglove incidencije zvučnih talasa [45]

5.4.2 Smanjenje donje granične frekvencije

Smanjenje donje granične frekvencije postiže se eliminisanjem uticaja fazne greške na izmereni nivo intenziteta zvuka. U tu svrhu koriste se više metoda a najbolje rezultate daje sledeći:

- promena mesta mikrofona i ponavljanje merenja [25,27], i
- fazna kompenzacija, korekcijom izmerenih rezultata na osnovu prethodno određenog rezidualnog indeksa reaktivnosti merne sonde i mernog instrumenta [22].

Primenom jednog od dva pomenuta metoda, za konfiguraciju merne sonde sa $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima i sa međusobnim rastojanjem mikrofona od 12mm, donja granična frekvencija pouzdanog merenja može se smanjiti sa 125Hz na 50Hz.

5.4.2.1 Promena mesta mikrofona

Promena mesta mikrofona predstavlja veoma jednostavan i efikasan način za eliminisanje fazne greške pri merenju intenziteta zvuka zasnovan na ideji međusobne zamene mesta onih delova mernog lanca kod kojih postoji fazna neuparenost [25,27]. Metod se zasniva na jednostavnom izračunavanju aritmetičke sredine dva merenja intenziteta zvuka, sa mernom sondom koja se kod drugog merenja okreće za 180° oko efektivne merne tačke, čime se menja znak faznog kašnjenja između mernih kanala.

Procenjena vrednost intenziteta zvuka pri prvom merenju, na osnovu jednačine (5.29), imaće vrednost:

$$\hat{I}_1 = I \frac{\sin(k\Delta r + \varphi)}{k\Delta r},$$

a kod drugog:

$$\hat{I}_2 = I \frac{\sin(k\Delta r - \varphi)}{k\Delta r}.$$

Aritmetička sredina daje korigovanu procenjenu vrednost intenziteta zvuka:

$$\hat{I} = \frac{\hat{I}_1 + \hat{I}_2}{2} = I \frac{\sin(k\Delta r + \varphi) + \sin(k\Delta r - \varphi)}{2k\Delta r} = I \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \cos \varphi. \quad (5.42)$$

Primenom metode zamene mesta dobijena greška zbog fazne neuparenosti mernih kanala je nezavisna od frekvencije i rastojanja između mikrofona:

$$L_\varepsilon = 10 \log \frac{\hat{I}}{I} = 10 \log [\cos(\varphi)], \quad (5.43)$$

i praktično je zanemarljiva, jer za fazno kašnjenje od 12° greška manja od 0.1dB.

Praktični problemi, koji nastaju pri primeni ovog metoda posledica su geometrijske nesimetričnosti merne sonde koja u nekim slučajevima, zbog blizine posmatranog izvora, ne može biti zaokrenuta. Takođe, okretanje merne sonde zajedno sa konstrukcijom za oslanjanje može izazvati promene u posmatranom zvučnom polju, usled različitog efekta rasipanja i difrakcije zvučnih talasa.

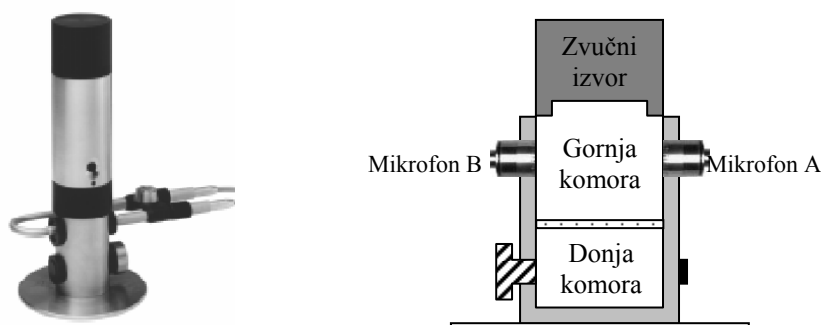
5.4.2.2 Fazna kompenzacija

Fazna greška pri merenju intenziteta zvuka može se odrediti primenom jednačine (5.40), ukoliko je poznat indeks reaktivnosti zvučnog polja δ_{pl} i rezidualni indeks reaktivnosti merne sonde $\delta_{pl,0}$, koji određuje fazno kašnjenje između mernih kanala mernog lanca. Procenjena fazna greška može se iskoristiti za faznu kompenzaciju izmerenog intenziteta zvuka u cilju dobijanja stvarnog intenziteta zvuka, primenom sledeće jednačine [20,22,102]:

$$I = \frac{\hat{I}}{1 - 10^{(\delta_{pl} - \delta_{pl,0})/10}}. \quad (5.44)$$

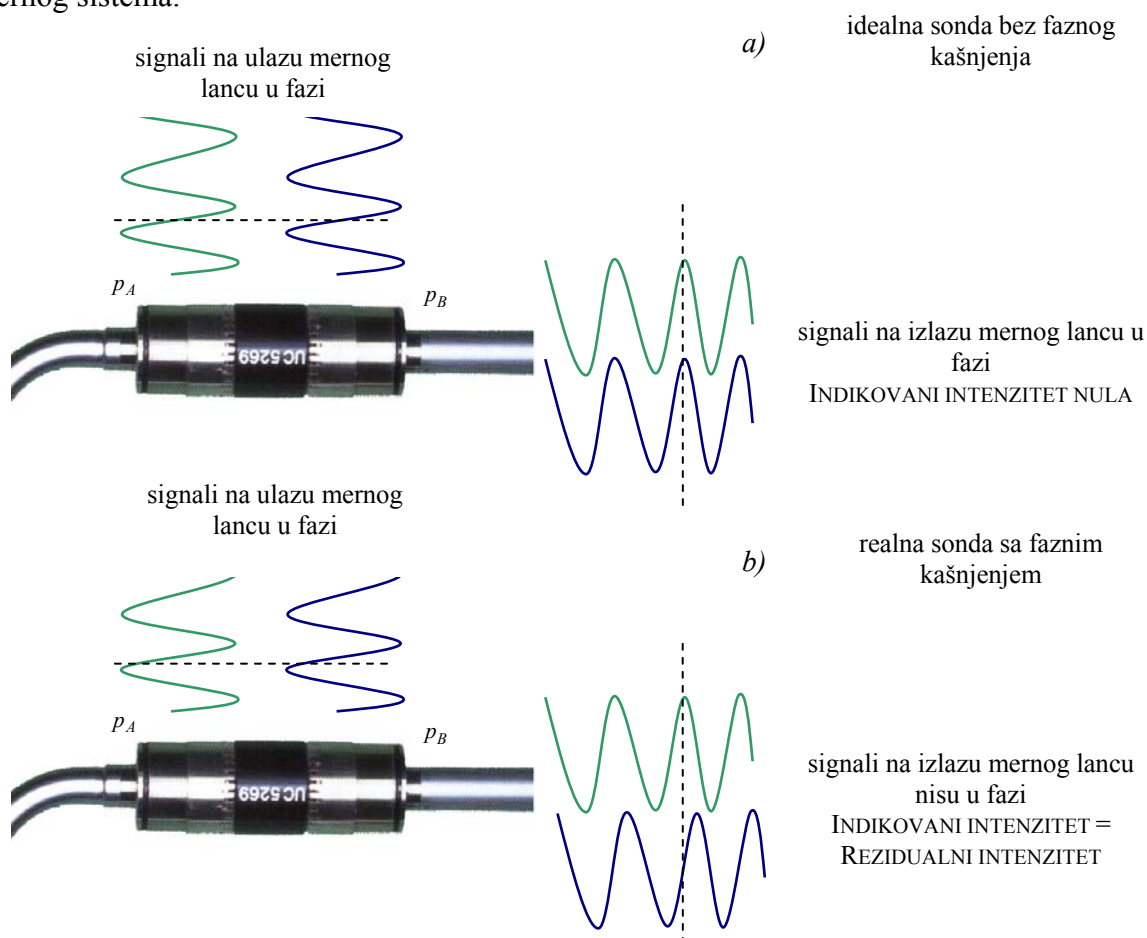
Za sprovođenje procedure fazne kompenzacije neophodno je raspolagati podatkom o rezidualnom indeksu reaktivnosti mernog lanca dobijenim u proceduri kalibracije, koja

podrazumeva dovođenje signala koji su u fazi na pozicije oba merna mikroфона. Merni mikrofony se smeštaju u bočne otvore gornje komore kalibratora za intenzitet zvuka (sl. 5.19), koja je konstruisana tako da ne unosi dodatno fazno kašnjenje signala. Zvučni izvor se smešta u gornji otvor komore, tako da na pozicijama oba mikroфона postoji isti zvučni pritisak.



Sl. 5.19 Raspored mikroфона pri određivanju rezidualnog intenziteta i indeksa reaktivnosti mernog sistema

Ako su merni mikrofony fazno upareni i nema faznog kašnjenja u ostalom delu mernog lanca (sl. 5.20a), tada će i signali na izlazu mernog lanca takođe biti u fazi, tako da je indikovani intenzitet zvuka jednak nuli. Kako u realnom slučaju postoji fazno kašnjenje između dva kanala mernog lanca, na izlazu mernog lanca signali neće biti u fazi (sl. 5.20b), tako da će merna sonda registrovati intenzitet zvuka koji odgovara nivou rezidualnog intenziteta, $L_{I,0}$, mernog sistema.



Sl. 5.20 Ilustracija rezidualnog intenziteta mernog sistema

Pri određivanju indeksa reaktivnosti i rezidualnog intenziteta zvuka, zvučni izvor emituje širokopajasni ružičasti šum konstatnog nivoa zvučnog pritiska u širem frekvencijskom opsegu, $L_{p,0}$. Detektovani intenzitet zvuka mernom sondom predstavlja spektar rezidualnog intenziteta mernog sistema, $L_{I,0}$. Indeks reaktivnosti mernog sistema dobija se oduzimanjem ova dva spektra, primenom jednačine (5.37).

Nakon određivanja indeksa reaktivnosti moguće je izvršiti faznu kompenzaciju izmerenog intenziteta zvuka u realnom zvučnom polju. Oduzimanjem indeksa reaktivnosti merne sonde od izmerenog nivoa zvučnog pritiska, L_p , dobija se nivo rezidualnog intenziteta zvuka u realnom zvučnom polju:

$$L_{I,0,R} = L_p - \delta_{pl,0} \quad (5.45)$$

Nivo rezidualnog intenziteta se upoređuje sa izmerenim nivoom intenzitetom zvuka i ako je manji za barem 7dB tada se sa greškom manjom od 1dB stvarni nivo intenziteta zvuka u realnom zvučnom polju, L_I , dobija oduzimanjem nivoa rezidualnog intenziteta od izmerenog \hat{L}_I :

$$L_I = \hat{L}_I - L_{I,0,R} \quad (5.46)$$

Ukoliko se zanemari greška aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom koja je dominantna na višim frekvencijama na ovaj način moguće je izvršiti kompenzaciju fazne greške pri merenju intenziteta zvuka a dobijeni rezultati odgovaraju stvarnom.

6

DIJAGNOSTIKA AKUSTIČKIH PROCESA - METOD INTENZITETA ZVUKA

VALORIZACIJA AKUSTIČKE AKTIVNOSTI IZVORA
IDENTIFIKACIJA DOMINANTNIH IZVORA
IZOLACIONA MOĆ PREGRADNIH KONSTRUKCIJA
KOEFIČIJENT APSORPCIJE – FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA
KOEFIČIJENT APSORPCIJE – JEDNOBROJNO IZRAŽAVANJE
SPECIFIČNA AKUSTIČKA IMPEDANCA

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

Definisani metodski postupak merenja intenziteta zvuka aproksimacijom gradijenta pritiska konačnom razlikom zvučnih pritisaka na nivou objektivnog i realnog rešenja, koje uključuje korišćenje dva bliska, fazno uparena kondenzatorska mikrofona, stvara uslove da se akustički procesi posmatraju na način koji bliže definiše strukturu procesa nastajanja, prostiranja i prijema zvučnih talasa. Intenzitet zvuka nalazi primenu u oblasti valorizacije:

- akustičke aktivnosti izvora zvuka (buke) [6,7,14,20,54,67,70,80,94,95,104,105];
- zvučne izolacije pregradnih konstrukcija [11-13,20];
- zvučne apsorpcije apsorpcionih materijala [20,72-76,79];
- specifične akustičke impedance apsorpcionih materijala [20,59];
- strukturalnog intenziteta [20,24,30];
- prostorne transformacije zvučnog polja[20].

Intenzitet zvuka, osim primene u oblasti valorizacije akustičkih procesa, nudi i nekoliko načina lokacije i identifikacije delova, uređaja i mašina koji zrače najveću zvučnu energiju [7,20,70,80].

6.1 VALORIZACIJA AKUSTIČKE AKTIVNOSTI IZVORA

Činjenica da nivo zvučnog pritiska na proizvoljnoj lokaciji, u okviru radnog mesta, industrijskog ambijenta ili u životnom okruženju prekoračuje dozvoljenu vrednost, samo je identifikacija sa posledicom čiji uzroci time nisu definisani. U principu, složene strukture, kao generatori akustičkih procesa emituju energiju koja oslobođena u jedinici vremena definiše zvučnu snagu izvora.

Tradicionalni metod određivanja zvučne snage podrazumeva lociranje izvora u poznatoj akustičkoj okolini i merenje zvučnog pritiska. Na osnovu relacija koje povezuju zvučnu snagu sa zvučnim pritiskom i odgovarajućim akustičkim karakteristikama okoline, može se proračunati zvučna snaga.

6.1.1 Metodska osnova

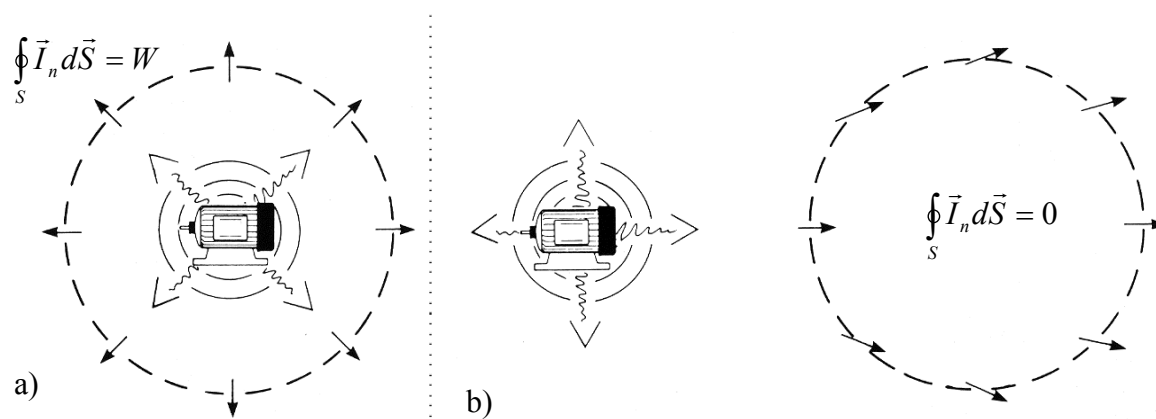
Polazeći od osnovne definicije akustičke snage kao energije koja u jedinici vremena prolazi kroz određenu površinu normalnu na pravac prostiranja zvučnih talasa, zvučna snaga izvora buke može se definisati kao energija koja u jedinici vremena prolazi kroz bilo koju površinu koja obuhvata posmatrani izvor buke [2,3].

Za sistem izvora buke, integracijom jednačine (2.43) po zapremini V , koja potpuno obuhvata izvor buke, i primenom teoreme Gaus-Ostrogradskog, može se uspostaviti relacija između zvučne snage i intenziteta zvuka:

$$W = \oint_S \vec{I}_n \cdot d\vec{S}, \quad (6.1)$$

gde je: W – zvučna snaga koju generišu izvori buke obuhvaćeni zatvorenom površinom S , I_n – komponenta intenziteta zvuka normalna na zatvorenu površinu S koja daje doprinos veličini zvučne snage izvora buke.

Primenom jednačine (6.1) intenzitet zvuka kao vektorska veličina koja opisuje količinu i pravac protoka zvučne energije, može se direktno povezati sa zvučnom snagom. Kako intenzitet zvuka predstavlja energetski fluks ili fluks zvučne snage kroz jediničnu površinu, za određivanje zvučne snage dovoljno je odrediti sumu intenziteta po površini koja ograničava zapreminu u kojoj je smešten izvor (sl. 6.1a).



Sl. 6.1 Princip merjenja zvučne snage [27]

Za izvore buke koje se nalaze van merne površine merna sonda može razlikovati pravac prostiranja zvučne energije na mernoj površini. Ukoliko unutar merne površine nema materijala sa značajnijim koeficijentom apsorpcije detektovani intenzitet razlikovaće se po znaku ali ne i po amplitudi u zavisnosti od pozicije sonde. Na taj način detektovani pozitivan intenzitet na jednoj strani merne površine biće poništen detektovanim negativnim intenzitetom s druge strane. Kada se izvrši sumiranje intenziteta zvuka po celoj mernoj površini, ukupan energetski fluks koji potiče od spoljnih izvora buke biće jednak nuli (sl. 6.1b).

Prikazani princip merjenja omogućava da se zvučna snaga može meriti i u oblastima sa velikom pozadinskom bukom, kao što je recimo proizvodna linija. Pozadinska buka može biti i veća od buke koju stvara ispitivani izvor buke, a da ne utiče na tačnost merjenja.

Za određivanje zvučne snage izvora potrebno je odrediti samo korekciju površine, a ne i definisati akustičke osobine mernih površina. Intenzitet zvuka nudi mnogo veću fleksibilnost kako u izboru merne površine, tako i u izboru mernih prostorija i veličine ispitivanih izvora buke.

Pri praktičnim merenjima, merna površina se deli na n elementarnih segmenata u čijim centrima se meri normalna komponenta intenziteta zvuka (ili se vrši "skeniranje" segmenata), tako da se zvučna snaga može odrediti primenom jednačine:

$$W = \sum_{i=1}^n I_{n,i} \Delta S_i, \quad (6.2)$$

gde je: $I_{n,i}$ – normalna komponenta intenziteta zvuka izmerena na segmentu površine.

Ukoliko se merna površina podeli na n jednakih segmenata nivo zvučne snage ispitivanog izvora buke biće jednak:

$$L_W = L_I + 10 \log S, \quad (6.3)$$

gde je: L_I – normalna komponenta nivoa intenziteta zvuka usrednjena na izabranoj mernoj površini.

6.1.2 Merna procedura

Na osnovu definisane methodske osnove razvijene su merne procedure određivanja zvučne snage izvora buke i standardizovane u obliku ISO 9614-1 [34], za određivanje zvučne snage merenjem intenziteta zvuka u diskretnim mernim tačkama, i ISO 9614-2 [35], za određivanje zvučne snage merenjem intenziteta zvuka skeniranjem.

6.1.2.1 Merenje intenziteta zvuka u diskretnim tačkama

Standard ISO 9614-1 propisuje proceduru za određivanje nivoa zvučne snage izvora stacionarne buke na osnovu merenja intenziteta zvuka u diskretnim tačkama. Na osnovu izmernih vrednosti određuju se oktavne i tercne vrednosti, kao i ponderisane vrednosti ukupnog nivoa. Metod je primenljiv u realnom ambijentu ili u test-okruženjima specijalne namene.

Rezultujuća greška uzorkovanja zvučnog polja u diskretnim tačkama je funkcija prostorne promene komponente intenziteta zvuka na mernoj površini, koja zavisi od direktivnosti izvora, izabrane površine uzorkovanja, raspodele pozicija za uzorkovanje i blizine spoljnih izvora van merne površine. Procedura merenja je data u prilogu A, algoritmom na sl. A.1.

Kao početni korak, određuje se indikator F_1 koji definiše vremensku promenljivost zvučnog polja, merenjem intenziteta zvuka u kratkim vremenskim intervalima, na izabranoj poziciji na mernoj površini, i korišćenjem jednačine:

$$F_1 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M [I_{nk} - \bar{I}_n]^2}, \quad (6.4)$$

gde je: \bar{I}_n - srednja vrednost M merenja intenziteta zvuka I_{nk} , $k = 1, \dots, M$.

Indikator F_1 treba da zadovolji kriterijum [34]:

$$F_1 \leq 0.6. \quad (6.5)$$

Ukoliko gornji kriterijum nije zadovoljen, potrebno je povećati vreme merenja ili meriti intenzitet zvuka u periodu manje promenljivosti zvučnog polja.

Nakon završenog početnog mernog testa na mernoj površini, koja može imati oblik paralelopipeda, cilindra, polusfere ili polucilindra vrši se merenje normalne komponente nivoa intenziteta zvuka i zvučnog pritiska u cilju određivanja indeksa reaktivnosti zvučnog polja i provere adekvatnosti izabrane merne opreme. Na osnovu izmerenih veličina određuje se indikator F_2 :

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|}, \quad (6.6)$$

gde je: \bar{L}_p - nivo zvučnog pritiska usrednjen na mernoj površini, a $\bar{L}_{|I_n|}$ - nivo intenziteta zvuka usrednjen na mernoj površini, zanemarujući znak izmerenog intenziteta.

Merna oprema čiji je dinamički opseg L_d određen u proceduri kalibracije opreme, zadovoljava potrebe standarda ako je ispunjen kriterijum [34]:

$$L_d > F_2. \quad (6.7)$$

Ukoliko navedeni kriterijum nije zadovoljen, potrebno je smanjiti rastojanje mernih tačaka do izvora buke čime se postiže smanjenje indeksa reaktivnosti zvučnog polja i uticaja pozadinske buke.

Procena uticaja spoljnih izvora buke, odnosno prisustva negativne parcijalne snage, vrši se izračunavanjem indikatora F_3 na osnovu jednačine:

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n}. \quad (6.8)$$

Jednačina je slična jednačini (6.6) a razlikuje se u izračunavanju nivoa intenziteta zvuka usrednjenog na mernoj površini pri čemu se ne zanemaruje znak izmerenog intenziteta.

Ukoliko je razlika indikatora F_2 i F_3 značajna [34]:

$$F_3 - F_2 \geq 3dB, \quad (6.9)$$

postoji jako usmereni izvor buke u blizini ispitivanog izvora, pa je potrebno preduzeti odgovarajuće mere za eliminisanje uticaja pozadinske buke.

Na kraju se za izabranu mernu površinu i izabrani broj mernih pozicija N određuje ununiformnost zvučnog polja preko indikatora F_4 :

$$F_4 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [I_{ni} - \bar{I}_n]^2}, \quad (6.10)$$

gde je: I_{ni} - intenzitet zvuka izmeren u i -toj mernoj tački, \bar{I}_n - intenzitet zvuka usrednjen na mernoj površini.

Broj izabranih mernih tačaka treba da zadovolji kriterijum [34]:

$$N > CF_4^2, \quad (6.11)$$

gde je: C - faktor koji se bira u zavisnosti od zahtevane preciznosti merenja [34].

Ukoliko nije zadovoljen kriterijum broj mernih tačaka treba korigovati i za tako određeni broj mernih tačaka N , merna površina se deli na N segmenata u čijim se centrima vrši merenje normalne komponente intenziteta zvuka u frekvencijskim opsezima od interesa za ispitivani izvor.

Zvučna snaga izračunava se u svakom frekvencijskom opsegu na osnovu jednačine:

$$L_w = 10 \log \sum_{i=1}^N P_i / P_0, \text{ dB}, \quad (6.12)$$

gde je: P_i - parcijalna zvučna snaga segmenta i , izračunata na osnovu jednačine:

$$P_i = I_{ni} S_i, \quad (6.13)$$

gde je: I_{ni} - je komponenta normalnog intenziteta zvuka (uzimajući u obzir znak) izmerena na i -toj poziciji merne površine; S_i - je površina i -tog segmenta.

6.1.2.2 Merenje intenziteta zvuka skeniranjem

Standard ISO 9614-2 propisuje proceduru za merenje komponente intenziteta zvuka normalne na mernu površinu skeniranjem površine. Površinska integracija normalne komponente intenziteta aproksimirana je skeniranjem merne sonde na svakom izabranom segmenatu, duž kontinualnih putanja koji pokrivaju opseg segmenta. Merni instrument određuje usrednjenu vrednost komponente normalnog intenziteta i kvadrata zvučnog pritiska u toku trajanja svakog skeniranja.

Pri skeniranju su poželjni prosti, pravilni oblici površina, kod kojih je osnovni element skeniranja prava linija. Putanja skeniranja treba da bude takva da omogući pokrivanje svakog segmenta uniformnom brzinom. Srednje rastojanje susednih linija treba da bude jednako i ne treba da premaši srednje rastojanje segmenta od površine izvora.

Procedura merenja je data u prilogu A, algoritmom na sl. A.2. Početna merna površina se definiše oko ispitivanog izvora i deli se na najmanje 4 segmenta [35]. Geometrijski oblik svakog segmenta treba da bude takav da je moguće skeniranje sonde duž unapred određenih

putanja, zadržavajući osu sonde normalno na izabranu površinu i da je moguće tačno određivanje površine segmenta.

Kao početni test određuju se segmentno usrednjeni nivoi zvučnog intenziteta i nivoa zvučnog pritiska na svakom segmentu u onim frekvencijskim opsezima u kojima se određuje zvučna snaga.

Na osnovu tako određenih vrednosti određuju se indikatori F_{pl} (ekvivalent indikatoru F_3 u standardu ISO 9614-1) i indikator $F_{+/-}$ (ekvivalent indikatoru $F_3 - F_2$). Indikator F_{pl} se koristi za određivanje adekvatnosti merne opreme, a indikator $F_{+/-}$ za definisanje uticaja spoljnjih izvora buke, odnosno prisustva negativne parcijalne snage.

Za pregledni stepen preciznosti dobijenih rezultata, merna procedura se završava određivanjem parcijalnih nivoa zvučne snage na osnovu izmerenih komponenti intenziteta zvuka na segmentima merne površine, dok se za inženjerski stepen vrši dodatno skeniranje na svakom segmentu merne površine na ortogonalnim putanjama skeniranja. Odvojeno se određuju nivoi parcijalne zvučne snage $L_{wi}(1)$ i $L_{wi}(2)$ za sve frekvencijske opsege merenja. Razlika određenih vrednosti treba da zadovoljili kriterijum [35]:

$$|L_{wi}(1) - L_{wi}(2)| \leq s, \quad (6.14)$$

gde je: s - tražena standardna devijacija izmerenih rezultata,

U slučajevima gde dati kriterijum nije zadovoljen, treba identifikovati uzrok razlike i ukoliko je moguće eliminisati ga preduzimanjem mera definisanim u tabeli A.3 (prilog A).

6.1.3 Eksperimentalni rezultati

U cilju komparativne analize metode određivanja zvučne snage merenjem intenziteta zvuka u diskretnim tačkama i metoda koje se baziraju na zvučnom pritisku, sprovedene su analize sledećih metoda [14,71,77]:

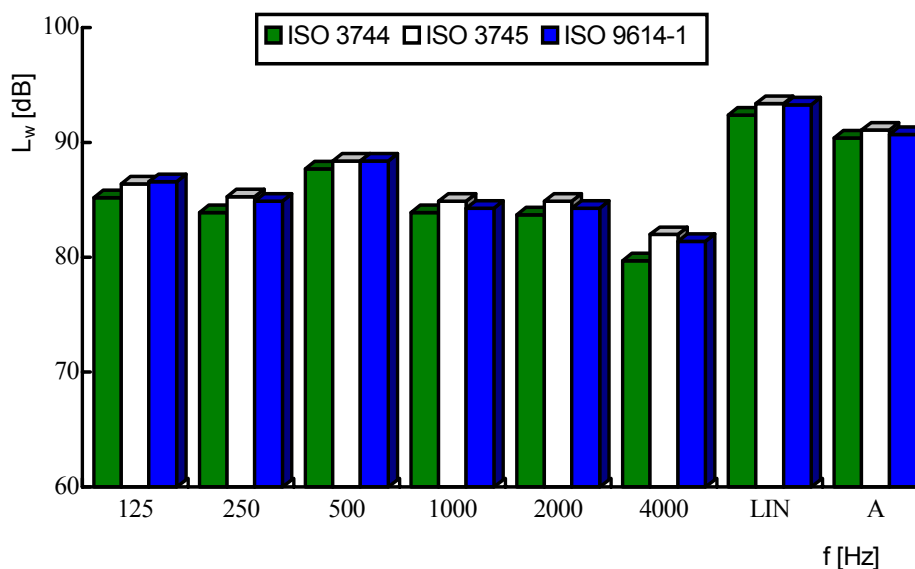
1. Metod određivanja zvučne snage prema ISO 3745, u anehoičnoj prostoriji, granične frekvencije 50Hz, zapremine 306m³, korišćenjem realno-vremenskog analizatora model, B&K 2144.
2. Metod određivanja zvučne snage u realnom ambijentu približno difuznog polja u prostoriji paralelopipednog oblika, zapremine 157m³, sa neznatnim nivoom pozadinske buke, a u skladu sa ISO 3744, uz korišćenje realno-vremenskog analizatora model B&K 2144 i analizatora za građevinsku akustiku model B&K 4418.
3. Metod određivanja zvučne snage merenjem intenziteta u diskretnim mernim tačkama, pri istim uslovima iz tačke 2, prema ISO 9614-1, korišćenjem dvokanalnog analizatora model B&K 2032 i sonde zvučnog intenziteta, model B&K 3519, sa graničnikom rastojanja od 12mm.

U cilju stvaranja uslova za objektivno upoređivanje dobijenih rezultata, kao zvučni izvor korišćen je referentni zvučni izvor, model B&K 4224, sa unapred definisanim konstantnim opterećenjem. Merenje je izvršeno u 10 mernih tačaka, raspoređenih po polusferi poluprečnika 1m, kao što je definisano standardom 3745 [31].

Dobijeni rezultati ukupnog nivoa zvučne snage, primenom različitih standarda prikazani su u tabeli 6.1, a oktavni frekvencijski spektri za uslov optimalnog opterećenja referentnog izvora buke dati su na sl. 6.2.

Tabela 6.1 Nivo zvučne snage referentnog zvučnog izvora B&K 4224 u dB(A) [14,77]

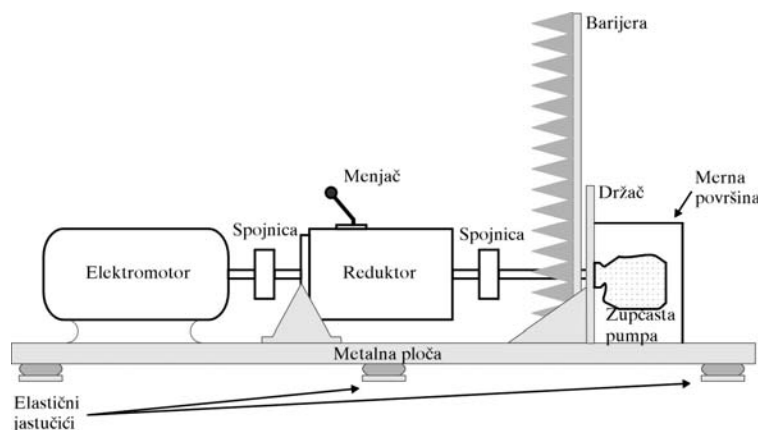
radni režim	ISO 3744	ISO 3745	ISO 9614-1	dokumentacija
max. opterećenje	-	116.6	116.5	116.7
opt. opterećenje	92.4	93.4	93.3	-

**Sl. 6.2** Zvučna snaga referentnog zvučnog izvora model, B&K 4224, pri optimalnim uslovima eksploatacije [14,77]

Hipoteza da je metod određivanja zvučne snage, primenom ISO 3745 najpouzdaniji, potvrđena je visokim stepenom saglasnosti dobijenih rezultata i podataka datih u tehničkoj dokumentaciji zvučnog izvora. Takođe, visoka saglasnost dobijenih rezultata metodom intenziteta sa rezultatima koji su dobijeni u skladu sa ISO 3745, potvrđuju tačnost ove metode, kao i opravdanost opredeljenja za metodu intenziteta zvuka.

Primer određivanja zvučne snage zupčaste pumpe 3155.503.95Č, proizvođača "Prva petoletka" - Trstenik, primenom metode uzorkovanja normalne komponente intenziteta zvuka u skladu sa standardom ISO 9614-1, sa kompletnim rezultatima dat je u prilogu B.

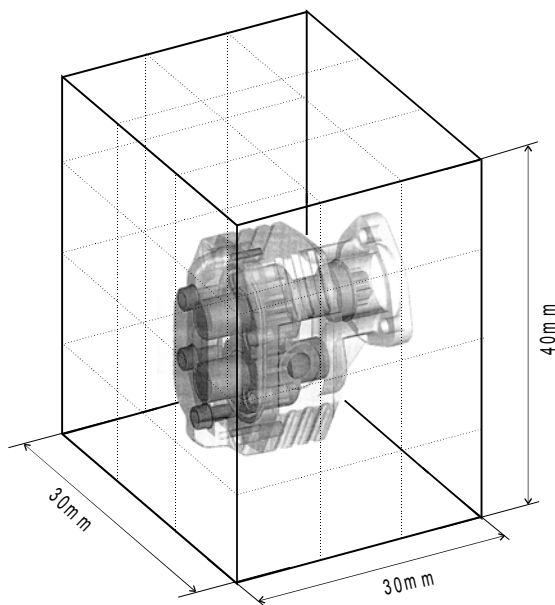
U toku ispitivanja zvučne snage od strane ekipe Laboratorije za buku i vibracije, zupčasta pumpa je instalirana na merno-ispitni sto čija je konstrukcija prikazana na sl. 6.3. Uslovi instaliranja i montiranja odgovarali su uslovima realne eksploatacije zupčaste pumpe.

**Sl. 6.3** Merno-ispitni sto

Merno-ispitini sto, na kojem je montirana zupčasta pumpa za ispitivanje, smešten je u prostoriji paralelopipednog oblika zapremine 36000m^3 . U blizini, kao potencijalna reflektujuća površina, koja može bitno uticati na preciznost ispitivanja indikovana je površina uljnog rezervoara, tako da je ta površina obložena zvučno-apsorpcionim materijalom u obliku ploča od kamene vune debljine 50mm.

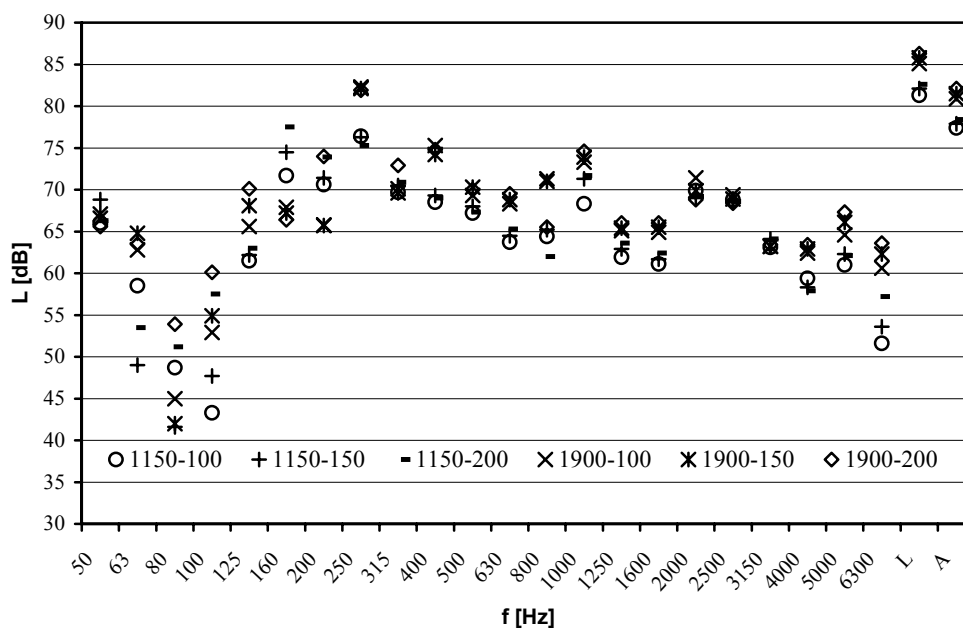
U toku ispitivanja nije bilo značajne pojave akustičke emisije van merne površine, osim komponenti merno-ispitnog stola. U cilju smanjenja uticaja akustičke emisije elektromotora i reduktora na preciznost merenja intenziteta zvuka na mernoj površini, merna površina je odvojena od uočenih komponenti konstrukcijom od drvene ploče debljine 5mm, koja je sa strane elektromotora i reduktora obložena zvučno-apsorpcionim materijalom u obliku ploča kamene vune, debljine 50mm.

Kao merna površina izabrana je paralelopipedna površina dimenzija $30\times 30\times 40\text{mm}$ (sl. 6.4), koja potpuno obuhvata ispitivani izvor - zupčastu pumpu. Posmatrana površina obuhvata i dve potpuno reflektujuće površine - donju i zadnju na kojima nije vršeno merenje intenziteta zvuka. Ostali deo merne površine podeljen je na na 45 segmenata dimenzija $10\times 10\text{mm}$. U centrima segmenata izvršeno je merenje nivoa komponente normalnog intenziteta zvuka i nivoa zvučnog pritiska.



Sl. 6.4 Merna površina

S obzirom na definisane nominalne i maksimalne vrednosti broja obrtaja i pritiska, zupčasta pumpa je ispitivana za šest različitih režima rada, a komparativna analiza dobijenih rezultata prikazana je na sl. 6.5, gde prvi broj u legendi predstavlja broj obrtaja pumpe u minuti, a drugi pritisak u barima.



Sl. 6.5 Komparacija nivoa zvučne snage zupčaste pumpe za ispitivane režime rada

6.2 IDENTIFIKACIJA DOMINANTNIH IZVORA BUKE

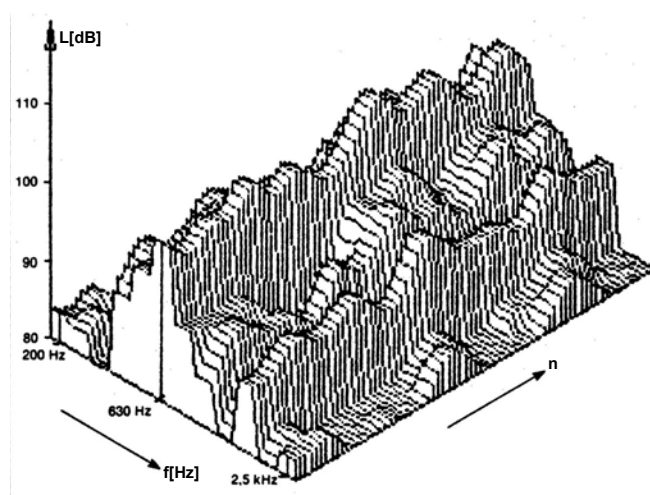
Intenzitet zvuka, osim kvantifikacije zvučne snage izvora, nudi nekoliko načina lokacije i identifikacije delova, uređaja i mašina koji zrače najveću zvučnu energiju [7,20,70,80]. Na taj način je moguće izvršiti neophodnu rekonstrukciju samo onih delova sistema koji imaju najveću emisiju buke.

Za lokaciju i identifikaciju komponenata koje zrače najveću zvučnu energiju, koriste se sledeći postupci [69,70]:

- Komparacija spektara intenziteta zvuka;
- Nulti metod;
- Rangiranje komponenti izvora buke na bazi zvučne snage;
- Mapiranje vektora intenziteta zvuka; Mapiranje normalne komponente vektora intenziteta zvuka.

6.2.1 Komparacija spektara intenziteta zvuka

Sonda za merenje intenziteta zvuka, usmerena pod uglom od 0° ka površini koja obuhvata potencijalne izvore buke, pomera se duž te površine posmatrajući displej instrumenta. Kada se otkrije oblast sa visokim nivoom intenziteta zvuka, trenutni spektar se memoriše i istraživanje se nastavlja. Nakon skeniranja cele površine, formira se trodimenzionalni grafik, nivo intenziteta zvuka - frekvencija - broj merenja (sl. 6.6), vrši se komparacija memorisanih spektara i nalazi spektar sa maksimalnim nivoom intenziteta zvuka. Spektar sa maksimalnim nivoom zvučnog pritiska povezuje se sa odgovarajućom komponentom mašinskog sistema i na taj način se određuje dominantni izvor buke.

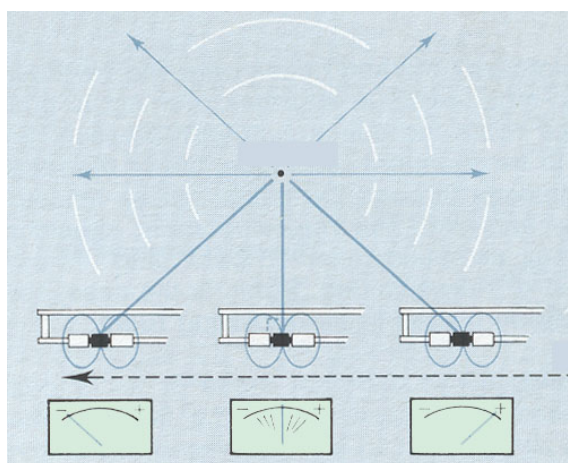


Sl. 6.6 Komparacija spektara intenziteta zvuka [70]

6.2.2 Nulti metod

Nulti metod za osnovu ima osobine direktivnosti probe koja ima oblik osmice, tako da, u okolini nulte osjetljivosti merne probe, postoje promene u pravcu intenziteta za samo male promene u uglu zvučne incidencije. Zvuk koji dolazi pod uglom od 85° biće zabeležen kao pozitivni intenzitet, a zvuk pod uglom od 95° kao negativni intenzitet (sl. 6.7)

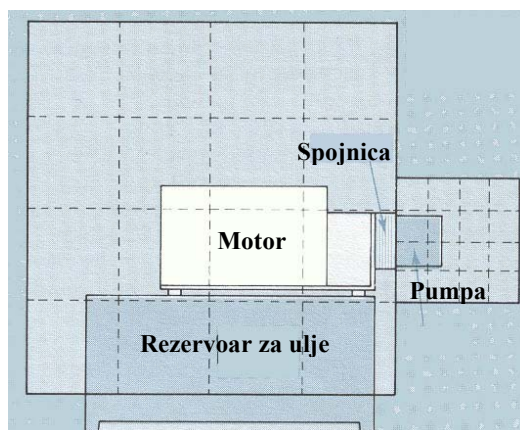
Sonda za merenje intenziteta zvuka, usmerena pod uglom od 90° ka površini koja obuhvata potencijalne izvore buke, pomera se duž te površine posmatrajući displej instrumenta. Pozicija merne probe, u kojoj se pravac intenziteta naglo menja po znaku, definiše tačku u kojoj zvuk dolazi na probu pod uglom od 90° . Na taj način se locira izvor buke, pomerajući sondu u ravni u kojoj želimo da lociramo izvor.



Sl. 6.7 Nulti metod [27]

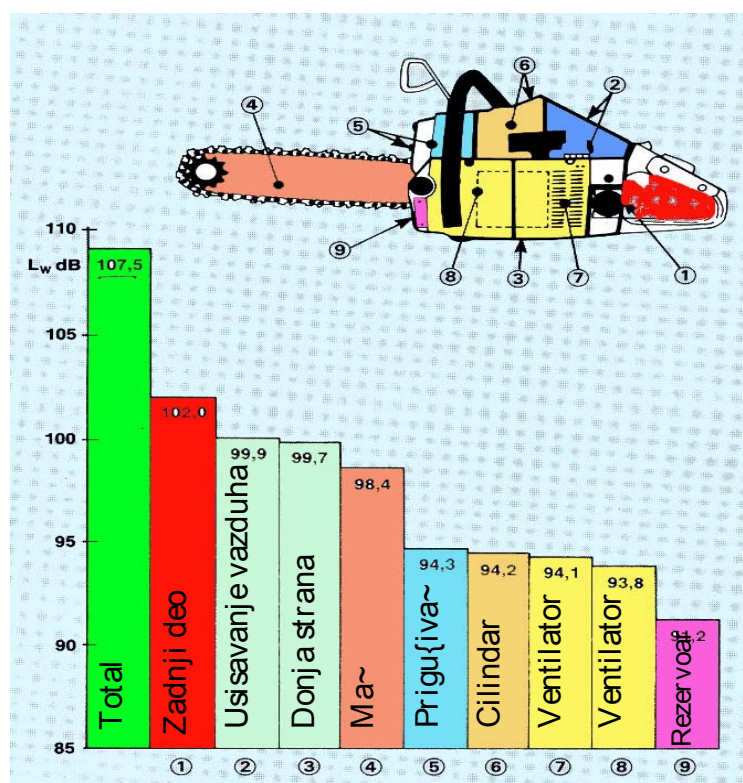
6.2.3 Rangiranje komponenti izvora buke

Složeni izvori buke emituju zvučnu energiju iz više izvora. Određivanje zvučne snage, kao mere emitovane zvučne energije pojedinih komponenti izvora buke omogućava nalaženje dominantne komponente u zračenju zvučne energije. Merenjem intenziteta zvuka na segmentima mernih površina, koji obuhvataju pojedinačne komponente izvora buke, može se odrediti njihova zvučna snaga (sl. 6.8). Merenjem intenziteta zvuka eliminiše se uticaj svih ostalih komponenti osim ispitivane.



Sl. 6.8 Merenje intenziteta zvuka na segmentima merne površine [27]

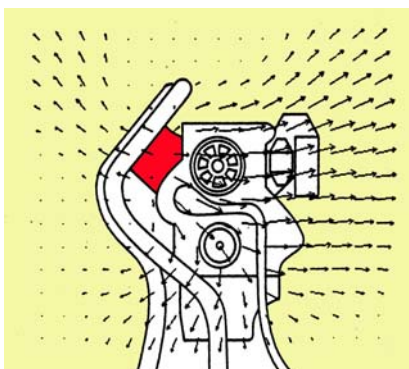
Na osnovu dobijenih podataka o nivou zvučne snage može se odrediti ukupna zvučna snaga složene strukture, kao i komponenta sa dominantnim zračenjem zvučne energije, odnosno sa najvećom zvučnom snagom (sl. 6.9).



Sl. 6.9 Rangiranje komponenti izvora buke kod motorne testere [69,70]

6.2.4 Mapiranje vektora intenziteta zvuka

Trodimenzionalnom sondom za merenje intenziteta zvuka moguće je merenje vektora intenziteta, kojim se opisuju veoma složena zvučna polja. Prikazivanje dobijenih podataka u odgovarajućoj formi jasno ukazuje na potencijalne izvore buke, na pravce protoka zvučne energije, kao i na količinu protoka te energije. Primer merenja vektora intenziteta zvuka na dizel mašini sa 8 cilindara ukazuje na jako zračenje zvučne energije koje potiče od kvara u bloku cilindra na levoj strani (sl. 6.10).

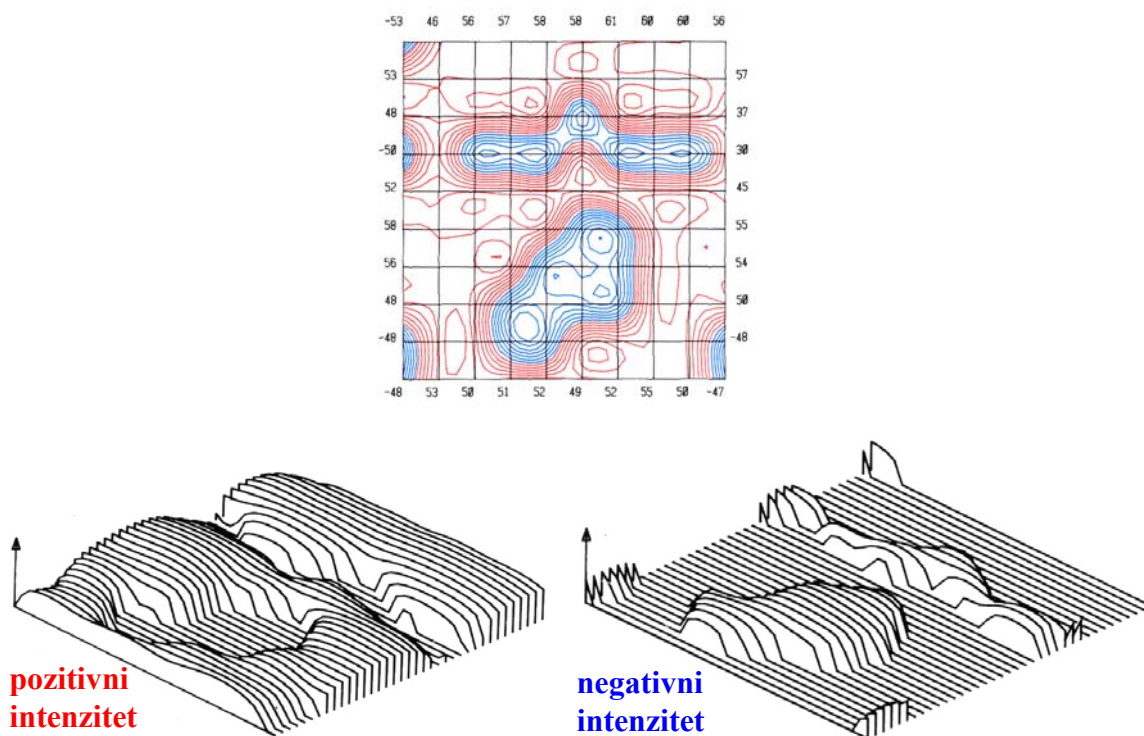


Sl. 6.10 Mapiranje vektora intenziteta zvuka na dizel mašini [27]

6.2.5 Mapiranje normalne komponente vektora intenziteta zvuka

U cilju mapiranja normalne komponente intenziteta zvuka, površina koja obuhvata sve komponente izvora buke deli se na segmente i čijim se centrima meri normalna komponenta intenziteta zvuka. Na osnovu dobijenih spektara, formira se matrica izmerenih nivoa koji se dalje obrađuju programima za interpolaciju podataka, čime se oni konvertuju u mapu normalne komponente intenziteta zvuka na celoj mreži za svaki frekvencijski opseg posebno.

Za prezentaciju mapa koriste se konturni i 3-D grafici koji daju detaljnu sliku zvučnog polja, iz koje se mogu sa velikom tačnošću locirati delovi struktura koji zrače najveću zvučnu energiju (sl. 6.11). Površine gde je indikovano pozitivan intenzitet definišu zvučne izvore. U ovim oblastima zvučna energija se emituje od površine izvora i rad se vrši na okolne čestice vazduha. Površine gde je indikovano negativan intenzitet definišu zvučne ponore. U ovim oblastima zvučna energija se emituje ka površine izvora i rad vrše čestice vazduha na površinu.



Sl. 6.11 Mapiranje normalne komponente vektora intenziteta zvuka na poklopcu mini kombija [88]

6.3 IZOLACIONA MOĆ PREGRADNIH KONSTRUKCIJA

Sušтина izolacione moći pregradnih konstrukcija najslikovitije se definiše razlikom nivoa incidentne energije koja padne na pregradu i energije koja se prenese u prijemnu prostoriju. Aplikovanjem teorijske suštine na hipotetički model, koji podrazumeva difuzna zvučna polja u prijemnoj i predajnoj prostoriji i apsorbovanje dela emitovane energije u prijemnoj prostoriji, izolaciona moć pregradne konstrukcije može se izraziti kao razlika nivoa zvučnih pritisaka prostorija iz hipotetičkog modela, korigovana za deo apsorbovane energije u prijemnoj prostoriji [13]:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_2}, \quad (6.15)$$

gde je: L_1 - nivo zvuka u predajnoj prostoriji, L_2 - nivoa zvuka u prijemnoj prostoriji, S - površina pregradnog zida i A_2 - apsorpcija prijemne prostorije.

Izgrađeni postupci određivanja izolacione moći pregradnih konstrukcija, metodom zvučnog pritiska, predstavljaju sintezu teorijskih saznanja o zvučnoj izolaciji i praktičnih iskustava stečenih u procedurama merenja. Međutim, uticajni faktori realne konstrukcije, pre svega bočno provođenje, kao i nehomogenost izvedene realne konstrukcije i oscilovanje pregrade pobuđene zvučnim signalom, prouzrokuju da se ne dobije realna slika o zvučnoj izolaciji pregrade.

6.3.1 Metodska osnova

Kako se intenzitetom zvuka može bliže definisati oscilatorna aktivnost pregradne konstrukcije, postupak određivanja izolacione moći pregradnih konstrukcija omogućuje eliminisanje uticaja faktora bočnog provođenja na ukupnu izolaciju pregrade. U analizi strukture zvučnog polja predajne prostorije zadržava se isti analitički model kao i kod metode zvučnog pritiska, dok se zvučna energija emitovana sa pregradnog zida u prijemnu prostoriju određuje intenzitetom zvuka, tako da se dobija zvučna izolacija pregradne konstrukcije u funkciji intenziteta [11-13,30].

Izolaciona moć pregradne konstrukcije definisana razlikom nivoa zvučne snage incidentnog zvučnog talasnog snopa L_{W1} i zvučne snage talasnog snopa prenetog u prijemnu prostoriju L_{W2} , podrazumeva analizu strukture zvučnog polja ograničenog prostora sa leve i desne strane pregradne konstrukcije.

Zvučna snaga incidentnog talasnog snopa koji pada na pregradni zid je:

$$W_1 = \sum_{i=1}^n I_{li} \cdot \Delta S_{li}, \quad (6.16)$$

gde je: ΔS_{li} - segment površine pregradne konstrukcije, I_{li} - usrednjena vrednost zvučnog intenziteta incidentnog talasa na i -tom segmentu, n - broj segmenata na koji je podeljena površina pregradne konstrukcije.

Zadržavajući se u sferi hipotetičkog modela sa homogenim i difuznim zvučnim poljem u predajnoj prostoriji, uz pomoć statističke analize i pretpostavke da je pregradna konstrukcija podeljena na n jednakih segmenata, mogu se izvesti izraz za nivo zvučne snage incidentnog talasnog snopa [12]:

$$L_{W1} = L_{l1} + 10 \cdot \log S = (L_p - 6) + 10 \cdot \log S. \quad (6.17)$$

Zvučna snaga, emitovana sa pregradnog zida u prijemnu prostoriju, definiše se jednačinom:

$$W_2 = \sum_{j=1}^k I_{2j} \cdot \Delta S_{2j}, \quad (6.18)$$

gde je: I_{2j} - usrednjena vrednost zvučnog intenziteta emitovana sa j -tog segmenta površine, k - broj segmenata na koji je podeljena površina pregradne konstrukcije.

Za slučaj kada su razlike u emisiji elementarnih površina male, jednačina za nivo zvučne snage u prijemnoj prostoriji L_{W2} , dobija oblik:

$$L_{W2} = L_{I2} + 10 \cdot \log S. \quad (6.19)$$

Definisanjem nivoa zvučne snage u predajnoj i prijemnoj prostoriji jednačinama (6.17) i (6.19), stvaraju se uslovi za formulisanje izolacione moći u funkciji intenziteta zvuka:

$$R = (L_p - 6) - L_{I2}. \quad (6.20)$$

Heterogene, odnosno realne pregrade koje dominiraju u inženjerskoj praksi, karakteriše izolaciona moć elementa površine pregradne konstrukcije:

$$R_n = (L_p - 6) - L_{In} + 10 \cdot \log(S / S_n), \quad (6.21)$$

gde je: L_{In} - usrednjena vrednost nivoa zvučnog intenziteta emitovane energije na elementa površine S_n .

Rezultujuća vrednost izolacione moći heterogenih pregradnih konstrukcija je:

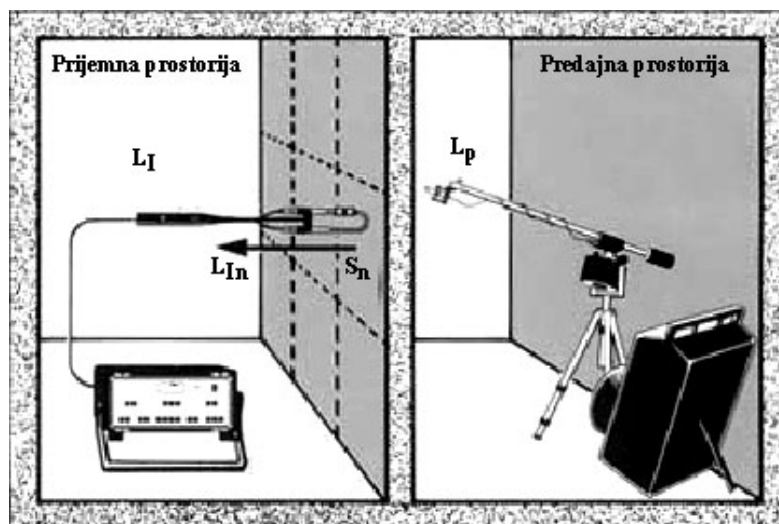
$$R' = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n 10^{R_n/10}. \quad (6.22)$$

6.3.2 Merna procedura

Na osnovu definisane methodske osnove koja je rezultirala jednačinom (6.20) razvijena je merna procedura određivanja izolacione moći pregradnih konstrukcija [30]. S obzirom na korišćeni hipotetički model pri izvođenju funkcionalne zavisnosti izolacione moći pregradnih konstrukcija od intenziteta zvuka u mernoj proceduri potrebno je obezbediti da u predajnoj prostoriji postoji homogeno difuzno zvučno polje, dok u prijemnoj prostoriji doprinos reverberacionog zvučnog polja treba minimizirati.

Kao pobuda zvučnog polja u predajnoj prostoriji koristi se neusmerni zvučni izvor, smešten u uglu merne prostorije (sl. 6.12), koji emituje signal širokog spektra učestanosti, sa uniformnim zračenjem u svim pravcima. Meranjem nivoa zvučnog pritiska u više tačaka ili korišćenjem rotacione pečaljke određuje se prostorno i vremenski usrednjeni nivo zvučnog pritiska u predajnoj prostoriji, čime se definiše zvučna energija koja padne na pregradnu konstrukciju.

Merna procedura u prijemnoj prostoriji zasnovana je na merenju intenziteta zvuka na mernoj površini u neposrednoj blizini ispitivane pregradne konstrukcije. Merna površina se deli na n segmenata, koji mogu biti i jednaki. Intenzitet zvuka se meri sondom za zvučni intenzitet koja je postavljena upravno na mernu površinu u diskretnim tačkama koje odgovaraju centrima segmenata merne površine, ili skeniranjem mernih segmenata. Prostornim i vremenskim usrednjavanjem izmerenih veličina određuje se nivo intenziteta koji definiše deo zvučne energije koja se prenese iz predajne u prijemnu prostoriju.



Sl. 6.12 Procedura merenja izolacione moći pregradne konstrukcije metodom intenziteta zvuka [27]

Izmereni intenzitet u prijemnoj prostoriji predstavlja superpoziciju intenziteta koji emituje pregradna konstrukcija i dela intenziteta reverberacionog zvučnog polja koji se apsorbuje pregradnom konstrukcijom. U cilju korektno procene emitovane zvučne energije pregradnom konstrukcijom, potrebno je minimizirati deo energije koja se apsorbuje pregradnom konstrukcijom, odnosno potrebno je da prisustvo reverberacionog zvučnog polja u prijemnoj prostoriji bude što manje. Merna greška se može procedniti izrazom:

$$L_{\varepsilon} = 10 \log \left(1 - \frac{A_S W}{A W_S} \right), \quad (6.23)$$

gde je: A - ukupna apsorpcija prijemne prostorije, A_S - apsorpcija ispitivane pregradne konstrukcije, W - ukupna zvučna energija koja se prenosi u prijemnu prostoriju a W_S - zvučna energija koja se prenosi u prijemnu prostoriju kroz ispitivanu konstrukciju.

Ukoliko je izračunata merna greška neprihvatljiva, može se smanjiti povećavanjem ukupne apsorpcije prijemne prostorije, unošenjem apsorpcionog materijala u centralni deoprostorije, čime se smanjuje indeks reaktivnosti zvučnog polja a time i fazna greška pri merenju intenziteta zvuka. Indeks reaktivnosti zvučnog polja može se odrediti merenjem, ili pomoću prikazane aproksimativne jednačine:

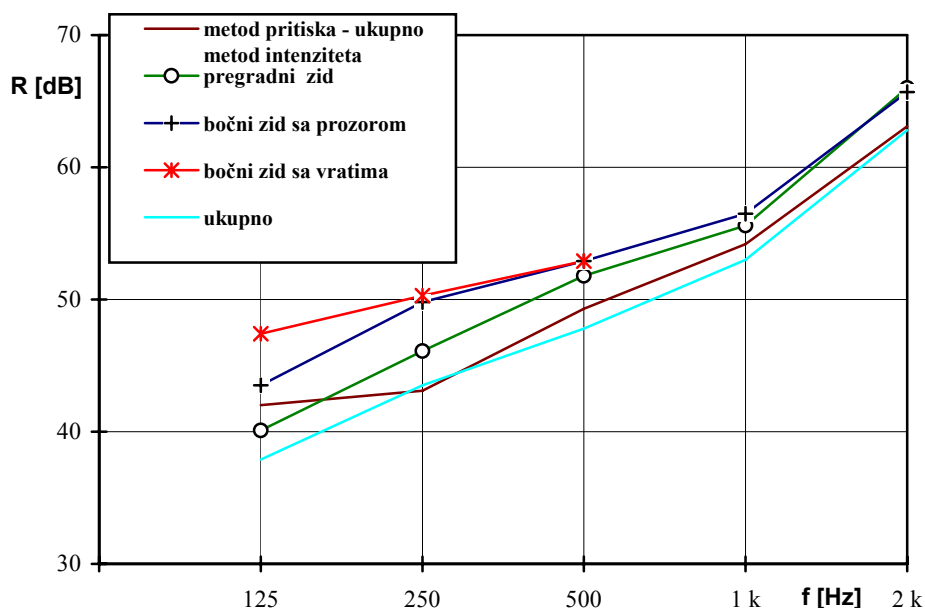
$$\delta_{pl} \approx 10 \log \left(\frac{8 WS}{A W_S} \right), \quad (6.24)$$

6.3.3 Eksperimentalni rezultati

Verifikacija metode intenziteta zvuka, sprovedena je na realnoj pregradnoj konstrukciji armirano-betonske strukture debljine 15cm, površine 10.7 m² [11-13]. Plan eksperimenta programiran je sa ciljem kompariranja rezultata dobijenih klasičnom metodom zvučnog pritiska, propisanom standardima serije ISO 140, sa rezultatima metode intenziteta zvuka.

Identifikacija intenziteta zvuka izvedena je za pregradni zid u 40 diskretnih mernih tačaka, ravnomerno raspoređenih po površini zida, mernom sondom rastojanjem mikrofona od 50 mm, za centralne frekvencije oktavnog propusnog opsega 125, 250 i 500Hz. Za oktavne opsege centralnih frekvencija 1 i 2kHz korišćeno je rastojanje od 12mm. Merenje emitovanog intenziteta zvuka sa bočnih zidova izvedeno je procedurom skeniranja površina zidova.

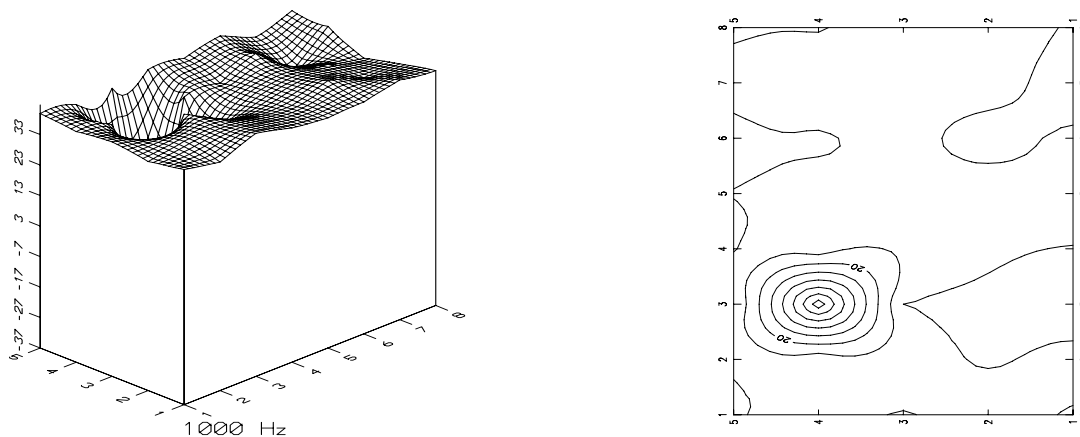
Na osnovu izmerenih vrednosti veličina zvučnog pritiska, intenziteta zvuka i vremena reverberacije izračunate su vrednosti izolacione moći pregrade, za obe korišćene metode merenja, u skladu sa prikazanim jednačinama. Dobijeni rezultati grafički su prikazani na sl. 6.13.



Sl. 6.13 Izolaciona moć pregrade [12]

Rezultati dobijeni u proceduri eksperimentalne analize pokazuju da je uloga bočnog provođenja u izražavanju zvučne izolacije veoma značajna. Rezultati pokazuju da bočno provođenje svojim negativnim dejstvom umanjuje indeks izolacije za red veličine 2-3 dB, što odgovara teorijski dobijenim rezultatima. Karakteristično je da je uticaj bočnog provođenja na niskim frekvencijama do 500Hz gotovo zanemarljiv, dok je na frekvencijama preko 500Hz vrlo značajan naročito na 2kHz.

Ispitivanja sprovedena sa ciljem uvođenja intenziteta u proceduru merenja zvučne izolacije pregradnih konstrukcija, otkrivaju nove pristupe u izučavanju fenomena oscilatornih procesa kao što su izofonske konture intenziteta i 3-D grafici raspodele intenziteta zvuka, koji slikovito ukazuju na procese prenosa zvučne energije i ponašanje pregradnih konstrukcija u aktivnim sredinama. Na sl. 6.14 prikazan je primer konturnih i 3-D grafika za ispitivanu pregradnu konstrukciju.



Sl. 6.14 3-D grafici i izofonske konture ispitivane pregradne konstrukcije [12]

6.4 KOEFICIJENT APSORPCIJE - FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA

Da bi se dobile željene karakteristike zvučnog polja pri akustičkom projektovanju prostorija, veoma je važno raspolagati sa pouzdanim podacima o parametrima koji definišu akustičke karakteristike primenjenih apsorpcionih materijala. Kao osnovni podaci pri projektovanju koriste se frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije materijala, koje se mogu odrediti korišćenjem dve standardizovane metode: merenjem vremena reverberacije u reverberacionoj prostoriji i metodom Kundtove cevi [53,58].

Određene vrednosti u reverberacionoj prostoriji, merenjem vremena reverberacije, predstavljaju srednju vrednost za sve uglove incidencije zvučnih talasa, što je približnije stvarnim uslovima korišćenja materijala, nego kada se merenje vrši u Kundtovoј cevi. Međutim, i pored merenja u naročito nepravilnim prostorijama sa velikom zapreminom, definisanim vremenom reverberacije i difuznim zvučnim poljem, vrednosti koeficijenta apsorpcije istog materijala, određene u različitim laboratorijama, mogu se razlikovati u priličnoj meri. Pored ovog nedostatka, dobijeni merni rezultati mogu u određenim frekvencijskim opsezima premašiti teorijsku maksimalnu vrednost koeficijenta akustičke apsorpcije. Dosadašnja iskustva u ovoj oblasti ukazuju da nastala odstupanja potiču od različite konfiguracije zvučnog polja koje deluje na merni uzorak pri opadanju nivoa zvučne energije u prostoriji u toku merenja vremena reverberacije. Primena ove metode je moguća i u prostorijama paralelopipednog oblika pod određenim uslovima, tj. ako se materijal raspodeli podjednako na tri susedne strane prostoriје. Međutim, za praktična izvođenja najpogodnije je da se ispitivani materijal postavi direktno na pod prostoriје, a ne da se pričvršćuje na bočne strane, čime se mogu remetiti apsorpcione karakteristike materijala.

Intenzitet zvuka obezbeđuje alternativni pristup za određivanje koeficijenta apsorpcije u prostorijama paralelopipednog oblika, koje ne zadovoljavaju potrebne uslove za primenu standardizovane metode. Zvučna energija koju apsorbuje neki materijal može se odrediti na isti način kao i energija koju zrači neki izvor, obuhvatanjem ispitivanog uzorka zatvorenom mernom površinom kroz koju se određuje prenetu energija merenjem normalne komponente intenziteta zvuka.

6.4.1 Metodska osnova

Polazeći od definicije koeficijenta apsorpcije koji predstavlja odnos apsorbovane energije nekim materijalom i ukupne incidentne energije koja do njega dopire, i osnovnih pretpostavki prostiranja zvučnih talasa u prostorijama pravilnog paralelopipednog oblika definisan je postupak za određivanje koeficijenta apsorpcije merenjem intenziteta zvuka [72-76].

Incidentna energija koja padne na merni uzorak ne može se odrediti direktnim merenjem, već se izračunava na osnovu merenja prostorno i vremenski usrednjenog zvučnog pritiska u mernoj prostoriji i primenom klasične jednačine statističke teorije koja određuje količinu energije incidentnu na posmatranu površinu [2,3]:

$$W_i = \frac{\bar{p}^2 \cdot S}{4\rho c} \quad (6.25)$$

gde je: W_i - incidentna energija koja padne na površinu posmatranog uzorka S , a \bar{p} - prostorno i vremenski usrednjeni zvučni pritisak u mernoj prostoriji.

Jednačina (6.25) važi za uslove difuznog zvučnog polja, pa je za njenu primenu u prostorijama paralelopipednog oblika potrebno ispuniti uslove pod kojima se zvučno polje može smatrati homogenim i difuznim. Potrebni uslovi su [76]:

- da zvučni izvor i prijemnik zvuka budu neusmereni,
- da zvučni izvor smešten u centru prostorije emituje širokopoljasni zvuk, sa uniformnim zračenjem u svim pravcima,
- da raspodela apsorpcije graničnih prostorija merne prostorije bude uniformna i da se znatno ne poremeti unošenjem ispitivanog apsorbera, što zahteva da količina unetog materijala ne sme biti velika, i
- da merna prostorija bude relativno velika

Apsorbovana energija ispitivanim materijalom može se odrediti merenjem normalne komponente intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom neposredno iznad površine uzorka, u diskretnim mernim tačkama ili skeniranjem merne površine koja potpuno obuhvata merni uzorak. Iskazano tvrđenje zasnovano je analizi kretanja zvučnih talasa neposredno iznad mernog uzorka [76].

Ako se pretpostavi da su lokalne promene intenziteta zvuka na mernoj površini male, tada se apsorbovana energija može odrediti kao:

$$W_{\alpha} = \bar{I} \cdot S . \quad (6.26)$$

gde je: W_{α} - apsorbovana energija mernim uzorkom površine S , a \bar{I} - prostorno i vremenski usrednjeni intenzitet zvuka na mernoj površini.

Zamenom izvedenih jednačina za incidentnu i apsorbovanu energiju u osnovnu jednačinu za određivanje koeficijenta apsorpcije dobija se jednačina za određivanje koeficijenta apsorpcije merenjem intenziteta zvuka [76]:

$$\alpha = \frac{W_i - W_r}{W_i} = \frac{W_{\alpha}}{W_i} = \frac{\bar{I} \cdot 4\rho c}{\bar{p}^2} \quad (6.27)$$

Ako prostorno i vremenski usrednjene vrednosti intenziteta zvuka izrazimo preko nivoa gornja jednačina se može napisati u obliku:

$$\alpha = 10^{\frac{L_i - (L_p - 6)}{10}} \quad (6.28)$$

6.4.2 Merna procedura

Na osnovu definisanog metodskog osnova, razvijena je merna procedura određivanja koeficijenta apsorpcije u prostorijama paralelopipednog oblika [72-76]. Kao pobuda zvučnog polja koristi se neusmerni zvučni izvor, smešten u centru merne prostorije, koji emituje signal širokog spektra učestanosti sa uniformnim zračenjem u svim pravcima. Merni uzorak, relativno malih dimenzija, smešta se na pod, i s obzirom na svoje male dimenzije u odnosu na dimenzije merne prostorije ne remeti znatnije zvučno polje. Merna procedura je zasnovana na merenju intenziteta zvuka i zvučnog pritiska. Merenjem intenziteta zvuka, na mernoj površini, neposredno iznad mernog uzorka, sondom za zvučni intenzitet koja je postavljena upravno na mernu površinu, i njegovim prostornim i vremenskim usrednjavanjem, određuje se apsorbovana zvučna energija mernim uzorkom. Incidentna energija koja dolazi na merni uzorak određuje se primenom jednačine izvedene statističkom analizom i merenjem nivoa zvučnog pritiska na mernoj površini koja se nalazi u centralnom delu prostorije iznad mernog uzorka.

Vremensko usrednjavanje merenih veličina je neophodno da bi se smanjila slučajna greška koja može nastati pri merenju, dok se prostorno usrednjavanje sprovodi u cilju smanjenja

uticaja lokalnih promena mernih veličina na mernu preciznost. Merna površina deli se na više segmenata i u centrima segmenata vrši se merenje zvučnog pritiska i intenziteta zvuka. Kako lokalne promene zvučno pritiska i intenziteta zvuka mogu biti različite, to i broj segmenata za definisanje prostorno usrednjenih vrednosti zvučnog pritiska i intenziteta zvuka može biti različit.

Ako se zvučni pritisak meri na mernoj površini koja je podeljena na n segmenata površine ΔS_i , a intenzitet zvuka na mernoj površini koja je podeljena na m segmenata površine ΔS_j , tada se koeficijent apsorpcije određuje primenom sledeće jednačine [72]:

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^m I_j \Delta S_j}{\sum_{i=1}^n \frac{p_i^2}{4\rho c} \Delta S_i}, \quad (6.29)$$

gde je: p_i - zvučni pritisak izmeren na i -tom segmentu a I_j - intenzitet zvuka izmeren na j -tom segmentu.

6.4.3 Eksperimentalni rezultati

U eksperimentalnoj proceduri verifikacije predloženog mernog postupka, koeficijent apsorpcije je određen za neimpregiranu i impregiranu mineralnu vunu, zapreminskih gustina 50kg/m^3 i 100kg/m^3 , respektivno. Određivanje apsorpcionog koeficijenta ispitivanih uzoraka izvršeno je u dve merne prostorije paralelopipednog oblika, dimenzija $8.8 \times 6.2 \times 3.8\text{m}$ i $7.6 \times 5.2 \times 3.8\text{m}$ i različitih akustičkih karakteristika [76].

Sprovedenu proceduru merenja koeficijenta akustičke apsorpcije materijala, u obe merne prostorije i za oba merna uzorka, činilo je tri faze:

- merenje vremena reverberacije prostorije, u cilju određivanja akustičkih karakteristika prostorije,
- merenje zvučnog pritiska za određivanje incidentne energije u prostoriji, i
- merenje intenziteta zvuka za određivanje apsorbovane energije materijalom, i u istim tačkama takođe merenje zvučnog pritiska u cilju određivanja indeksa reaktivnosti zvučnog polja.

Za obezbeđivanje što difuznijeg zvučnog polja u svim merenjima korišćen je neusmerni zvučni izvor, model B&K 4224, koji je bio smešten približno u centru prostorija. Za merenje veličina koje određuju koeficijent apsorpcije korišćeni su merni uzorci ukupne površine 3m^2 . Uzorci su smešteni na pod prostorije, tako da su bočne ivice mernih površina bile udaljene najmanje 1.5 m od bočnih strana prostorije.

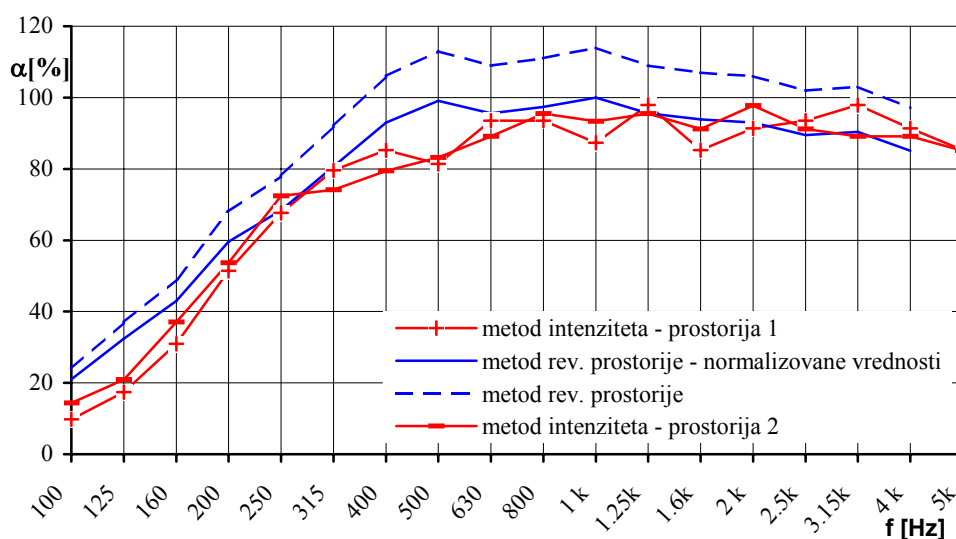
Merenje zvučnog pritiska dvokanalnim realno-vremenskim analizatorom, model B&K 2144, izvršeno je na mernoj površini koja je bila smeštena iznad mernog uzorka na visini od 1.6 m. Merna površina je podeljena na 12 segmenata, i čijim centrima je izvršeno merenje zvučnog pritiska, sondom za intenzitet zvuka model, B&K 3519, kojom se određuje srednji pritisak, u središnjoj tački između dva mikrofona. Za merenje zvučnog pritiska izabrana je merna sonda, a ne jedan mikrofon, da bi obezbedili da se u svim merenjima koriste isti pretvarači, sa istom osetljivošću i istim frekvencijskim karakteristikama.

Merenje intenziteta zvuka izvršeno je neposredno iznad mernog uzorka, na mernoj površini koja je bila smeštena na visini od 10 cm iznad mernog uzorka. Podela merne površine je bila ista kao pri merenju zvučnog pritiska, i u centrima mernih segmenata izvršeno je merenje intenziteta zvuka mernom sondom, usmerenom normalno na mernu površinu. S obzirom na

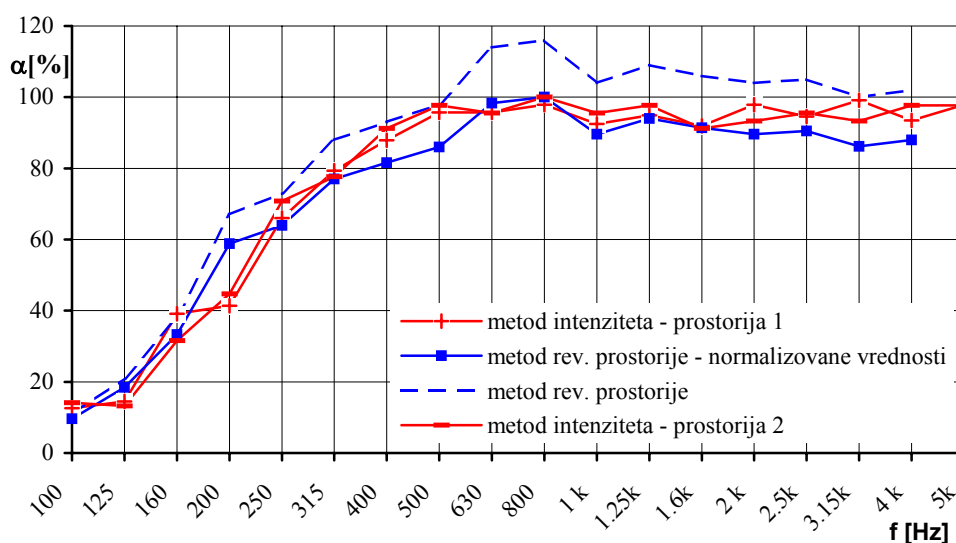
opseg frekvencija koji se želeo analizirati, u cilju minimiziranja greške aproksimacije gradijenta pritiska i fazne greške, izabrane su za merenja dve veličine rastavljača:

- $\Delta r = 50$ mm, za opseg niskih frekvencija, odnosno za terčne pojaseve čije se centralne frekvencije kreću od 100 do 630 Hz, i
- $\Delta r = 12$ mm, za terčne pojaseve sa centralnim frekvencijama od 800 do 5000 Hz.

Na osnovu srednjih vrednosti izmerenih nivoa zvučnog pritiska i nivoa intenziteta zvuka, izračunat je koeficijent apsorpcije ispitivanih uzoraka primenom jednačine (6.29). Dobijene frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije u različitim akustičkom sredinama, za neimpregiranu i impregiranu mineralnu vunu, prikazane su na sl. 6.15 i 6.16, respektivno. U cilju komparativne analize dobijenih rezultata, na istim slikama date su i frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije za ispitivane uzorke koje su dobijene klasičnom metodom u reverberacionoj prostoriji.



Sl. 6.15 Frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije neimpregirane kamene vune zapreminske gustine 50kg/m^3 [72,76]



Sl. 6.16 Frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije impregirane kamene vune zapreminske gustine 100kg/m^3 [72,76]

Komparativna analiza rezultata dobijenih u eksperimentalnoj proceduri određivanja koeficijenta apsorpcije materijala sa vrednostima dobijenim klasičnom metodom u reverberacionoj prostoriji, ukazuju na mogućnost određivanja frekvencijskih karakteristika koeficijenta akustičke apsorpcije materijala predloženom procedurom, u prostorijama paralelopipednog oblika koje ne ispunjavaju uslove za primenu klasične metode.

6.5 KOEFICIJENT APSORPCIJE - JEDNOBROJNO IZRAŽAVANJE

Vrednosti koeficijenta apsorpcije, dobijene standardizovanim metodama, frekvencijski su zavisne, a ponekad je veoma poželjno raspolagati sa jednim podatkom koji će jednoznačno opisivati apsorpcione karakteristike materijala. Takva vrednost može biti veoma pogodna za upoređivanje zvučno-apsorpcionih karakteristika različitih materijala kao i za njihovu klasifikaciju u cilju lakšeg donošenja odluke o izboru odgovarajućeg apsorpcionog materijala za akustičku obradu prostorija u širem frekvencijskom opsegu. Za materijale koji se koriste za dobijane željenih karakteristika zvučnog polja u prostorijama sa specifičnim akustičkim zahtevima, u užem frekvencijskom opsegu, pri izboru je ipak potrebno raspolagati sa kompletnim podacima o frekvencijskoj zavisnosti koeficijenta apsorpcije u tom opsegu.

6.5.1 Procedura određivanja jednobrojne vrednosti

Standard ISO 11654 definiše metod pomoću koga se mogu frekvencijsko zavisne vrednosti koeficijenta apsorpcije konvertovati u jedan broj, tzv. težinski koeficijent apsorpcije [73,75]. Referentna kriva na osnovu koje se vrši ocenjivanje koeficijenta apsorpcije jednim brojem pokriva frekvencijski opseg oktava od 250 Hz do 4000 Hz, tako da je na ovaj način jednobrojno izražavanje zvučne apsorpcije primenljivo samo za aplikacije koje prekrivaju celokupan frekvencijski opseg. Ako nas interesuje samo deo ovog opsega, tada je pogodnije primeniti materijale sa dobrim apsorpcionim karakteristikama u željenom frekvencijskom opsegu. Takođe, referentna kriva je ograničena na frekvencije iznad 250 Hz i nije primenljiva za niže frekvencije, pa se ocenjivanje i u tom opsegu vrši na osnovu kompletne krive koeficijenta apsorpcije.

Definisan merna procedura u poglavlju 6.4.2 daje frekvencijsku karakteristiku koeficijenta apsorpcije ispitivanog materijala. Pored toga, moguće je i jednobrojno izražavanje koeficijenta zvučne apsorpcije.

U tom cilju, merne veličine koje definišu koeficijent apsorpcije određuju se u celokupnom frekvencijskom opsegu primenom A-težinske krive. Jednobrojna vrednost koeficijenta apsorpcije određuje se na osnovu jednačine [73,75]:

$$\alpha_A = 10^{\frac{\bar{L}_{LA} - (\bar{L}_{pA} - 6)}{10}} \quad (6.30)$$

gde je: \bar{L}_{LA} prostorno i vremenski usrednjeni ukupni A-nivo intenziteta zvuka a \bar{L}_{pA} prostorno i vremenski usrednjeni ukupni A-nivo zvučnog pritiska.

6.5.2 Eksperimentalni rezultati

U eksperimentalnoj proceduri verifikacije predloženog metoda izvršeno je konvertovanje frekvencijskih karakteristika koeficijenta apsorpcije dva uzorka kamene vune prikazane na sl. 6.15 i 6.16, standardizovanim metodom i metodom intenziteta [73,75].

Primenom standardizovane metode na frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije uzoraka kamene vune dobijene reverberacionom metodom, određen je težinski koeficijent apsorpcije i klasa apsorpcije ispitivanih materijala (tabela 6.2).

Tabela 6.2 *Težinski koeficijent apsorpcije i klasa apsorpcije kamene vune [73,75]*

gustina [kg/m^3]	50	100
α_w	1.00	1.00
klasa apsorpcije	A	A

Za materijale različitih karakteristika dobijaju se predloženom procedurom isti težinski koeficijenti apsorpcije, što ukazuje na određene nedostatke standarda. Predloženim standardom se samo oktavne vrednosti koeficijenta apsorpcije, koje premašuju teorijsku maksimalnu vrednost, zaokružuju na vrednost 1.00, dok se u praksi vrši normalizacija svih izmerenih vrednosti u odnosu na maksimalno dobijenu vrednost. Ukoliko se težinski koeficijent apsorpcije za ispitivane uzorke određuje na osnovu normalizovanih vrednosti koeficijenta apsorpcije, dobijaju se vrednosti od 0.90 i 0.95, respektivno za kamenu vunu gustine 50 kg/m^3 i 100 kg/m^3 . Ako se i zaokruživanje oktavnih vrednosti koeficijenta apsorpcije vrši sa tačnošću od 0.01 i primeni korak pomeranja referentne krive od 0.01, dobijaju se vrednosti težinskog koeficijenta od 0.93 i 0.96, čime se očigledno preciznije ocenjuju apsorpcione karakteristike materijala.

Na osnovu frekvencijskih karakteristika koeficijenta apsorpcije, dobijenih metodom intenziteta zvuka određen je težinski koeficijent apsorpcije. Takođe, dobijene frekvencijske karakteristike su konvertovane u jedan broj na osnovu jednačine (6.30). Dobijene vrednosti ovih koeficijenata date su u tabeli 6.3.

Tabela 6.3. *Jednbrojne vrednosti koeficijenta apsorpcije dobijene metodom intenziteta [73,75]*

gustina [kg/m^3]	50		100	
	prostorija 1	prostorija 1	prostorija 1	prostorija 2
α_w	0.90	0.90	0.90	0.95
α_A	0.89	0.89	0.95	0.93

Dobijene vrednosti težinskog koeficijenta apsorpcije na osnovu frekvencijskih karakteristika dobijenih metodom intenziteta zvuka u različitim prostorijama mogu poslužiti kao dobar pokazatelj ponovljivosti dobijenih rezultata u različitim mernim uslovima. Jednbrojna vrednost dobijena metodom intenziteta zvuka određena je sa tačnošću na drugu decimalu i u priličnoj meri se slaže sa vrednostima težinskih koeficijenata apsorpcije dobijenih na osnovu normalizovanih frekvencijskih karakteristika koeficijenta apsorpcije određenih u reverberacionoj prostoriji.

6.6 SPECIFIČNA AKUSTIČKA IMPEDANCA

Poznavanje specifične akustičke impedance predstavlja važan podatak pri akustičkom modeliranju prostorije i omogućuje određivanje i nekih drugih akustičkih karakteristika materijala kao što su faktor refleksije r i koeficijent apsorpcije α . Takođe, određivanjem specifične akustičke impedance materijala pri normalnoj incidenciji zvučnih talasa, stvaraju se uslovi za određivanje ugaone zavisnosti koeficijenta akustičke apsorpcije pri kosoj incidenciji zvučnih talasa [2,3].

6.6.1 Metodska osnova

Dvomikrofonska merna tehnika, zasnovana na aproksimaciji gradijenta pritiska konačnom razlikom, daje zvučni pritisak i brzinu oscilovanja čestica u akustičkom centru između dva mikrofona na malom rastojanju. Specifična impedanca predstavlja količnik ove dve veličine i može se odrediti na osnovu njihovih Furijeovih transformacija. Pri merenju specifične impedance materijala mernom sondom, kao rezultat se dobija specifična impedanca u akustičkom centru između dva mikrofona. Zato je neophodna korekcija izmerene veličine u cilju dobijanja impedance materijala [59,76].

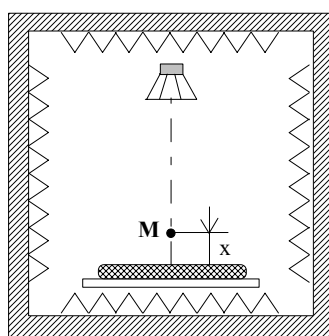
Polazeći od izraza za specifičnu akustičku impedancu [2,3], može se izvesti zavisnost ove veličine od intenziteta zvuka, kao kompleksne veličine [76]:

$$\underline{Z}_s = \frac{I + jJ}{|v|^2} = \frac{II}{|v|^2} \quad (6.31)$$

6.6.2 Merna procedura

Slično proceduri merenja specifične akustičke impedance u anehoičnoj prostoriji, koja je zasnovana na merenju prenosne funkcije mikrofonskih signala, polazeći od jednačine (6.31) razvijen je postupak za merenje ove karakteristike apsorpcionih materijala u istim uslovima [76]. Merni postupak je zasnovan na osobini savremenih mernih instrumenta koji omogućavaju, osim merenja aktivne komponente intenziteta zvuka, merenje reaktivnog intenziteta i brzine oscilovanja čestice.

Merenje se vrši u uslovima slobodnog zvučnog polja, tj. u anehoičnoj prostoriji. Uzorak apsorpcionog materijala se smešta na idealno reflektujuću površinu, tako da se može smatrati da se celokupna energija koja dopire do te površine reflektuje ka apsorpcionom materijalu. Intenzitet zvuka i brzina oscilovanja čestice se meri neposredno iznad mernog uzorka, u tački **M** na rastojanju x od uzorka (sl. 6.17), sondom za merenje intenziteta zvuka. Pri merenju intenziteta zvuka koristi se konfiguracija mikrofona "face to face", za koju su promene efektivnog rastojanja između mikrofona sa frekvencijom, koje prouzrokuju dodatne refleksije od konfiguracije merne sonde, najmanje. Takođe, intenzitet reflektovanih zvučnih talasa je uvek manji od intenziteta direktnih tako da se greške pri merenju minimiziraju.



Sl. 6.17 Merenje specifične akustičke impedance u anehoičnoj prostoriji [76]

Zvučni izvor se smešta iznad apsorpcionog materijala, na rastojanju koje obezbeđuje da merna tačka bude u dalekoj zoni zračenja zvučnog izvora, tako da se talasi na mestu merne tačke mogu smatrati ravnim. Zvučni izvor i merna sonda se nalaze na istoj vertikali na mernom uzorku, tako da se može govoriti o normalnoj incidenciji zvučnih talasa. Za pobudu zvučnog polja koristi se zvučni izvor čiji izlazni signal ima karakteristike belog šuma, tako da se može dobiti ceo frekvencijski spektar merenih veličina istovremeno što znatno ubrzava merni postupak.

Kako se ovakvim mernim rasporedom dobija vrednost specifične impedance u središnjoj tački između dva mikrofona merne sonde, neophodno je izvršiti korekciju izmerene veličine da bi se dobila specifična impedanca na površini materijala [59,76]. Pri normalnoj incidenciji, zvučni pritisak u tački, na rastojanju x od uzorka materijala, čine direktna i reflektovana komponenta zvučnog pritiska od materijala čiji je faktor refleksije r , tako da je zvučni pritisak:

$$\underline{p}(x) = \underline{p}_0 \left[e^{j(\omega t - kx)} + r \cdot e^{j(\omega t + kx)} \right], \quad (6.32)$$

a odgovarajuća brzina čestice :

$$\underline{v}(x) = \frac{1}{\rho c} \underline{p}_0 \left[e^{j(\omega t - kx)} - r \cdot e^{j(\omega t + kx)} \right]. \quad (6.33)$$

Specifična akustička impedanca u tački **M** je data kao:

$$\underline{Z}_{SM} = \frac{\underline{p}(x)}{\underline{v}(x)} = \rho c \frac{1 + r \cdot e^{j2kx}}{1 - r \cdot e^{j2kx}}. \quad (6.34)$$

Na osnovu jednašine (6.34) definisana je procedura merenja specifične impedance koja obuhvata merenje impedance na poziciji akustičkog centra između dva mikrofona, na osnovu koje se može odrediti kompleksni faktor refleksije. Posle korekcije njegove faze za veličinu $-2kx$, na osnovu jednačine može se odrediti specifična impedanca materijala.

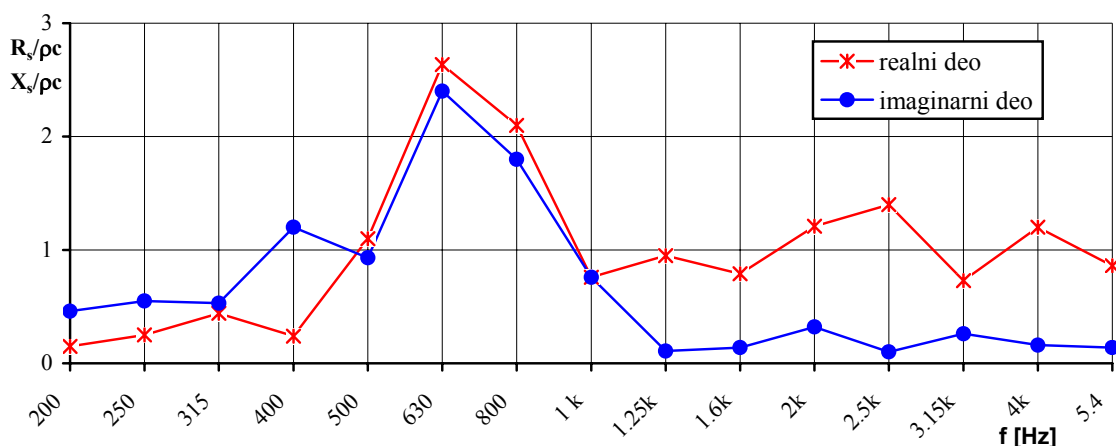
6.6.3 Eksperimentalni rezultati

Određivanje specifične impedance merenjem intenziteta zvuka, izvršeno je u uslovima koji odgovaraju slobodnom zvučnom polju, za dva merna uzorka kamene vune površine 0.5m^2 , zapreminskih gustina 50kg/m^3 i 100kg/m^3 [59,76]. Merni uzorci su smešteni na čelični lim debljine 3mm i površine 0.5m^2 , koji je bio oslonjen na čeličnu mrežu anehoične prostorije. Kao pobuda korišćen je neusmereni zvučni izvor, model B&K 4224, koji je zračio širokopojasni zvučni signal u mernom frekvencijskom opsegu. Zvučni izvor je bio okačen na kuku "plafona" anehoične prostorije, tako da se nalazio na rastojanju od 2m iznad mernog uzorka. Na taj način je bila obezbeđena normalna zvučna incidencija i postojanje ravnih zvučnih talasa na mestu mernog uzorka, za frekvencije iznad 200Hz. U tom frekvencijskom području je ispunjen uslov za postojanje ravnih talasa, da je talasna dužina manja od rastojanja merne tačke od izvora.

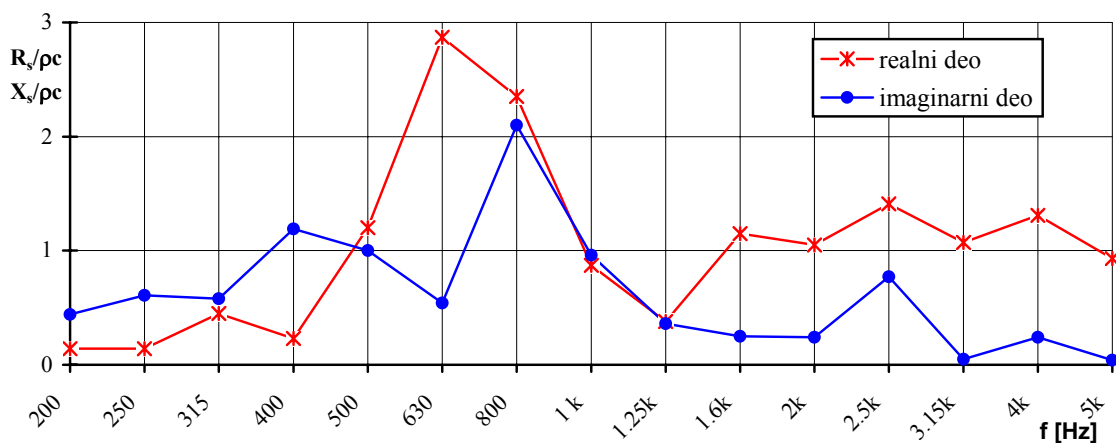
Merenje veličina potrebnih za određivanje specifične impedance, izvršeno je u mernoj tački koja se nalazila na rastojanju 10cm od mernog uzorka, na normali koja je spajala merni uzorak i zvučni izvor u ternim opsezima od 100 do 5000Hz. Merenje je vršeno mernom sondom za zvučni intenzitet, model B&K 3519, koja je bila upravno usmerena ka mernom uzorku. Radi minimiziranja grešaka pri merenju, frekvencijski opseg od 100Hz do 630Hz meren je sa umetkom od 50mm, a frekvencijski opseg od 800Hz do 5000Hz, umetkom od 12mm. Pri merenju je korišćen realno-vremenski analizator, model B&K 2144, koji je omogućavao potpuno automatizovano merenje, tako da prisistvo merioca nije bilo potrebno. Na taj način je izbegnut uticaj merioca na merenje.

Na osnovu merenja nivoa intenziteta zvuka, koji podrazumeva merenje nivoa aktivne i reaktivne komponente intenziteta, i nivoa brzine oscilovanja čestice u mernoj tački, određena je specifična impedanca u toj tački, korišćenjem relacije (6.31) a korigovanjem izmerene specifične impedance prema opisanom postupku izračunata je i specifična impedanca materijala. Uračunata je i korekcija zbog greške aproksimacije pri merenju. Fazna greška koja se čini pri merenju se može zanemariti zbog fazne karakterisitke korišćene merne sonde.

Dobijene vrednosti realnog i imaginarnog dela normalizovane specifične impedance za ispitivane uzorke neimpregirane i impregirane kamene vune prikazane su na sl. 6.18 i 6.19.



Sl. 6.18 Realni R_s i imaginarni X_s deo normalizovane specifične akustičke impedance neimpregirane kamene vune zapreminske gustine 50kg/m^3 [59,76].



Sl. 6.19 Realni R_s i imaginarni X_s deo normalizovane specifične akustičke impedance impregirane kamene vune zapreminske gustine 100kg/m^3 [59,76].

Eksperimentalni rezultati dobijeni za dva merna uzorka predloženom procedurom u anehoičnoj prostoriji ukazuju na mogućnost određivanja specifične akustičke impedance merenjem inteziteta zvuka. Predloženom procedurom mogu se minimizirati moguće greške pri merenju polazeći od osnovnih karakteristika korišćene konfiguracije mikrofona u mernoj sondi. Greška aproksimacije se može smanjiti pravilnim izborom rastavljača između mikrofona, proceniti i na osnovu toga korigovati dobije rezultate. Fazna greška se može zanemariti, jer korišćena konfiguracija mikrofona koji su fazno upareni unosi veoma malo fazno kašnjenje u odnosu na izmerene faze zvučnih signala u slobodnom zvučnom polju.

7

VALORIZACIJA NIVOVA ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE - METOD INTENZITETA ZVUKA

METODSKA OSNOVA

MERNA PROCEDURA

EKSPERIMENTALNI REZULTATI

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

7.1 METODSKA OSNOVA

Posmatrajući zračenje realnog izvora buke mogu se razlikovati nekoliko karakterističnih oblasti zvučnog polja koja zavise od udaljenosti od izvora buke. U oblasti zračenja koja se nalazi van bliskog polja izvora buke, dominiraju ravni zvučni talasi kod kojih je intenzitet zvuka direktno proporcionalan kvadratu zvučnog pritiska [53]:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}. \quad (7.1)$$

Relacija koja povezuje nivo zvučnog pritiska i nivo intenziteta zvuka kod ravnih talasa može se izvesti iz osnovnih definicija nivoa [2]:

$$L_I = L_p + 10 \log \frac{400}{\rho c}. \quad (7.2)$$

Kada se izvor buke nalazi na otvorenom prostoru, u slobodnom zvučnom polju, registrovani nivo zvučnog pritiska u određenoj tački mernim mikrofonom ili ljudskim uhom predstavlja nivo zvučnog pritiska emisije izvora koji je jednak nivou intenziteta zvuka:

$$L_I = L'_p, \quad (7.3)$$

Relacija data jednačinom (7.3) važi ukoliko je karakteristična impedanca sredine kroz koju se prostiru ravni zvučni talasi jednaka 400Ns/m^2 , što odgovara određenim kombinacijama temperature i atmosferskog pritiska (npr. prostiranje talasa kroz vazduh na temperaturi od 0°C i pri atmosferskom pritisku od 100kPa).

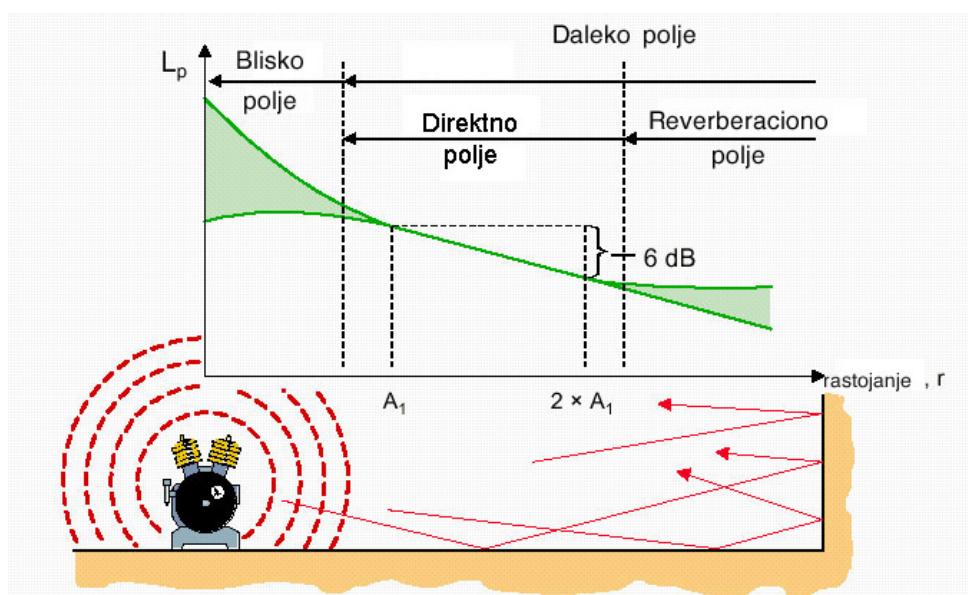
Kada se isti izvor buke smesti u prostoriju, ekvivalentne apsorpcione površine A , nivo zvučnog pritiska u određenoj tački zvučnog polja prostorije određen je nivoom zvučnog pritiska emisije i nivoom zvučne snage [82]:

$$L_p = 10 \log \left(10^{0.1L'_p} + \frac{4}{A} 10^{0.1L_w} \right). \quad (7.4)$$

Izraz predstavlja matematičku formulaciju činjenice da dva parcijalna nivoa, energetski sabrana, doprinose ukupnom nivou u prostoriji - prvi nivo je posledica direktnog zračenja izvora buke i stoga identičan sa nivoom zvučnog pritiska emisije L'_p , a drugi je posledica reflektovanja zvučnih talasa od graničnih površina prostorije i objekata u njoj i određen je zvučnom snagom izvora i apsorpcionim karakteristikama prostorije i objekata smeštenih u njoj.

Dakle, zvučno polje koje stvara izvor buke u zatvorenoj prostoriji određeno je kako direktnim zvukom koji emituje neposredno sam izvor buke, tako i reflektovanim zvukom od graničnih površina same prostorije i objekata u njoj.

Direktno zvučno polje zadržava sve akustičke informacije koje izvor buke predaje akustičkom okruženju, bez promena usled ambijentalnih uticaja. Jedine promene koje nastaju u strukturi direktnog zvučnog polja nastaju kao posledica opadanja zvučne energije zbog prostiranja talasnog fronta. Nivo energije zvučnih talasa zavisi samo od zvučne snage izvora buke i opada sa rastojanjem po linearnom zakonu - 6dB sa udvostručavanjem rastojanja od izvora buke (sl. 7.1). S obzirom na konačne dimenzije prostorije, uticaj disipacije na opadanje zvučne energije može se zanemariti.



SI. 7.1 Oblasti zračenja izvora buke smeštenog u prostoriju

U zoni direktnog zvučnog polja, gustina zvučne energije koju emituje sam izvor buke veća je od gustine energije zvučnih talasa koji nastaju reflektovanjem od graničnih površina prostorije. Na rastojanju od izvora buke koje je jednako graničnom rastojanju, R_g , izjednačava se energija direktnog zvučnog polja i energija reverberacionog polja.

Granični radijus je važna karakteristika zvučnog polja zatvorenog prostora i zavisi od apsorpcionih karakteristika prostorije definisanih akustičkom konstantom prostorije, B . Frekvencijska karakteristika graničnog radijusa može se izračunati kao [97]:

$$R_g = \sqrt{\frac{B(f)}{4\Omega}}, \quad (7.5)$$

gde je: Ω - prostorni ugao zračenja neusmerenog tačkastog izvora buke.

Akustička konstanta prostorije može se izračunati ako su poznate apsorpcione karakteristike prostorije [97]:

$$B(f) = \frac{S\bar{\alpha}(f)}{1 - \bar{\alpha}(f)}, \quad (7.6)$$

gde je: S - površina prostorije, a $\bar{\alpha}$ - srednji koeficijent apsorpcije prostorije.

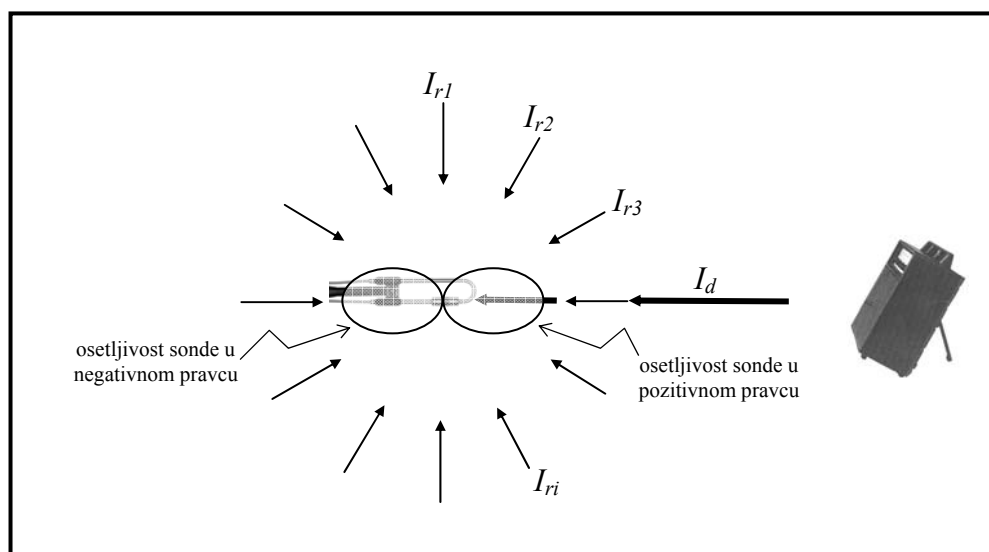
Na rastojanjima od izvora buke koja su veća od graničnog radijusa dominira druga komponenta zvučnog polja, reverberaciono polje. Reverberaciono polje čine sve ostale komponente koje do određene tačke u prostoriji stižu nakon direktnog zvuka i uključuju sve refleksije zvučnih talasa od graničnih površina prostorija, počev od prvih refleksija do reverberacije. Reflektovani zvuk sadrži takođe akustičke informacije koje emituje izvor buke, ali one pri svakoj refleksiji trpe frekvencijski zavisne energetske promene usled apsorpcije prostorije.

Nivo reflektovanog zvuka zavisi ne samo od nivoa zvučne snage izvora buke instaliranog u prostoriji, već i od karakteristika same prostorije, pre svega apsorpcionih i geometrijskih.

Kada se realni izvor buke instalira u proizvoljnu prostoriju, generiše se zvučno polje čije su karakteristike prethodno opisane. Sonda za intenzitet zvuka smeštena u neposrednoj blizini

izvora buke detektuje intenzitet zvuka u proizvoljnoj tački koji je jednak sumi intenziteta direktnog talasa koji potiče od samog izvora i intenziteta reflektovanih talasa (sl. 7.2):

$$\bar{I} = \bar{I}_d + \sum_i \bar{I}_{ri}. \quad (7.7)$$



Sl. 7.2 Ukupni registrovani intenzitet zvuka sondom za intenzitet zvuka

Postojanje višestrukih refleksija i dugo zadržavanje zvučnih talasa u prostoriji omogućava uvođenje sledećih hipoteza:

- H1:** U svakoj tački prostorije dolazi istovremeno mnoštvo talasa koji su prešli različite puteve pa samim tim imaju različite amplitude i fazne stavove.
- H2:** Svi pravci prostiranja su podjednako zastupljeni, što znači da se zvuk prostire u svim pravcima podjednakom verovatnoćom.
- H3:** Svaki talas u svom kretanju kroz prostoriju, prođe dovoljno blizu svakoj tački prostorije.

Stvaranjem uslova da u prostoriji proizvoljnog oblika važe prethodno navedene hipoteze, vektorska suma komponenti intenziteta zvuka reflektovanog talasa je bliska nuli u bilo kojoj tački:

$$\sum_i \bar{I}_{ri} \approx 0, \quad (7.8)$$

tako da je intenzitet reflektovanih talasa zanemarljiv u poređenju sa intenzitetom direktnog talasa.

U ovim uslovima mikrofonski merač nivoa detektuje direktan zvuk superponiran reflektovanim zvukom, dok sonda za intenzitet zvuka registruje samo direktan zvuk.

Na ovaj način je principijelno moguće meriti nivo zvučnog pritiska koji bi postojao u slobodnom zvučnom polju a koji odgovara nivou zvučnog pritiska emisije izvora, aproksimacijom nivoom intenziteta zvuka koji registruje merna sonda. Relacija između nivoa izmerenog intenziteta zvuka i nivoa zvučnog pritiska emisije izvedena za uslov slobodnog zvučnog polja (7.3) važi i u zatvorenom prostoru ako su ispunjene navedene hipoteze.

Merenjem intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom određuje se komponenta intenziteta zvuka u pravcu ose merne sonde. Merna sonda registruje, pored količine, i pravac

prostiranja akustičke energije. Obzirom na karakteristiku direktivnosti merne sonde u obliku osmice merna sonda će u prostoriji registrovati samo direktan talas dok će se komponente reflektovanog talasa koje dolaze iz suprotnih smerova, u odnosu na orijentaciju merne sonde, poništavati, tako da će biti zadovoljena relacija (7.8).

7.2 MERNÁ PROCEDURA

Osnovni cilj istraživačkog procesa je verifikacija definisane metodске osnove merenja nivoa zvučnog pritiska emisije u prostorijama paralelopipednog oblika, aproksimacijom komponentom intenziteta zvuka u pravcu ose dvomikrofonске merne sonde. Verifikacija podrazumeva potvrdu definisane aproksimacije i određivanje preciznosti definisane merne procedure kompariranjem sa rezultatima dobijenim standardizovanim metodama određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije izvora.

Istraživanja su sprovedena u pravcu eksperimentalnih ispitivanja uticajnih faktora na preciznost i pouzdanost predložene metode određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije dvomikrofonskom procedurom merenja intenziteta zvuka:

- dinamičko frekvencijskih karakteristika akustičke emisije izvora buke,
- direktivnosti izvora buke,
- položaja izvora buke pri ispitivanju,
- direktivnosti sonde za intenzitet zvuka,
- difuznosti i reaktivnosti zvučnog polja mernog okruženja,
- refleksije graničnih površina prostorije, i
- ponovljivosti merne procedure.

U cilju komparativne analize dobijenih rezultata metodom merenja intenziteta zvuka, eksperimentalna ispitivanja nivoa zvučne snage i nivoa zvučnog pritiska emisije sprovedena su i standardizovanim metodama zasnovanim na merenju zvučnog pritiska (serija standarda ISO 3740 i ISO 11200). Kao referentne vrednosti za poređenje uzeti su rezultati dobijeni u uslovima slobodnog zvučnog polja, u anehoičnoj prostoriji, primenom standarda za merenje zvučne snage - ISO 3745 i nivoa zvučnog pritiska emisije - ISO 11201.

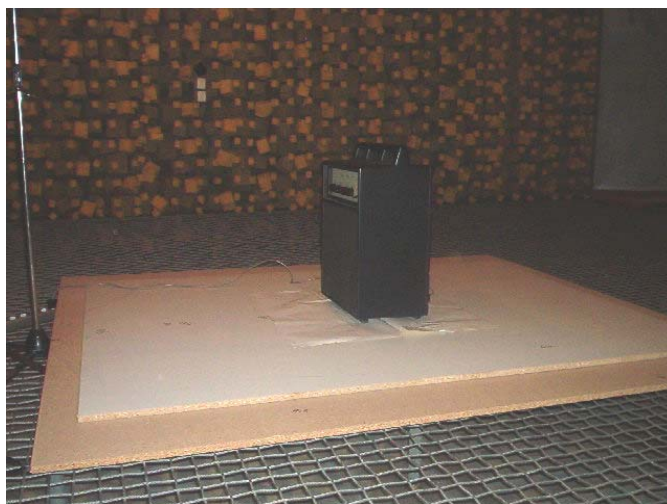
7.2.1 Merno okruženje

Merna procedura određivanja nivoa zvučne snage referentnog izvora buke i nivoa zvučnog pritiska emisije, za različite pozicije izvora buke i za različita rastojanja akustičkih pretvarača od izvora, sprovedena je u uslovima postojanja slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni koji odgovaraju poluanehoičnoj prostoriji i ponovljena u uslovima realnog zvučnog polja u prostoriji pravilnog, paralelopipednog oblika.

Uslovi slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni ostvareni su u anehoičnoj prostoriji Elektronskog fakulteta iz Niša (*u daljem tekstu MOI*), postavljanjem reflektujuće ravni od oplemenjene iverice, debljine 36mm, dimenzija 2x2m na žičani pod anehoične prostorije u centralni deo (sl. 7.3). Da bi se u prostoriji ostvarili uslovi slobodnog zvučnog polja, prostorija mora da se dobro izoluje od spoljne buke i da se omogući nesmetano prostiranje zvučnih talasa, odnosno da ne postoje nikakve prepreke pri prostiranju.

U anehoičnoj prostoriji Elektronskog fakulteta iz Niša izolacija od spoljne buke postignuta je izgradnjom prostorije sagrađena po sistemu "*prostorija u prostoriji*", između kojih nema nikakve krute veze, sa zidovima od armiranog betona različite debljine [60]. Dimenzije unutrašnjeg prostora, između slojeva apsorpcionog materijala, su 6.95x7x6.9m, tako da je

korisna zapremina 336m^3 . Nesmetano prostiranje zvučnih talasa, bez refleksija, ostvareno je izgradnjom apsorpcionog zida debljine 1.5m u dva sloja. Prvi sloj predstavljaju ploče od mineralne vune debljine 5cm, različite širine, a postavljene su jedna uz drugu normalno na betonski zid. Drugi deo čini veštačka zavesa od apsorpcionih kocki, koja je smeštena ispred ovih ploča. Kocke su nanizane na čeličnu užad.



Sl. 7.3 Postavljanje reflektujuće ravni u anehoičnu prostoriju

Predviđena granična frekvencija prostorije je 50 Hz [60]. Kada u anehoičnoj prostoriji nema zvučnih izvora, izmeren je nivo buke od 11dB(A), a prilikom uključene ventilacije ovaj nivo je 13 dB(A). Frekvencijska analiza nivoa buke pokazuje da su frekvencijske komponente na višim frekvencijama ispod praga čujnosti [60].

U toku sprovođenja merne procedure, u prostoriji su vladali sledeći ambijentalni uslovi i na osnovu njih je izvršena kalibracija mernog sistema:

- temperatura vazduha: 24°C,
- relativna vlažnost: 45%,
- atmosferski pritisak: 980hPa.

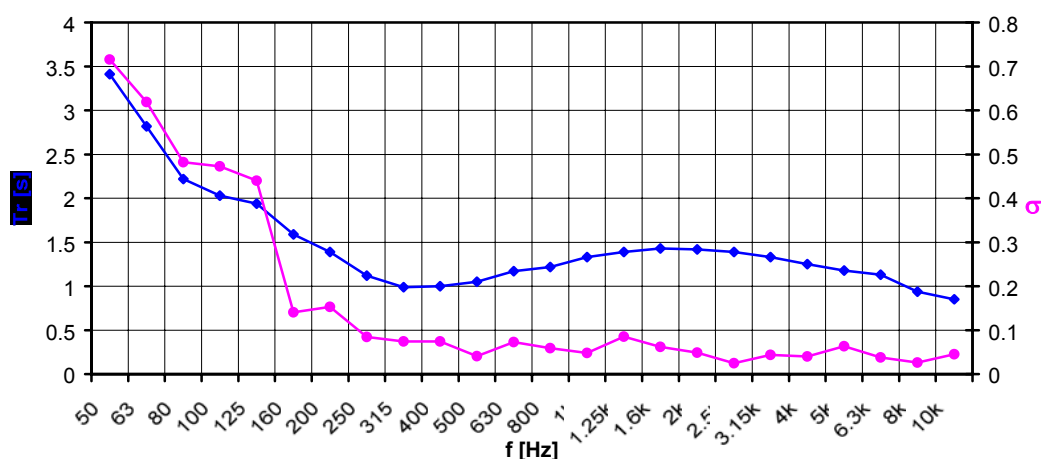
Ispitivanja u uslovima realnog zvučnog polja sprovedena su u nastavnoj učionici Laboratorije za buku i vibracije Fakulteta zaštite na radu (*u daljem tekstu MO2*), prostoriji pravilnog, paralelopipednog oblika, dimenzija 8.3x7.3x2.9m. Akustičke osobine prostorije određene su merenjem vremena reverberacije i pozadinske buke.

Vreme reverberacije je određeno sa dve pozicije referentnog izvora i po pet različitih prostornih pozicija mernih mikrofona po svakoj poziciji izvora. Pozicije mernih mikrofona na visini 1.6m ravnomerno su raspoređene po površini prostorije i svaki položaj mikrofona udaljen je od graničnih površina prostorije najmanje 1m. Kao metod merenja korišćena je merna procedura - rezultat istraživanja u Laboratoriji za buku i vibracije u oblasti merenja vremena reverberacije [78]. Procedura podrazumeva isključivanje referentnog izvora i snimanje krivih opadanja nivoa zvuka dvokanalnim frekvencijskim analizatorom u realnom vremenu, sa parametrima koji omogućuju praćenje pune dinamike opadanja nivoa zvuka u prostoriji i dobijanje dovoljne rezolucije za opisivanje vremenskih promena posmatranog signala. Pri tome korišćeni su sledeći merni parametri:

- ukupan broj uzoraka - 150,
- broj uzoraka pre isključenja izvora zvuka - 30,
- vreme uzorkovanja - 0.01s.

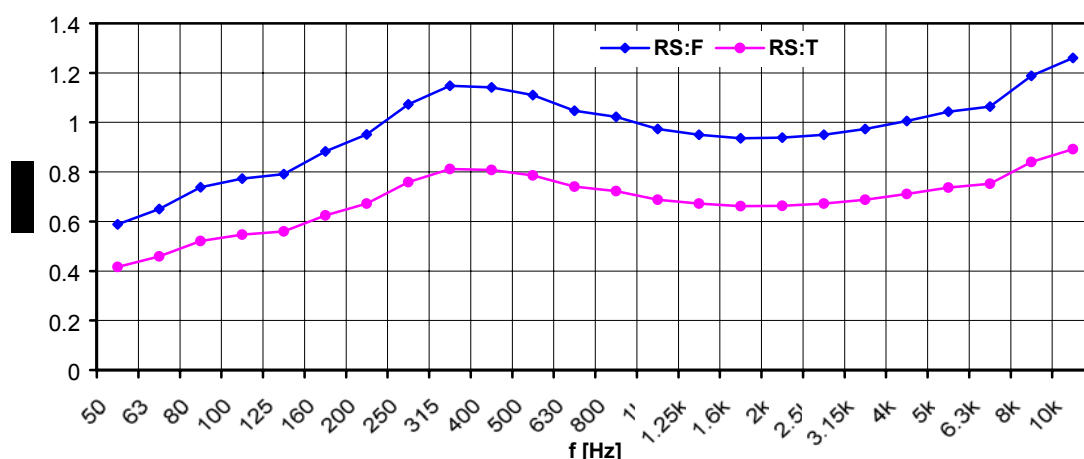
Snimanjem većeg broja krivih opadanja energije, sa različitim pozicijama izvora i mikrofona umanjen je problem stohastičkog karaktera zvučnog polja koji generiše referentni izvor, kao i pojava interferencije između pojedinih sopstvenih modova prostorije, posebno na niskim frekvencijama gde je broj tih modova relativno veliki. Usrednjavanjem skupa dobijenih krivih, postiže se da rezultujuća kriva bude relativno glatka, tako da se pomoću nje sa većom pouzdanošću može odrediti vreme reverberacije.

Rezultati merenja vremena reverberacije prostorije primenom tercnih filtera u opsegu od 50Hz do 10kHz, za sve pozicije referentnog izvora i pozicije mernog mikrofona, prikazani su u prilogu C, tabela C.1. U istoj tabeli prikazani su i rezultati određivanja vremena reverberacije na osnovu rezultujuće krive opadanja, kao i vrednosti standardne devijacije i varijanse dobijenih rezultata. Usrednjene vrednosti vremena reverberacije, zajedno sa standardnom devijacijom rezultata, prikazani su na sl. 7.4.



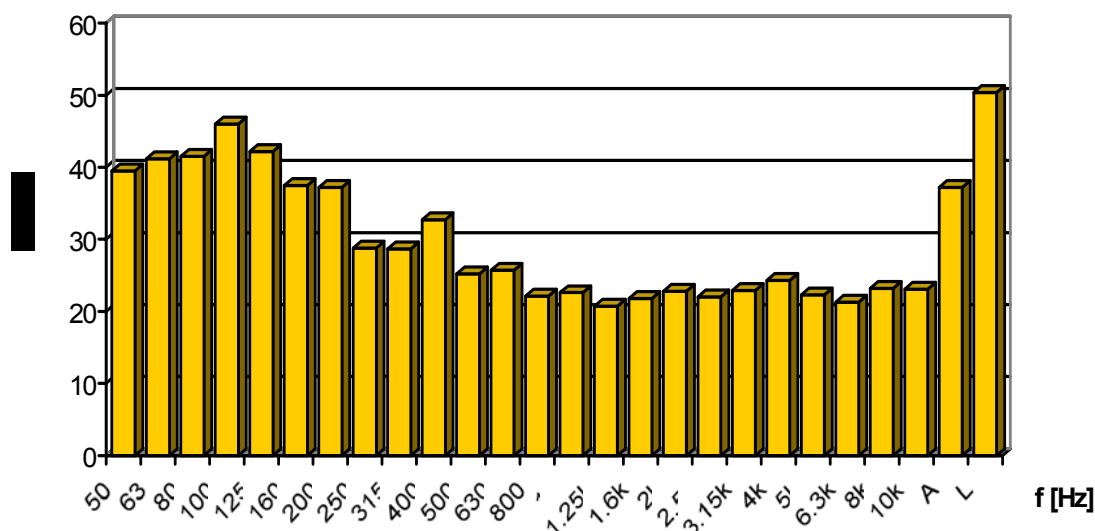
Sl. 7.4 Vreme reverberacije mernog okruženja MO2 sa standardnom devijacijom izmerenih rezultata

Na osnovu izmernog vremena reverberacije prostorije primenom jednačina (7.5) i (7.6) izračunat je granični radijus koji ograničava zonu direktnog zračenja referentnog izvora. Dobijene vrednosti za obe pozicije referentnog izvora, na podu prostorije (u daljem tekstu RS:F) i na postolju visine 0.8m (u daljem tekstu RS:T), prikazane su na sl. 7.5.



Sl. 7.5 Granični radijus mernog okruženja MO2

U toku merne procedure određivanja nivoa zvučne snage i nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora, u mernom okruženju MO2 nije bilo dodatnih izvora buke. Izmereni pozadinski nivo buke u prostoriji (sl. 7.6), posledica je uticaja spoljašnje, komunalne buke u neposrednoj okolini prostorije.



Sl. 7.6 Pozadinski nivo buke u mernom okruženju MO2

7.2.2 Merna oprema

Izvođenje merne procedure realizovano je mernim lancem kojeg čini merna oprema danskog proizvođača Brüel&Kjær:

- dvokanalni frekvencijski analizator u realnom vremenu, model 2144,
- referentni izvor zvuka, model 4224,
- sonda za intenzitet zvuka, model 3519,
- kondenzatorski mikrofon, model 4191, sa pretpojačavačem, model 2669, i
- kalibrator nivoa intenziteta zvuka, model 3541 koji sadrži pistonfon, model 4228, za kalibraciju nivoa zvučnog pritiska.

U toku merne procedure kao pretvarači korišćeni su za intenzitet zvuka - sonda za merenje intenziteta zvuka a za zvučni pritisak i vreme reverberacije - kondenzatorski mikrofon.

Za pobudu zvučnog polja pri svim merenjima, kao izvor buke, korišćen je referentni izvor u uslovima:

- kada emituje signal čije dinamičko-frekvencijske karakteristike u opsegu frekvencija od 100Hz do 4kHz odgovaraju karakteristikama ružičastog šuma - spektar zvučne snage opada približno 3dB po oktavi - u daljem tekstu spektar 1,
- kada emituje signal čije dinamičko-frekvencijske karakteristike obezbeđuju da spektar zvučne snage u opsegu frekvencija od 125Hz do 4kHz opada približno 10dB po oktavi - u daljem tekstu spektar 2.

Frekvencijske karakteristike zvučne snage za obe vrste emitovanih signala pri maksimalnom opterećenju, uzete iz kataloga proizvođača, prikazani su u prilogu C, tabela C.2.

Referentni izvor ima mogućnost kontinulane i skokovite promene, u koracima od 10dB, slabljenja izlaznog signala. U cilju obezbeđenja režima rada izvora u kome nije preopterećen, pri merenjima izlazni signal referentnog izvora je dodatno oslabljen za 15dB.

Frekvencijski analizator, model 2144, je dvokanalni prenosni analizator za akustička i elektroakustička merenja. Pored mogućnosti jednokanalne analize, ima mogućnost i istovremene dvokanalne analize u realnom vremenu. Mogućnost merenja intenziteta, koja

uključuje merenje aktivne i reaktivne komponente intenziteta, brzine oscilovanja čestica, koherence signala i unakrsnog spektra, uveliko proširuje polje primene analizatora.

Analizator radi u realnom vremenu, kada analizira signal u oktavnim i tercnim opsezima. Glavne njegove prednosti, koje proističu iz upotrebe rekurzivnih digitalnih filtera, su veći dinamički opseg u odnosu na prethodne analizatore od 80 dB i niža donja granična frekvencija od 0.3 Hz. Nudi izbor između linearnog i eksponencijalnog usrednjavanja; ima veliku unutrašnju memoriju što mu omogućava memorisanje spektara sa brzinom i do 1000 spektara u sekundi. Ugrađeni disk drajv mu proširuje mogućnosti u pogledu čuvanja rezultata.

Za merenje intenziteta zvuka koristi se sonda za merenje intenziteta, model 3519. Sastoji se iz okvira koji drži dva fazno uparena mikrofona, model 4181, na tačno određenom rastojanju. Rastojanje se definiše pomoću kompaktnog umetka određene dužine.

7.3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI ISTRAŽIVAČKOG PROCESA

7.3.1 Dinamičko-frekvencijski opseg mernog lanca

Korišćenje dvomikrofonske tehnike merenja intenziteta zvuka u mernoj proceduri ograničava dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja, zbog težnje da se pri merenju minimiziraju sistematske greške merenja, pre svega fazna greška na nižim frekvencijama i greška aproksimacije na višim frekvencijama.

Zato je neophodno, pre sprovođenja merne procedure, kalibracijom merne opreme odrediti dinamičko-frekvencijski opseg izabranog mernog lanca u kome je normalizovana greška manja od ± 0.25 , odnosno apsolutna greška manja od ± 1 dB.

Dinamički opseg mernog lanca L_d određen je njegovim rezidualnim indeksom reaktivnosti, δ_{pl0} , i definiše se kao:

$$L_d = \delta_{pl0} - 7. \quad (7.9)$$

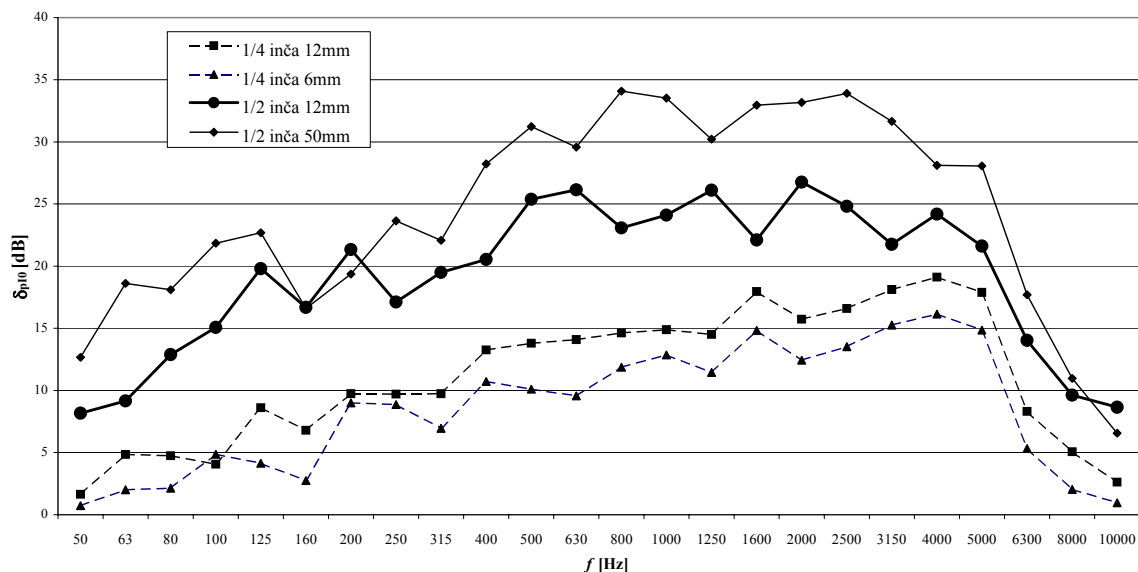
Rezidualni indeks reaktivnosti mernog lanca određen primenom zvučnog izvora ZI 0055 koji se postavlja u gornji otvor komore kalibratora za intenzitet zvuka. Zvučni izvor emituje pseudoslučajni signal čije spektralne karakteristike odgovaraju ružičastom šumu. U bočne otvore komore, specijalno konstruisane da ne unosi dodatno fazno kašnjenje, postavljaju se mikrofoni merne sonde i frekvencijskim analizatorom usrednjavanjem signala meri se nivo zvučnog pritiska i intenziteta zvuka u komori u trajanju od 300s. Duže vreme usrednjavanja je potrebno da bi se nivoi u komori stabilizovali.

Razlika nivoa zvučnog pritiska i nivoa intenziteta zvuka u komori definiše rezidualni indeks reaktivnosti mernog lanca koji je određen za sledeće konfiguracije merne sonde:

- $\frac{1}{2}$ "-mikrofoni na međusobnom rastojanju 12 i 50mm, i
- $\frac{1}{4}$ "-mikrofoni na međusobnom rastojanju 6 i 12mm.

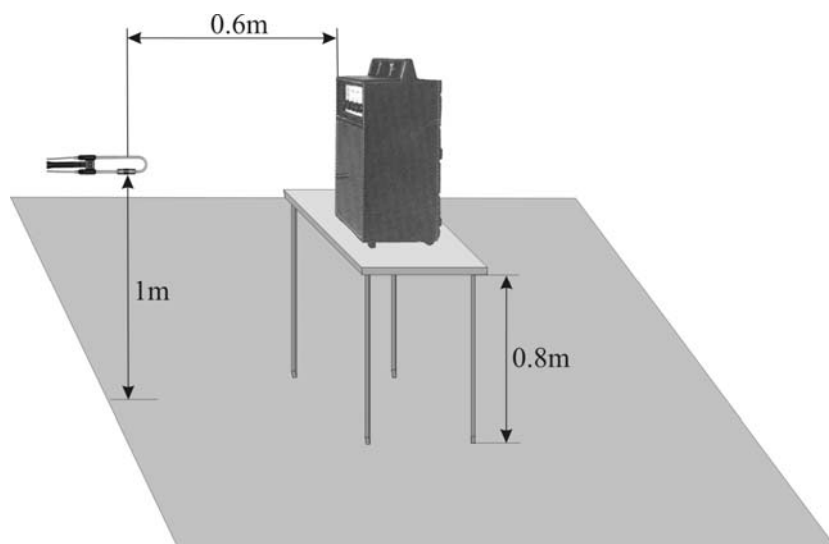
Tabelarni rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska i intenziteta zvuka u komori kalibratora za intenzitet zvuka, za različite konfiguracije, zajedno sa određenim rezidualnim indeksom reaktivnosti dati su u prilogu C, tabela C.3. Frekvencijski spektri rezidualnog indeksa reaktivnosti mernog lanca prikazani su na sl. 7.7.

Provera prikazane teorijske analize i numeričkih rezultata u istraživanju proširenja frekvencijskog opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka u poglavlju 5.4, izvršena je serijom eksperimentalnih merenja nivoa intenziteta zvuka, u mernom okruženju MO2.



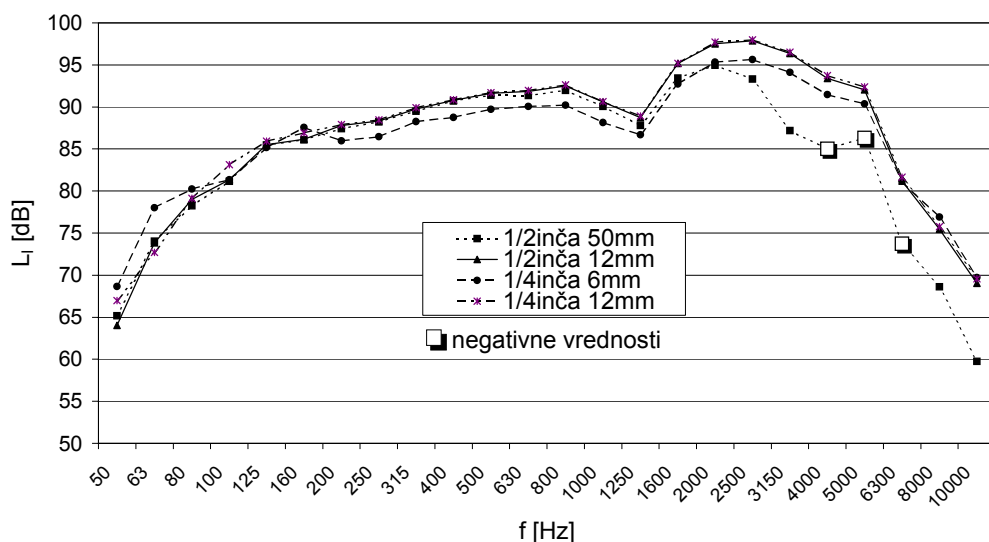
Sl. 7.7 Rezidualni indeks reaktivnosti mernog lanca za različite konfiguracije sonde [65]

U proceduri merenja intenziteta zvuka, referentni izvor je emitovao signal tipa ružičastog šuma, u opsegu frekvencija od 100Hz do 4kHz i njegov izlazni signal je bio oslabljen za 15, odnosno 25 dB. Postavljen je u centralnom delu prostorije, na postolju visine 0.8m. Merna sonda za intenzitet zvuka normalno je usmerena ka referentnom izvoru, pozicionirana na rastojanju 60cm od izvora i na visini od 1.0m u odnosu na pod prostorije (sl. 7.8). Za merenje je korišćena merna sonda sa 1/2"- kondenzatorskim mikrofonom, model B&K 4181 i 1/4"- kondenzatorskim mikrofonom, model B&K 4178. Merenje sa 1/2"- mikrofonom izvršeno je sa kompaktnim umetkom dužine 12mm (referentna konfiguracija za opseg od 31.5Hz do 1.25kHz) i 50mm (referentna konfiguracija za opseg od 125Hz do 5kHz), dok su za 1/4"- mikrofone korišćeni umetci dužine 6mm (referentna konfiguracija za opseg od 125Hz do 5kHz) i 12mm (referentna konfiguracija za opseg od 250Hz do 10kHz).

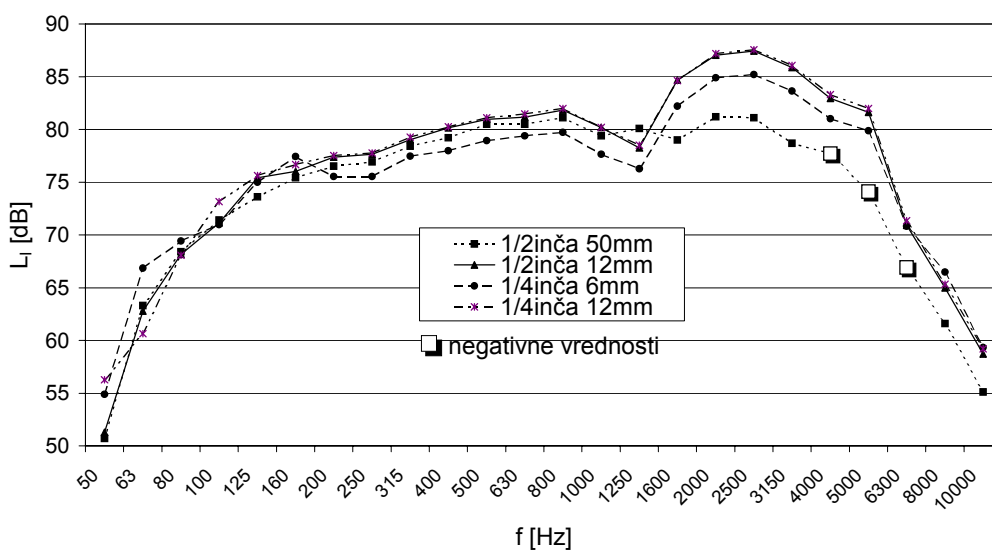


Sl. 7.8 Pozicije izvora i merne sonde u proceduri provere frekvencijskog opsega pouzdanog merenja mernog lanca

Merenje intenziteta zvuka na definisanoj poziciji merne sonde, pri istim uslovima za sve četiri konfiguracije merne sonde, izvršeno je za slučaj slabljenja izlaznog signala izvora zvuka od 15dB, odnosno 25dB a dobijeni rezultati su prikazani na sl. 7.9.



(a)



(b)

Sl. 7.9 Intenzitet zvuka na rastojanju 60cm od referentnog izvora (a) slabljenje izlaznog signala izvora - 15dB; (b) slabljenje izlaznog signala izvora - 25dB [65]

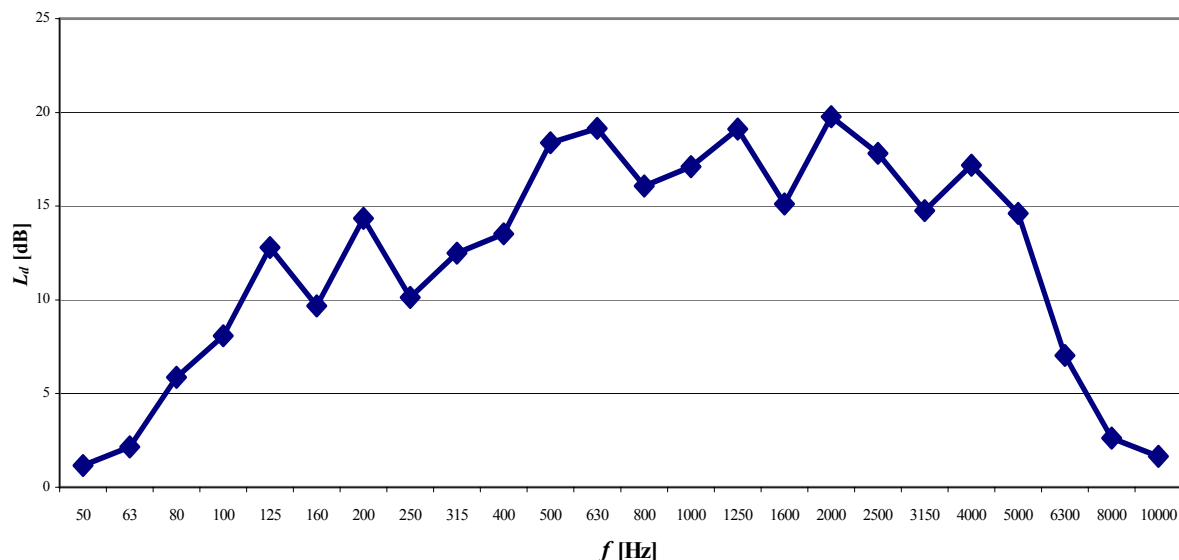
Prikazani rezultati pokazuju dobijeni različitim kombinacijama veličine mikrofona i njihovog međusobnog rastojanja prilično se slažu u frekvencijskom opsegu od 50Hz do 1.25kHz. Slaganje rezultata je posledica kompenzacije fazne greške na niskim frekvencijama na osnovu unapred određenog rezidualnog indeksa reaktivnosti mernog lanca.

Iznad frekvencije od 1.25kHz značajna odstupanja pokazuju merenja intenziteta zvuka $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima na međusobnom rastojanju 50mm, što je posledica greške aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom.

Rezultati merenja intenziteta zvuka $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima na međusobnom rastojanju 12mm pokazuju dobro slaganje sa merenjima referentnim konfiguracijama merne sonde za određene frekvencijske opsege. Označena konfiguracija može pokriti frekvencijski opseg od 50Hz do 10kHz, a da greška merenja bude u opsegu ± 1 dB.

Eksperimentalni rezultati dobijeni u seriji merenja nivoa zvučnog pritiska emisije izvora metodom intenziteta zvuka pokazuju da je moguće merenje nivoa zvučnog pritiska emisije metodom intenziteta zvuka jednom konfiguracijom merne sonde. Iz navedenih razloga u daljoj mernoj proceduri korišćiće se samo konfiguracija $\frac{1}{2}$ "-mikrofona sa umetkom od 12mm.

Dinamički opseg izabrane konfiguracije određen na osnovu rezidualnog indeksa reaktivnosti mernog lanca i jednačine (7.9) prikazan je na sl. 7.10.



Sl. 7.10 Dinamički opseg pouzdanog merenja mernog lanca

7.3.2 Određivanje nivoa zvučne snage referentnog izvora

Akustička emisija referentnog izvora, izražena preko zvučne snage, određena je serijom merenja u uslovima mernih okruženja MO1 i MO2. Nivo zvučne snage određen je pri slabljenju izlaznog signala referentnog izvora identičnim kao pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije.

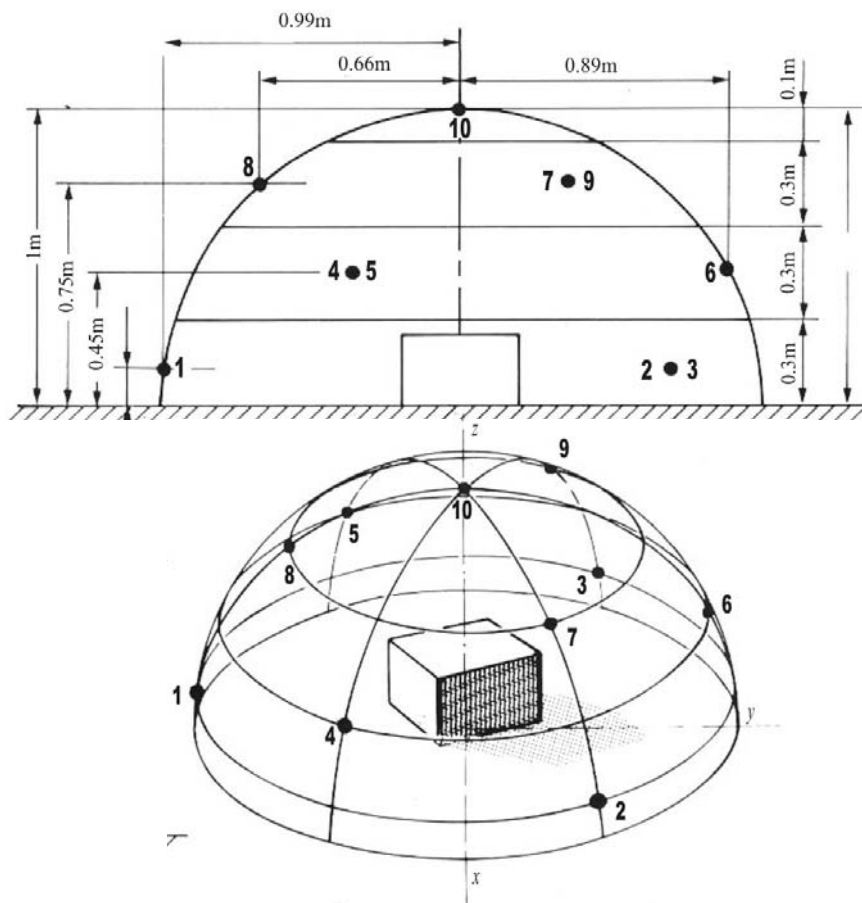
Nivo zvučne snage određen je u frekventijskom opsegu od 50Hz od 10kHz primenom terčnih filtera, pod različitim mernim uslovima i primenom sledećih metoda:

- određivanje zvučne snage na osnovu merenja zvučnog pritiska u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni, u skladu sa preporukama ISO 3745 [31],
- određivanje zvučne snage na osnovu merenja intenziteta zvuka u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni u skladu sa preporukama ISO 9614-1 [34],
- određivanje zvučne snage na osnovu merenja intenziteta zvuka u uslovima realnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni, u skladu sa preporukama ISO 9614-1.

Merenje nivoa zvučnog pritiska i nivoa intenziteta zvuka izvršeno je na mernoj površini oblika polusfere, poluprečnika $r = 1\text{m}$, u 10 diskretnih mernih tačaka distribuiranih na mernoj površini tako da se nalaze u centrima segmenata jednake površine (sl. 7.11).

Pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora u skladu sa preporukama ISO 3745, izvršeno je merenje nivoa zvučnog pritiska u definisanim mernim tačkama, frekventijskim analizatorom i kondenzatorskim mikrofonom. Rezultati merenja frekventijskih spektara nivoa zvučnog pritiska u svim definisanim mernim tačkama merne površine, u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni, dati su u prilogu C - tabela C4 (spektar1) i tabela C7 (spektar 2). U istim tabelama prikazani su i rezultati frekventijskog spektra nivoa zvučne snage referentnog izvora, određeni na osnovu prostorno usrednjene vrednosti nivoa zvučnog pritiska i korekcije merne površine [31]:

$$L_W = \bar{L}_p + 10 \log(2\pi r^2). \quad (7.10)$$



Sl. 7.11 Distribucija mernih pozicija na mernoj površini pri određivanju zvučne snage referentnog izvora [31]

Pri određivanju zvučne snage merenjem intenziteta zvuka u diskretnim mernim tačkama, prethodno je određeno vreme usrednjavanja mernih veličina, tako da vremenska promenljivost zvučnog polja izražena preko indikatora F_1 , zadovolji relaciju (6.5). Merenjem nivoa intenziteta zvuka na proizvoljno izabranoj mernoj poziciji, sa promenljivim vremenima usrednjavanja, utvrđeno je da je zahtevani kriterijum zadovoljen za vreme usrednjavanja:

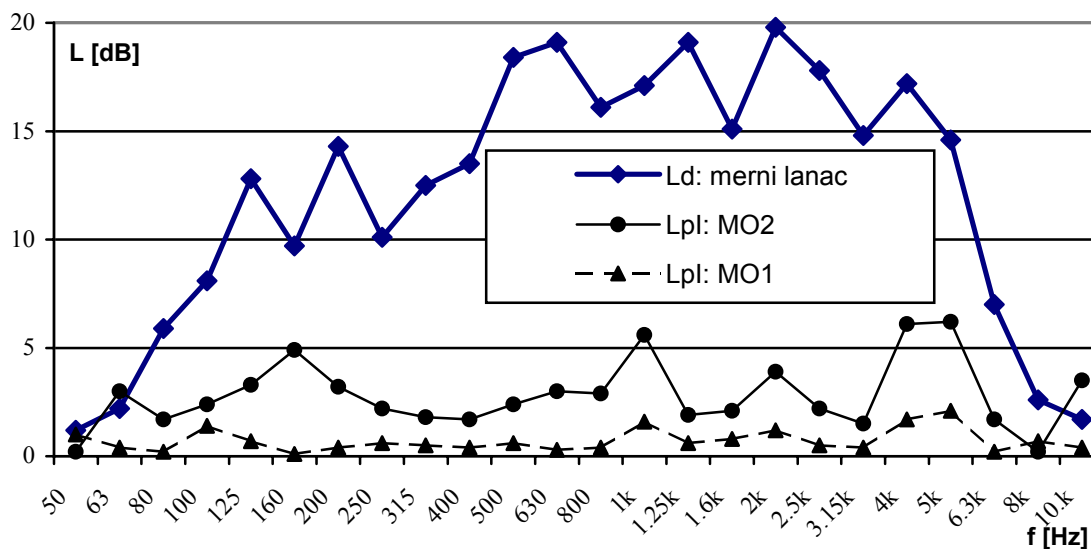
$$T_{avg} = \begin{cases} 15s: & \text{slobodno zv. polje} \\ 20s: & \text{realno zv. polje} \end{cases}$$

Definisana vremena usrednjavanja zadržana su u toku sprovođenja kompletne merne procedure određivanja nivoa zvučne snage i nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora.

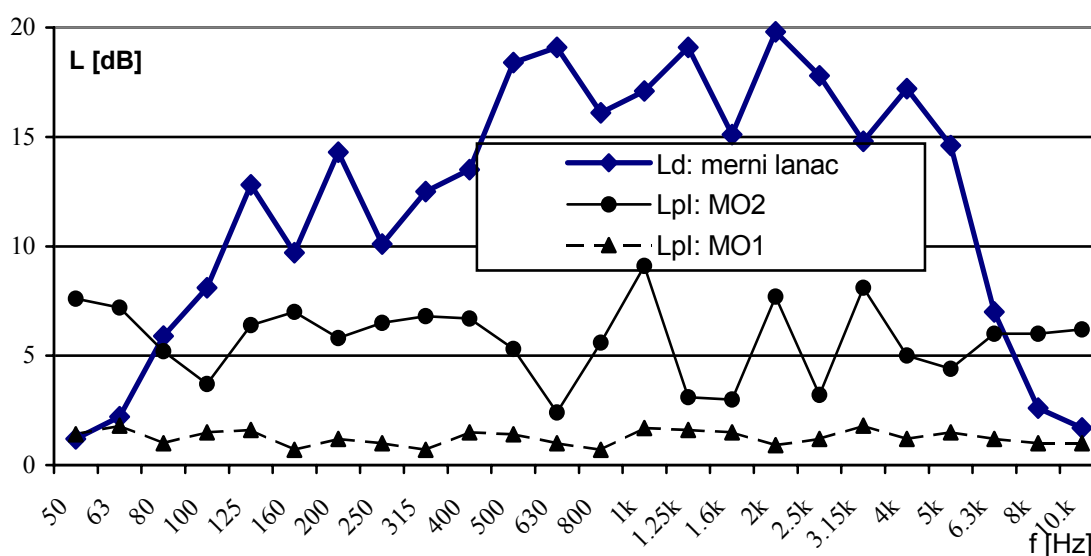
Mernom sondom za intenzitet zvuka izvršeno je merenje nivoa zvučnog pritiska i nivoa intenziteta zvuka u svim definisanim mernim tačkama. Rezultati merenja frekvencijskih spektara intenziteta zvuka dati su u prilogu C - tabela C.5 (spektar 1: MO1), tabela C.6 (spektar 1: MO2), tabela C.8 (spektar 2: MO1) i tabela C.9 (spektar 2: MO2). U istim tabelama prikazane su prostorno usrednjene vrednosti nivoa zvučnog pritiska, \bar{L}_p , i nivoa intenziteta zvuka, \bar{L}_I , kao i vrednosti nivoa zvučne snage određene na osnovu prostorno usrednjenih vrednosti nivoa intenziteta zvuka i korekcije merne površine [34]:

$$L_w = \bar{L}_I + 10 \log(2\pi r^2) \quad (7.11)$$

Indeks reaktivnosti zvučnog polja, izražen preko indikatora zvučnog polja F_2 , nalazi se iz razlike prostorno usrednjenih vrednosti nivoa zvučnog pritiska i intenziteta zvuka za svih 10 mernih tačaka. Da bi rezultati određivanja nivoa zvučne snage bili pouzdani, vrednosti indikatora zvučnog polja treba da budu manje od dinamičkog opsega mernog lanca u svim frekvencijskim opsezima. Indeks reaktivnosti zvučnog polja u slobodnom i realnom zvučnom polju, kompariran sa vrednostima dinamičkog opsega mernog lanca, prikazan je na sl. 7.12 za uslov kada referentni izvor emituje signal čije karakteristike odgovaraju - (a) spektru 1 i (b) spektru 2.



a)



b)

SI. 7.12 Indeks reaktivnosti zvučnog polja kompariran sa vrednostima dinamičkog opsega pouzdanog merenja mernog lanca: a) spektar 1 b) spektar 2

Vrednosti ukupnog nivoa zvučne snage referentnog izvora, određene primenjenim metodama, prikazane su u tabeli 7.1. U istoj tabeli prikazane su i vrednosti indikatora zvučnog polja određeni u mernoj proceduri. Frekvencijski spektri zvučne snage međusobno su komparirani na sl. 7.13 (spektar 1) i 7.14 (spektar 2).

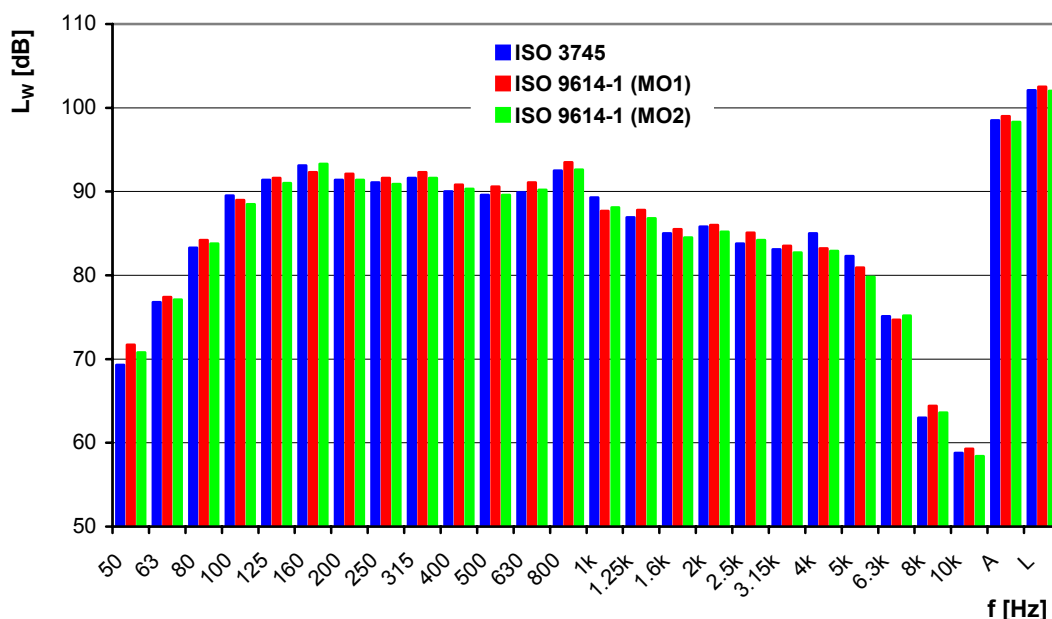
Tabela 7.1 Ukupni nivoi zvučne snage referentnog izvora sa indikatorima zvučnog polja

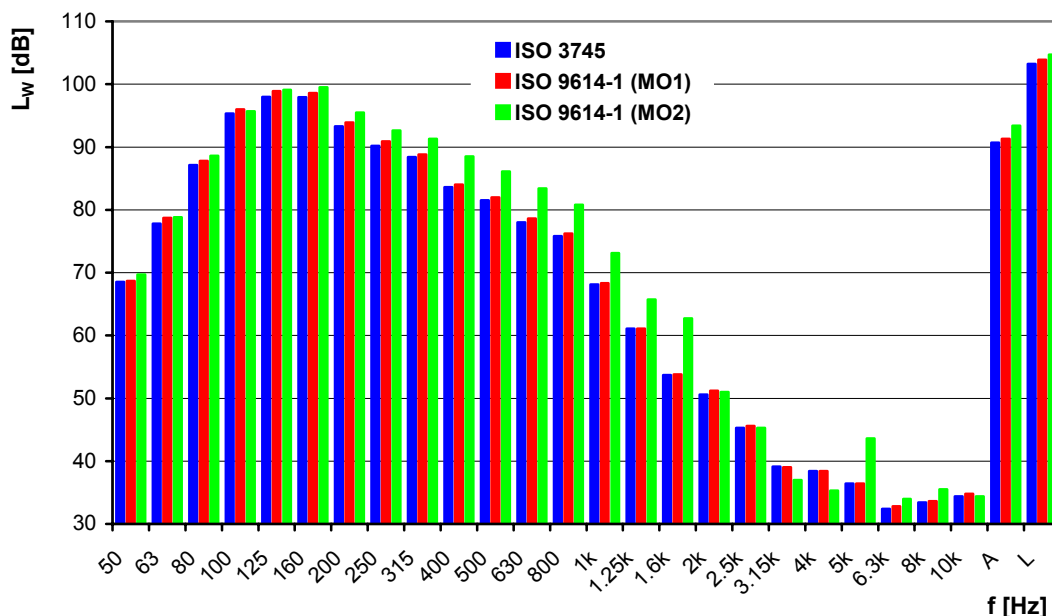
tip spektra	ISO 3745		ISO 9614-1: MO1					ISO 9614-1: MO2				
	L_W [dB]	L_W [dB(A)]	F_1	F_2	F_3-F_2	L_W [dB]	L_W [dB(A)]	F_1	F_2	F_3-F_2	L_W [dB]	L_W [dB(A)]
spektar 1	102.1	98.5	0.15	0.7	0	102.0	98.3	0.23	1.2	0	102.5	99.0
spektar 2	103.2	90.7	0.38	1.1	0	103.9	91.3	0.49	6.3	2.4	104.7	93.4

Indikator prisutva negativne parcijalne zvučne snage u mernom okruženju MO1 u svim opsezima i za oba oblika spektra ima vrednost $F_3 = F_2$, što ukazuje da nije bilo jako usmerenih spoljašnjih izvora buke u neposrednoj okolini ispitivanog referentnog izvora. Isto važi i za slučaj mernog okruženja MO2, kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 1.

Kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 1, dobijeni rezultati nivoa zvučne snage u proceduri kompariranja pokazuju visoku saglasnost vrednosti dobijenih merenjem intenziteta zvuka u oba merna okruženja sa vrednostima dobijenim metodom zvučnog pritiska u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni. Visoka saglasnost rezultata dobijena je i primenom metode zvučnog pritiska i intenziteta zvuka u mernom okruženju MO1, kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 2.

Kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 2, prisustvo pozadinske buke na višim frekvencijama u mernom okruženju MO2 ima uticaja na merenje intenziteta zvuka, tako da se u određenim frekvencijskim opsezima i tačkama dobijaju negativne vrednosti intenziteta zvuka, što ukazuje na prisustvo spoljašnjeg izvora buke. Razlika indikatora $F_3 - F_2$ ima vrednost 2.4, tako da se ne moraju, prema ISO 9614-1, preduzimati mere za eliminaciju uticaja spoljašnje buke, ali se preciznost metode smanjuje. Vrednosti ukupnog A-ponderisanog nivoa zvučne snage, određene u uslovima mernog okruženja MO2, odstupaju za 2.1dB(A) u odnosu na merno okruženje MO1, dok je razlika ukupnog linearnog nivoa zvučne snage 0.8dB.

**Sl. 7.13** Nivo zvučne snage referentnog izvora - spektar 1



Sl. 7.14 Nivo zvučne snage referentnog izvora - spektar 2

7.3.3 Određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora

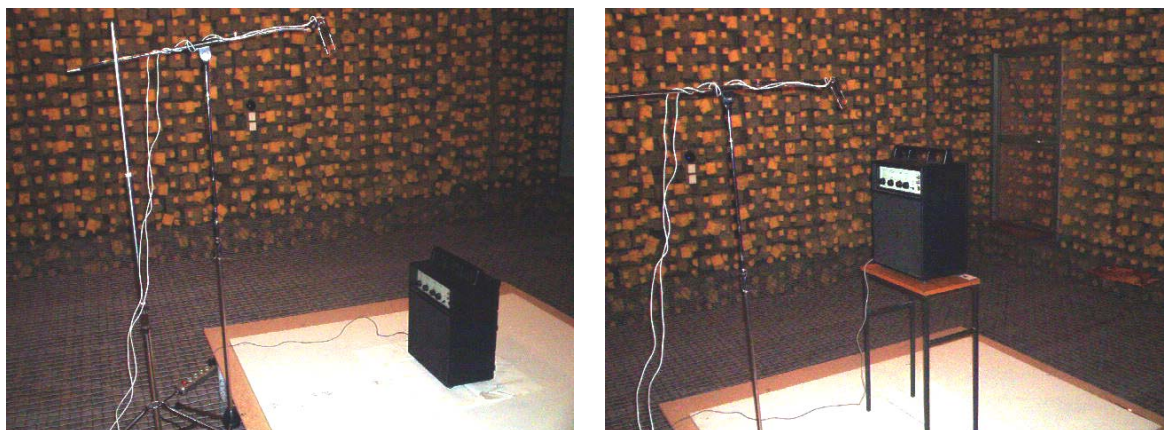
Nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora, kao komplemetarna veličina nivou zvučne snage koja se koristi za definisanje akustičke emisije izvora buke, određen je serijom merenja u uslovima mernog okruženja MO1 i MO2.

Nivo zvučnog pritiska emisije određen je u frekvencijskom opsegu od 50Hz do 10kHz, primenom terčnih filtera, primenom sledećih metoda:

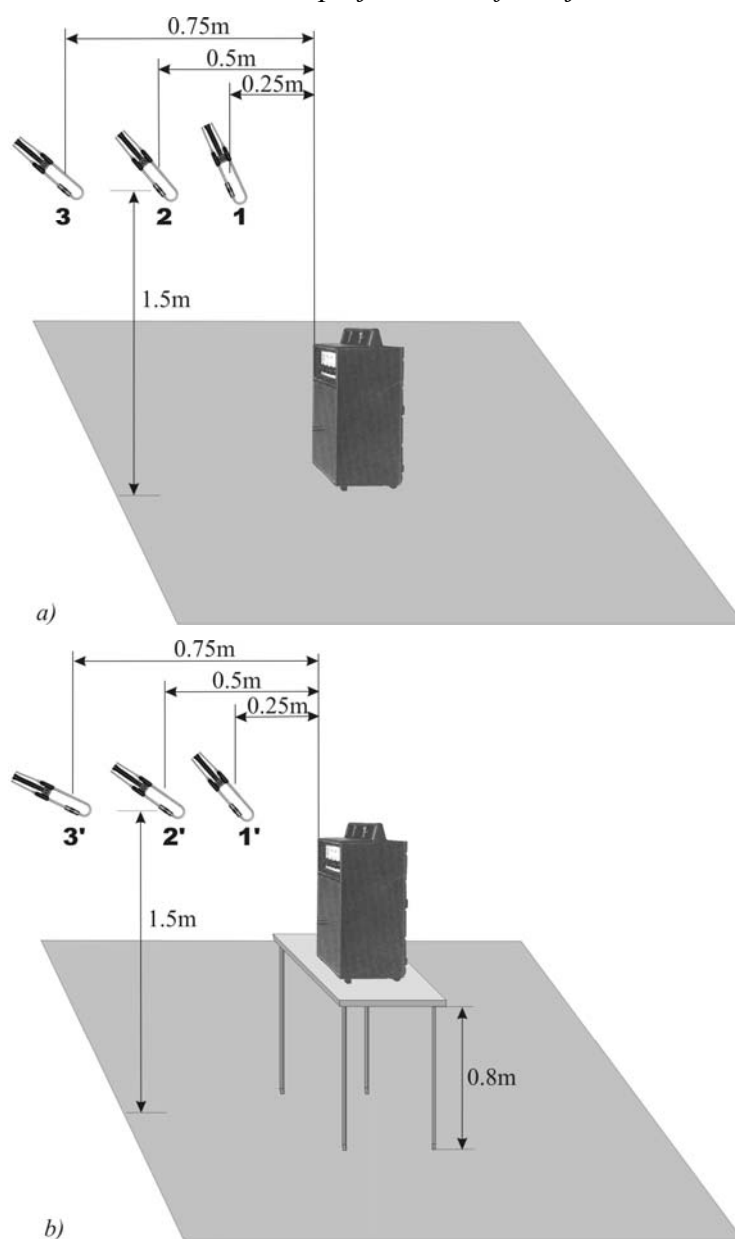
- merenjem zvučnog pritiska u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni u poluanehoičnoj prostoriji (merno okruženje MO1), u skladu sa preporukama ISO 11201,
- merenjem zvučnog pritiska u uslovima realnog zvučnog polja u paralelopipednoj prostoriji (merno okruženje MO2), u skladu sa preporukama ISO 11202,
- merenjem intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom u oba merna okruženja.

Eksperimentalno istraživanje uticajnih faktora na preciznost i pouzdanost predložene metode određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije dvomikrofonskom procedurom merenja intenziteta zvuka, sprovedeno je u pravcu određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije za slučaj kada se referentni izvor nalazi na podu prostorije, odnosno na reflektujućoj površini (RS:F), i za slučaj kada se nalazi na postolju visine 0.8m (RS:T). Položaji referentnog izvora prikazani je na sl. 7.15.

Merenje nivoa zvučnog pritiska i nivoa intenziteta zvuka izvršeno je u istim mernim tačkama, na visini 1.5m, na rastojanjima od referentnog izvora: 0.25m, 0.5m i 0.75m, sa orijentacijom mernog mikrofona i merne sonde ka centru referentnog izvora. Na sl. 7.16 prikazane su pozicije mernih tačaka za oba položaja referentnog izvora. Rastojanja mernih tačaka od akustičog centra referentnog izvora data su tabeli 7.2. Izračunata rastojanja definišu poziciju mernih tačaka u odnosu na direktnu i reverberacionu zonu zračenja referentnog izvora.



Sl. 7.15 Položaj referentnog izvora pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije u slobodnom zvučnom polju iznad reflektujuće ravni



Sl. 7.16 Merne pozicije pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije
a) referentni izvor na podu (RS:F); b) referentni izvor na postolju (RS:T);

Tabela 7.2 Rastojanje mernih tačaka od akustičkog centra referentnog izvora

	RS:F			RS:T		
	1	2	3	1'	2'	3'
r [m]	1.32	1.39	1.50	0.56	0.71	0.90

7.3.3.1 Merenje u slobodnom zvučnom polju iznad reflektujuće ravni

Komparacija rezultata merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora merenjem intenziteta zvuka podrazumeva definisanje referentnog merenja. S obzirom na preciznost postojećih mernih metoda, za referentno merenje uzeto je merenje nivoa zvučnog pritiska emisije u skladu sa preporukama ISO 11201, u akustičkom okruženju poluanehoične prostorije koja ispunjava akustičke zahteve ISO 3745 za korekciju mernog okruženja - indikator K_2 treba da ima vrednost jednaku nuli.

Teorijski, u slobodnom zvučnom polju, može se očekivati da nivo zvučnog pritiska bude jednak nivou intenziteta zvuka s obzirom da se zvuk do mernog pretvarača dopire iz jednog pravca. Međutim, u praksi, ukoliko je ispitivani izvor velikih dimenzija, ili ako je malih dimenzija a nalazi se iznad reflektujuće ravni (recimo na nekom postolju ili je obešen), zvučni talasi do mernog pretvarača mogu dolaziti iz više pravaca. Za izvor koji se nalazi iznad reflektujuće ravni, zvučni talas koji nastaje refleksijom od reflektujuće ravni, može imati različit pravac prostiranja od direktnog zvučnog talasa.

Kompletni merni rezultati dobijeni u slobodnom zvučnom polju iznad reflektujuće ravni dati su tabelarno u prilogu D. Pri prikazivanju mernih rezultata korišćene su sledeće oznake:

- ISO 11201(CM) - Primena procedure određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije u skladu sa preporukama ISO 11201; kao merni pretvarač za merenje nivoa zvučnog pritiska korišćen kondenzatorski mikrofon;
- ISO 11201(SI) - Primena procedure određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije u skladu sa preporukama ISO 11201; kao merni pretvarač za merenje nivoa zvučnog pritiska korišćena sonda za merenje intenziteta zvuka;
- SI metod - Primena procedure određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije merenjem intenziteta zvuka dvomikrofonskom sondom;
- PS (LS, DS, ZS) - Orijehtacija referentnog izvora sa prednjom stranom (levom, desnom, zadnjom) prema mernom pretvaraču.

U tabeli 7.3 uporedno su prikazani dobijeni rezultati ukupnog nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora primenom korišćenih metodaza, ponderisani A- i L- težinskom krivom, za različite pozicije i orijentacije izvora i pozicije mernih tačaka, sa slučaj kada izvor emituje signal tipa spektar1. U tabeli 7.4 prikazani su rezultati za slučaj kada izvor emituje signal tipa spektar 2.

Odstupanja vrednosti ukupnog A-nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora dobijenih metodom intenziteta zvuka od vrednosti dobijenih merenjem zvučnog pritiska kondenzatorskim mikrofonom i sondom za intenzitet zvuka prikazana su na sl. 7.17.

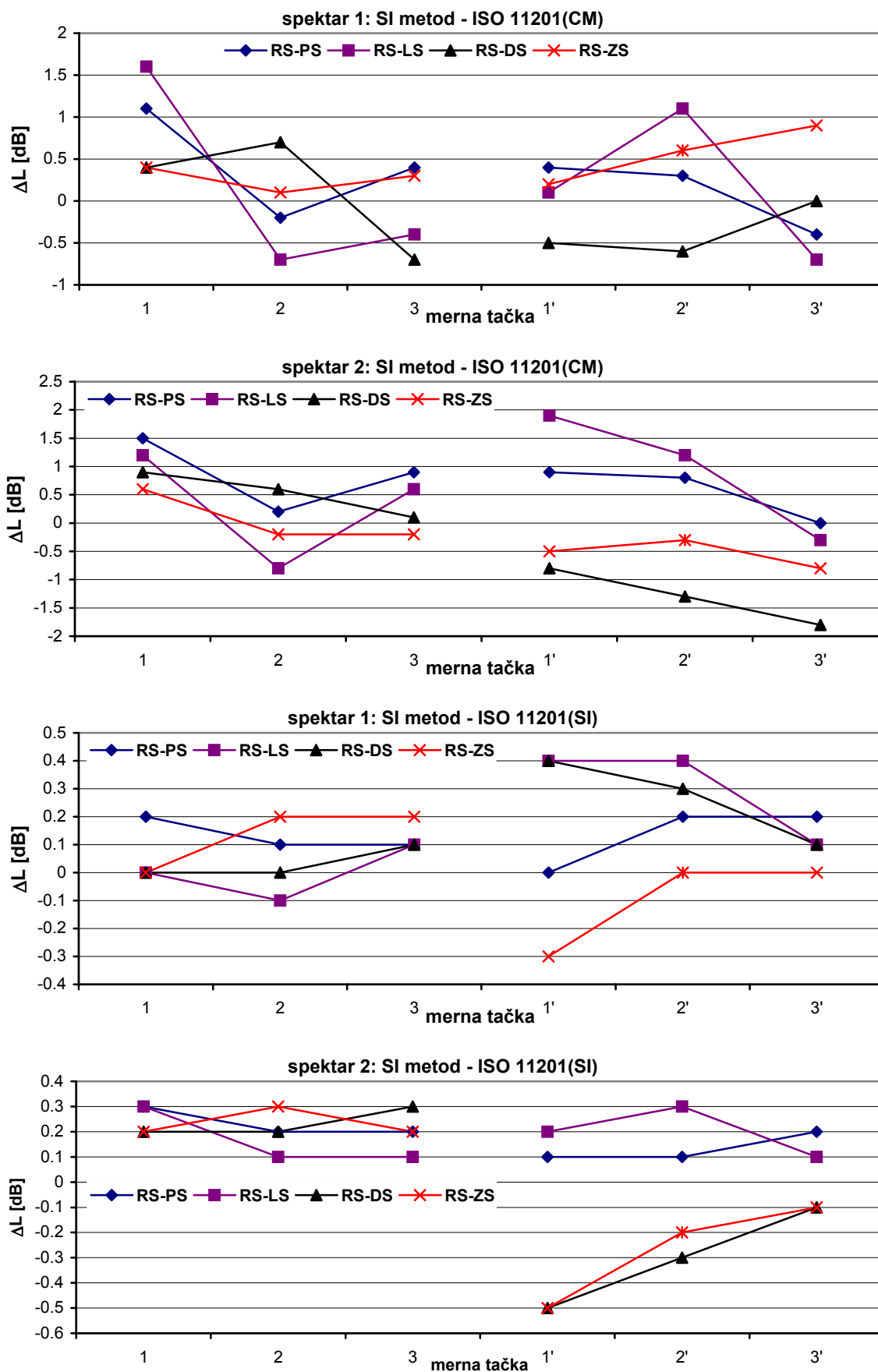
Odstupanja vrednosti ukupnog A-nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora dobijenih metodom intenziteta zvuka od vrednosti dobijenih merenjem zvučnog pritiska sondom za intenzitet zvuka, takođe, predstavljaju i vrednosti indeksa reaktivnosti zvučnog polja, δ_{pt} .

Tabela 7.3 Ukupni nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar1) određen u mernom okruženju MOI

merne pozicije	ponderacija	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
		ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
1	A	86.2	87.1	87.3	84.0	85.6	85.6	84.0	84.4	84.4	83.2	83.6	83.6
	L	89.7	90.8	91.1	88.7	89.6	89.7	88.5	89.0	89.1	88.0	88.5	88.5
2	A	87.7	87.4	87.5	83.0	82.4	82.3	82.9	83.6	83.6	82.6	82.5	82.7
	L	90.8	90.7	90.8	88.0	87.6	87.5	87.8	88.1	88.2	87.3	87.5	87.6
3	A	88.0	88.3	88.4	81.5	81.0	81.1	82.6	81.8	81.9	80.3	80.4	80.6
	L	90.8	91.1	91.2	86.8	86.9	87.0	87.6	87.2	87.3	86.1	86.1	86.3
1'	A	93.7	94.1	94.1	86.4	86.1	86.5	87.4	86.5	86.9	85.1	85.6	85.3
	L	96.6	96.8	96.9	90.5	93.5	93.7	91.3	93.2	92.9	89.0	89.2	88.7
2'	A	94.4	94.5	94.7	86.7	87.4	87.8	86.1	85.2	85.5	86.2	86.8	86.8
	L	96.6	96.9	97.0	90.4	91.7	91.9	90.3	89.2	88.7	88.7	89.3	89.1
3'	A	93.9	93.3	93.5	84.7	83.9	84.0	84.7	84.6	84.7	83.7	84.6	84.6
	L	95.8	95.2	95.4	88.6	87.9	87.9	88.6	88.6	88.6	87.0	87.5	87.4

Tabela 7.4 Ukupni nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar2) određen u mernom okruženju MOI

merne pozicije	ponderacija	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
		ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
1	A	79.3	80.5	80.8	78.2	79.1	79.4	78.5	79.2	79.4	78.2	78.6	78.8
	L	93.0	94.1	94.3	92.2	93.1	93.3	92.6	93.2	93.4	92.3	92.6	92.7
2	A	80.3	80.3	80.5	78.7	77.8	77.9	78.5	78.9	79.1	78.1	77.6	77.9
	L	93.8	93.7	93.8	92.7	91.7	91.9	92.5	92.6	92.8	92.2	91.8	91.9
3	A	79.8	80.5	80.7	77.1	77.6	77.7	78.2	78.0	78.3	77.2	76.8	77.0
	L	92.9	93.4	93.5	91.0	91.4	91.4	91.9	91.7	91.8	91.2	90.8	91.0
1'	A	85.7	86.5	86.6	80.5	82.2	82.4	82.0	81.7	81.2	78.9	78.9	78.4
	L	95.8	96.5	96.5	91.4	92.8	93.1	92.7	92.4	91.9	90.1	90.0	89.3
2'	A	85.3	86.0	86.1	80.0	80.9	81.2	80.3	79.3	79.0	77.7	77.6	77.4
	L	94.7	95.2	95.3	90.4	91.0	91.4	90.8	89.8	89.5	88.4	88.3	87.9
3'	A	84.2	84.0	84.2	78.2	77.8	77.9	78.7	76.5	76.9	76.8	76.1	76.0
	L	93.0	92.8	93.1	88.1	87.8	88.0	88.9	86.7	86.5	87.5	86.6	86.3



Sl. 7.17 Odstupanje dobijenih vrednosti A-nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora metodom intenziteta zvuka i metodom zvučnog pritiska u mernom okruženju MO1

Prikazani rezultati ukupnog A-nivoa pokazuju da se odstupanja vrednosti dobijenih metodom intenziteta zvuka od vrednosti dobijenih primenom ISO 11201 i merenjem zvučnog pritiska kondenzatorskim mikrofonom, kreću u opsegu $\pm 1\text{dB}$ za signal tipa spektar 1, odnosno u opsegu $\pm 2\text{dB}$ za signal tipa spektar 2. Kada se vrednosti nivoa zvučnog pritiska emisije određuju primenom ISO 11201 i merenjem zvučnog pritiska mernom sondom za intenzitet zvuka, odstupanja od vrednosti dobijenih metodom intenziteta zvuka se smanjuju i kreću se u opsegu $\pm 0.4\text{dB}$, za signal tipa spektar 1, odnosno $\pm 0.5\text{dB}$, za signal tipa spektar 2.

Razlozi za većim odstupanjima kada se za merenje zvučnog pritiska koristi kondenzatorski mikروفon, u odnosu na slučaj kada se koristi merna sonda za intenzitet zvuka za merenje zvučnog pritiska, sadržani su u sledećim činjenicama:

- kada se koristi merna sonda za intenzitet zvuka, zvučni pritisak i intenzitet zvuka se meri u istoj tački (središnja tačka dva mikrofona), dok pri korišćenju zasebnog kondenzatorskog mikrofona postoji mogućnost greške u pozicioniranju korišćenih mernih pretvarača;
- korišćeni kondenzatorski mikروفon je namenjen za slobodno zvučno polje, sa ravnom frekvencijskom karakteristikom u celom ispitivanom frekvencijskom opsegu, dok su kondenzatorski mikrofoni u konfiguraciji merne sonde za intenzitet zvuka namenjeni za difuzno zvučno polje i njihova frekvencijska karakteristika ima određeni pad na višim frekvencijama.

Iz navedenih razloga, kao referentne vrednosti za komparaciju rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka u realnom zvučnom polju koriste se rezultati određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije primenom ISO 11201, u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni, uz primenu merne sonde za intenzitet zvuka pri merenju zvučnog pritiska. Ti rezultati su naglašeni u tabelama 7.3 i 7.4.

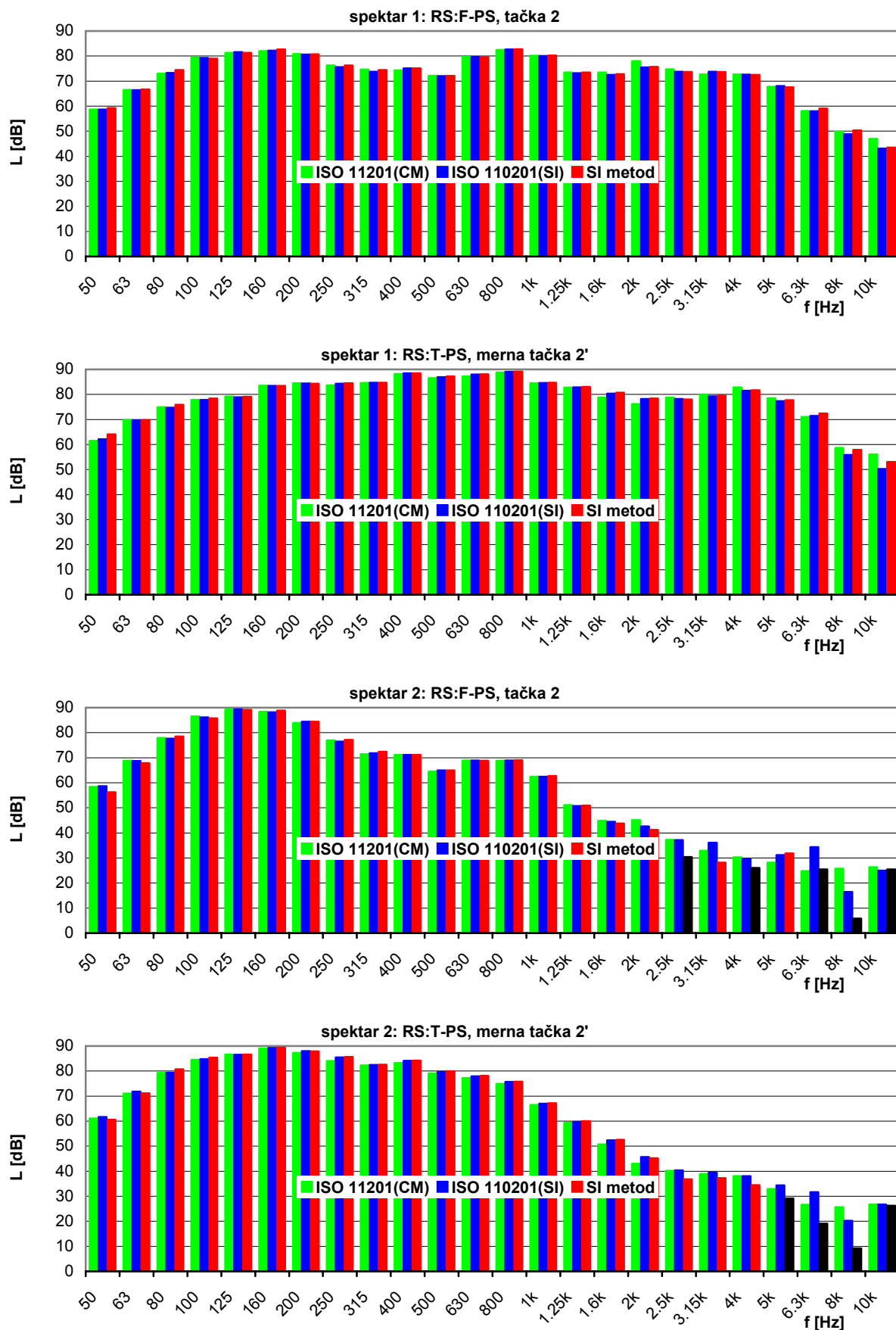
Posmatrana odstupanja su manja za slučaj kada se referentni izvor nalazi na reflektujućoj podlozi u odnosu na odstupanja kada se nalazi na postolju. Takođe, u većini slučajeva, odstupanja se smanjuju za veća rastojanja mernih tačaka od ose referentnog izvora.

Veća odstupanja, kada se referentni izvor nalazi na reflektujućoj podlozi u odnosu na slučaj kada se nalazi na postolju, na određenom rastojanju od reflektujuće podloge, kao i pojava u određenim frekvencijskim opsezima negativnih vrednosti intenziteta zvuka koji su na graficima obeleženi crnim barovima, posledica su sledećih činjenica:

- kada se izvor nalazi na postolju, u mernu tačku, pored direktnog zvučnog talasa, dopire i reflektovani zvučni talas od podloge čije se dejstvo različito manifestuje pri merenju zvučnog pritiska i intenziteta zvuka, u zavisnosti od amplitude i faze prostirućih zvučnih talasa;
- direktivnost referentnog izvora, za slučaj kada on nije neusmeren, utiče da refleksije od podloge budu izraženije i da značajnije utiču na merne rezultate;
- uticaj električnog šuma merne opreme pri merenju intenziteta niskog nivoa koji se javljaju na višim frekvencijama iznad 5kHz [44].

Korelacija odstupanja i orijentacije izvora prema mernoj tački je znatno manja u odnosu na ostale merne parametre.

Slični zaključci mogu se izvesti posmatranjem frekvencijskih spektara nivoa zvučnog pritiska emisije dobijenih različitim metodama. Za ilustraciju izabrana je merna tačka na rastojanju 0.5m od ose referentnog izvora i na sl. 7.18 komparativno su prikazani rezultati frekvencijske analize nivoa zvučnog pritiska emisije, za različite pozicije izvora i različite tipove emitovanih signala.



Sl. 7.18 Frekvencijska analiza nivoa zvučnog pritiska emisije primenom različitih metoda

7.3.3.2 Merenje u realnom zvučnom polju

Prema teorijski postavljenim hipotezama u poglavlju 7.1, u bilo kojoj tački zvučnog polja prostorije paralelopipednog oblika vektorska suma, komponenti refeltkovanog intenziteta zvuka je bliska nuli, tako da merna sonda za intenzitet zvuka, zasnovana na dvomikrofonskom principu, registruje samo direktan zvuk kao posledicu generisanja zvučne energije izvora. Na taj način se omogućuje merenje nivoa zvučnog pritiska emisije izvora, aproksimacijom nivoom intenziteta zvuka koji registruje sonda za intenzitet zvuka.

Eksperimentalno ispitivanje ispravnosti postavljenih hipoteza i definisanog metoda određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima realnog zvučnog polja, izvršeno je u mernom okruženju MO2. Akustičke karakteristike mernog okruženja izražene preko vremena reverberacije, nivoa pozadinske buke i graničnog radijusa prostorije prikazane su u poglavlju 7.2.1.

Kompletni merni rezultati, dobijeni u realnom zvučnom polju mernog okruženja MO2 tabelarno su prikazani u prilogu E. Pri prikazivanju mernih rezultata, pored već navedenih oznaka u prethodnom poglavlju, korišćene su i sledeće:

- ISO 11202(CM) - Primena procedure određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije u skladu sa preporukama ISO 11202; kao merni pretvarač za merenje nivoa zvučnog pritiska korišćen kondenzatorski mikrofon;
- ISO 11202(SI) - Primena procedure određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije u skladu sa preporukama ISO 11202; kao merni pretvarač za merenje nivoa zvučnog pritiska korišćena merna sonda za intenzitet zvuka.

Nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora u skladu sa ISO 11202 određen je na osnovu merenja nivoa zvučnog pritiska na definisanoj mernoj poziciji i korigovanjem dobijenih vrednosti indikatorom lokalnog mernog okruženja, K_3 , čije su vrednosti određene na bazi merenja vremena reverberacije merne prostorije i rastojanja mernih pozicija do akustičkog centra referentnog izvora. Vrednosti indikatora K_3 tabelarno su prikazani u prilogu E, tabela E.7.

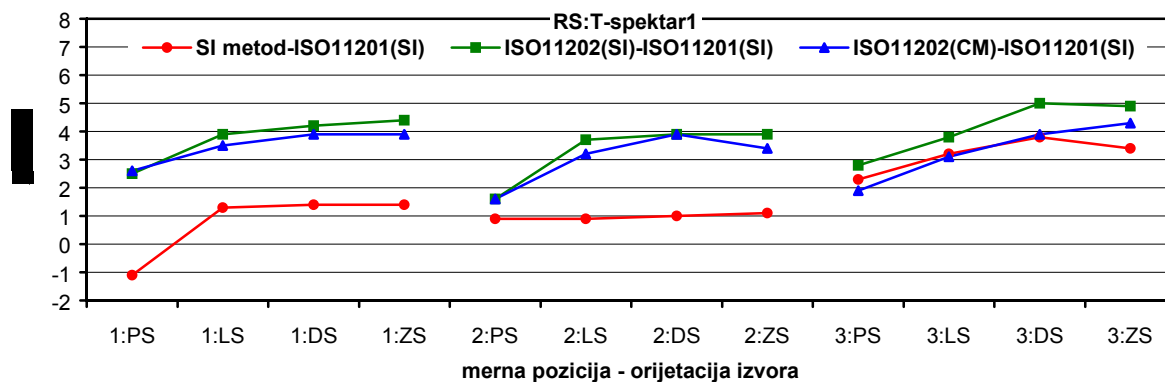
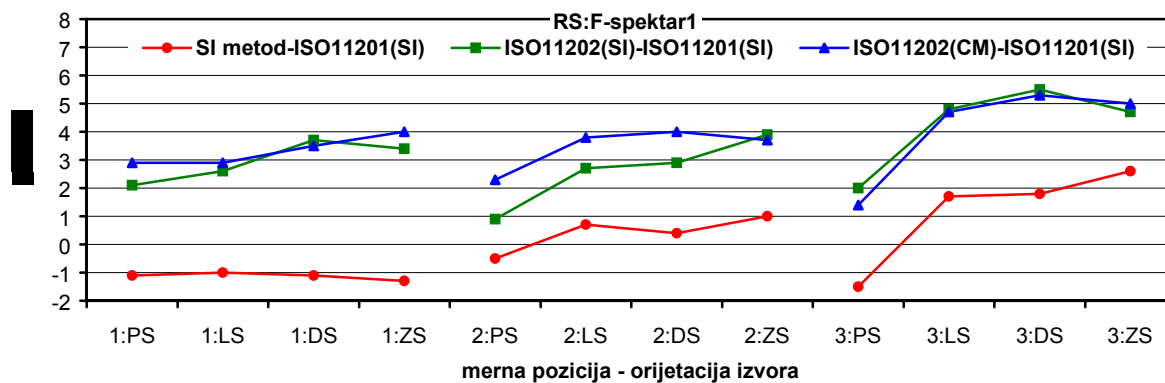
U tabeli 7.5 uporeno su prikazani dobijeni rezultati ukupnog nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora, ponderisani A- i L- težinskom krivom, za različite pozicije i orijentacije izvora i pozicije mernih tačaka. U tabeli su prikazane, u prethodnom poglavlju, definisane referentne vrednosti nivoa zvučnog pritiska emisije.

Odstupanja vrednosti ukupnog A-nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora dobijenih primenom različitih metoda od referentnih vrednosti prikazani su na sl. 7.19.

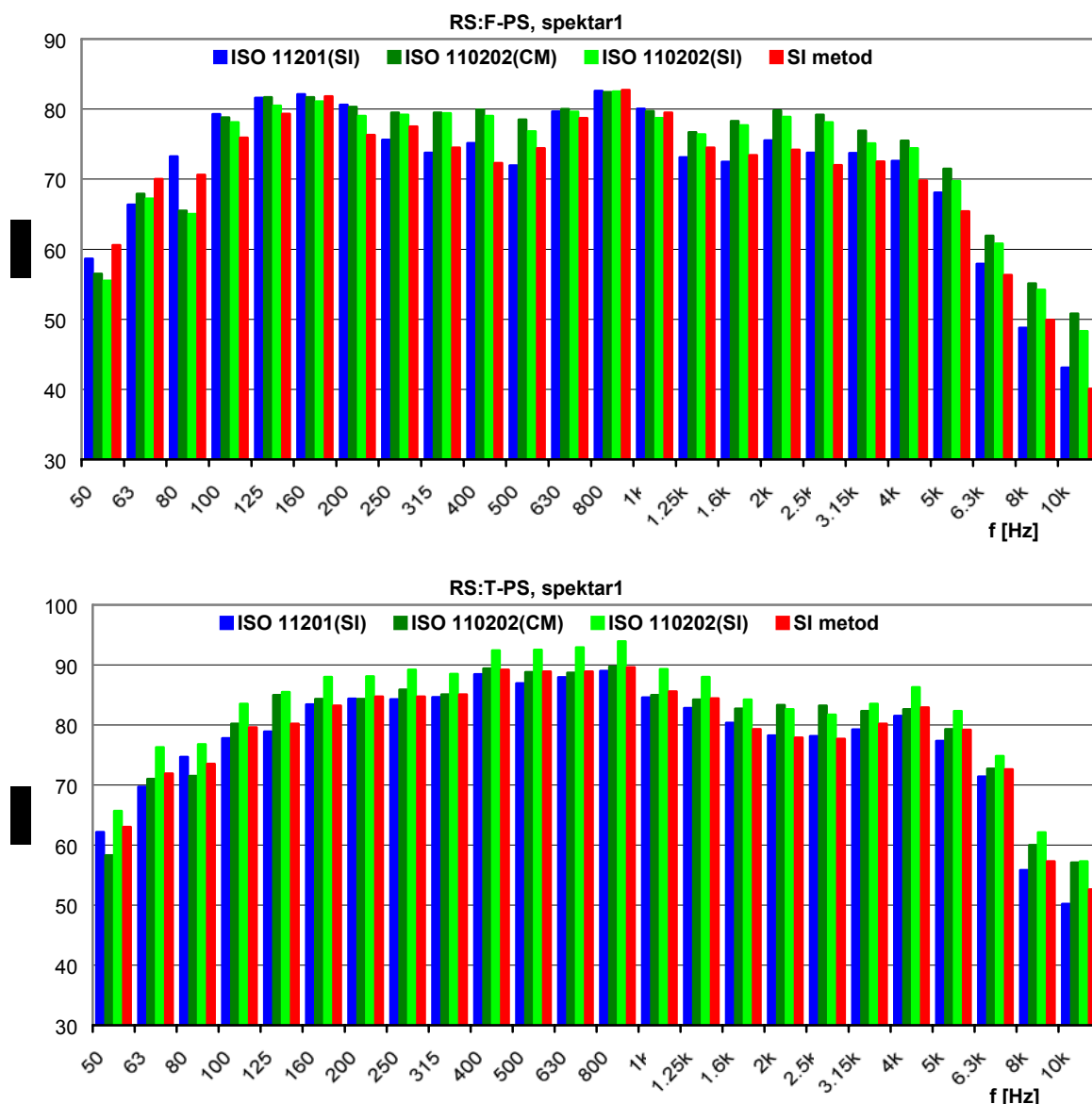
Prikaz frekvencijskih spektara nivoa zvučnog pritiska emisije dobijenih različitim metodama dat je na sl. 7.20. Za ilustraciju je izabrana ista merna tačka kao i u prethodnom poglavlju. Komparativno su prikazani rezultati frekvencijske analize nivoa zvučnog pritiska emisije za tu mernu tačku i upoređeni sa referentnim vrednostima.

Tabela 7.5 Ukupni nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar2) određen u mernom okruženju MO2

merne pozicije	ponderacija	RS:PS				RS:LS				RS:DS				RS:ZS			
		ISO 11201 (SI)	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod
1	A	87.1	90.0	89.2	86.0	85.6	88.5	88.2	84.6	84.4	87.9	88.1	83.3	83.6	87.6	87.0	82.3
	L	90.8	92.6	91.7	89.5	89.6	90.8	90.4	88.1	89.0	90.2	90.3	87.5	88.5	89.8	89.2	87.2
2	A	87.4	89.7	88.3	86.9	82.4	86.2	85.1	83.1	83.6	87.6	86.5	84.0	82.5	86.2	86.4	83.5
	L	90.7	92.0	90.8	89.7	87.6	88.7	86.9	86.9	88.1	89.7	88.6	87.4	87.5	88.1	88.4	88.5
3	A	88.3	89.7	90.3	86.8	81.0	85.7	85.8	82.7	81.8	87.1	87.3	83.6	80.4	85.4	85.1	83.0
	L	91.1	91.9	92.6	88.8	86.9	87.9	88.1	86.2	87.2	89.3	89.5	86.6	86.1	87.1	87.1	85.6
1'	A	94.1	96.7	96.6	95.7	86.1	89.6	90.0	87.4	86.5	90.4	90.7	87.9	85.6	89.5	90.0	87.0
	L	96.8	99.0	99.0	98.3	93.5	91.6	92.1	91.0	93.2	93.0	93.3	91.6	89.2	91.3	91.9	89.1
2'	A	94.5	96.1	96.1	95.4	87.4	90.6	91.1	88.3	85.2	89.1	89.1	86.2	86.8	90.2	90.7	87.9
	L	96.9	98.2	98.4	97.7	91.7	92.5	93.0	91.6	89.2	91.3	91.3	89.7	89.3	91.8	92.3	89.2
3'	A	93.3	95.2	96.1	95.6	83.9	87.0	87.7	87.1	84.6	88.5	89.6	88.4	84.6	88.9	89.5	88.0
	L	95.2	97.2	98.0	97.5	87.9	89.1	89.8	89.8	88.6	90.5	91.7	91.3	87.5	90.7	91.4	89.2



Sl. 7.19 Odstupanje dobijenih vrednosti A-nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora metodom intenziteta zvuka i metodom zvučnog pritiska u mernom okruženju MO2



Sl. 7.20 Frekvencijska analiza nivoa zvučnog pritiska emisije primenom različitih metoda

Prethodno prikazani merni rezultati ukazuju da se najmanje odstupanje od referentnih vrednosti javlja primenom metode intenziteta zvuka. Najmanja odstupanja se javljaju za mernu tačku koja se nalazi na rastojanju 0.5m od ose referentnog izvora, za obe pozicije izvora. Nešto veća odstupanja javljaju se za mernu tačku na rastojanju 0.25m a najveća za mernu tačku na rastojanju 0.75m.

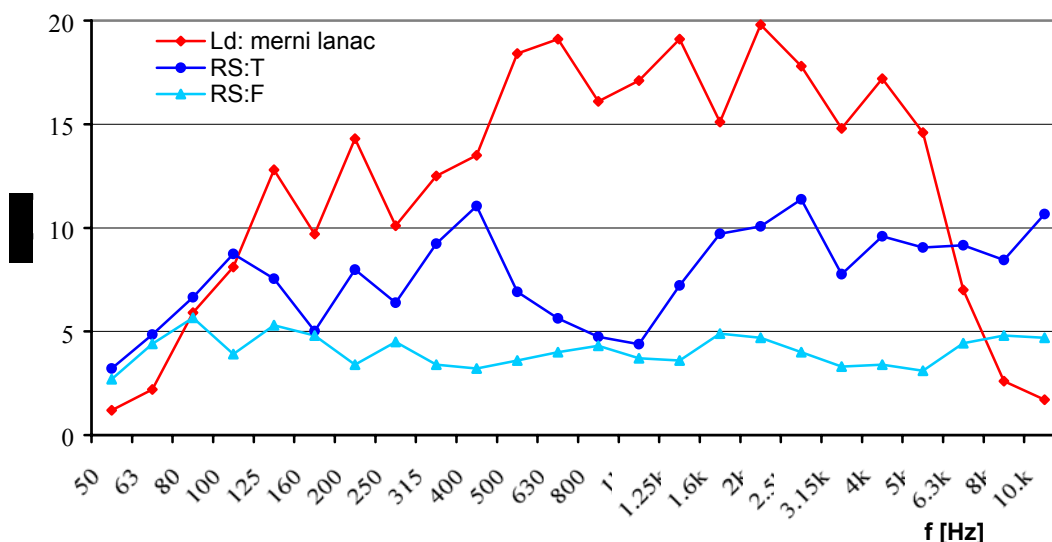
Jedan od razloga za ovako dobijene rezultate je pozicija merne tačke u odnosu na oblasti zračenja referentnog izvora. S obzirom na granični radijus merne prostorije (sl. 7.5), merne tačke 2 i 2' nalaze se u direktnoj zoni zračenja izvora, gde je uticaj reverberacionog polja manji, pa su iz tih razloga dobijeni rezultati A-ponderisanog nivoa zvučnog pritiska emisije izvora metodom intenziteta zvuka sa odstupanjima u opsegu ± 1 dB u odnosu na referentne vrednosti.

Merne tačke 1 i 1' nalaze u bliskoj zoni zračenja izvora gde postoji veća promenljivost zvučnog polja u funkciji rastojanja, tako da su promene intenziteta zvuka duž merne sonde veće, što uslovljava i veću nesigurnost u određivanju intenziteta zvuka u ovoj zoni zračenja

izvora. Posmatrana odstupanja su veća za mernu tačku 1' koja je bliža akustičkom centru referentnog izvora i kreću se u opsegu $\pm 1.5\text{dB}$.

Merne tačke 3 i 3' nalaze se u reverberacionoj zoni zračenja izvora gde je uticaj reverberacionog polja veći od uticaja direktnog zvučnog polja, što uslovljava da se dobiju veće vrednosti intenziteta zvuka u odnosu na slučaj kada se izvor nalazi u slobodnom zvučnom polju. Na ovaj način se dobijaju veće vrednosti nivoa zvučnog pritiska emisije, tako da se odstupanja u odnosu na referentne vrednosti kreću i do 4dB.

Metodom intenziteta zvuka dobijeni su frekvencijski spektri nivoa zvučnog pritiska emisije izvora za merne tačke 2 i 2' prilično saglasni sa referentnim frekvencijskim spektrom. Nešto veća odstupanja se dobijaju u nižem frekvencijskom opsegu, do 100Hz, i na visokim frekvencijama iznad 5kHz. Razlozi se mogu potražiti u samim karakteristikama referentnog izvora koji je namenjen za generisanje zvuka sa stabilnim karakteristikama u opsegu frekvencija 100Hz÷5kHz, kao i u indeksu reaktivnosti zvučnog polja u posmatranoj tački (sl. 7.21). Indeks reaktivnosti na sasvim niskim i visokim frekvencijama je veći od dinamičkog opsega mernog lanca, tako da se na tim frekvencijama javlja i veća greška pri merenju intenziteta zvuka.



Sl. 7.21 Indeks reaktivnosti zvučnog polja za mernu tačku na rastojanju 0.5m od ose referentnog izvora kompariran sa vrednostima dinamičkog opsega mernog lanca

Vrednosti nivoa zvučnog pritiska emisije izvora, određene primenom ISO 11202 pokazuju odstupanja u odnosu na referentne vrednosti u opsegu $\pm 4\text{dB}$. Primenjeni standard pripada klasi preglednih metoda tako da dobijena odstupanja odgovaraju standardom deklarisanom tačnosti mernih rezultata. Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska kondenzatorskim mikrofonom i mernom sondom za merenje intenziteta zvuka se ne razlikuju suštinski, s obzirom da se nivo zvučnog pritiska, u uslovima zvučnog polja merne prostorije, ne menja značajno sa pozicijom mernog pretvarača i da su pretvarači merne sonde korišćeni u uslovima za koje su kalibrisani.

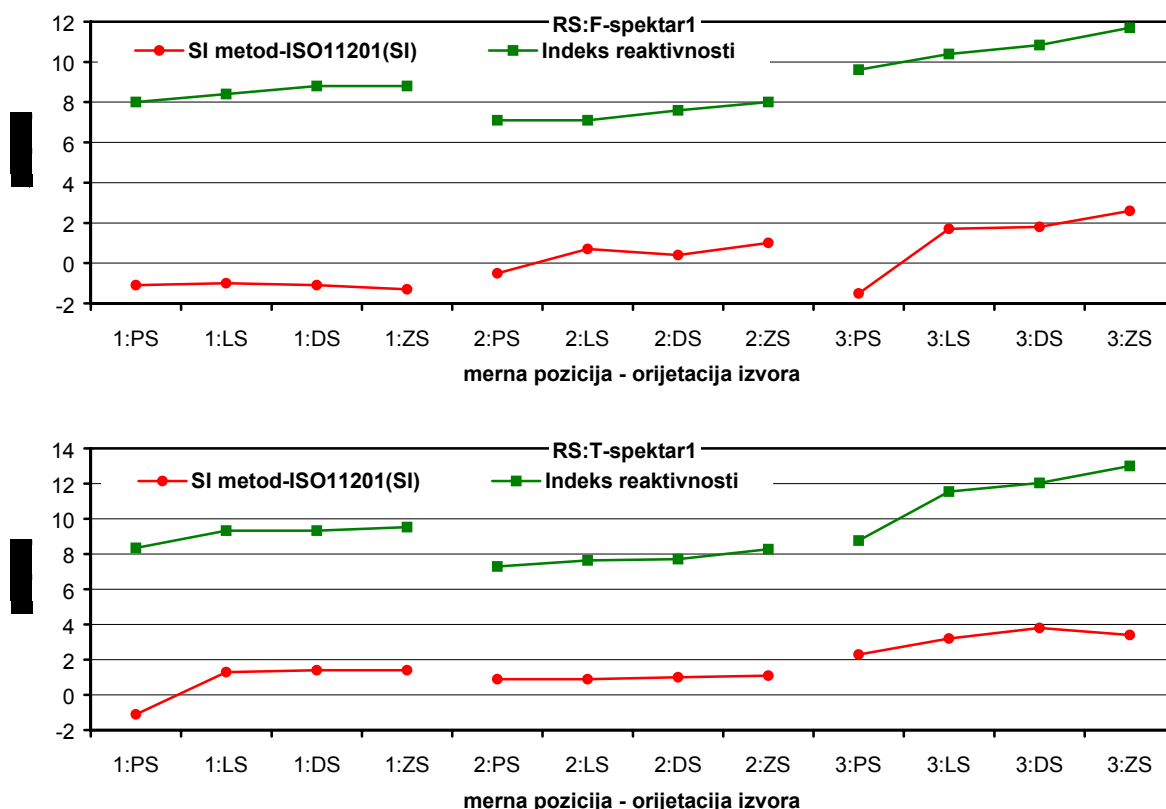
Dalja analiza dobijenih rezultata biće stavljena u funkciju razmatranja uticaja indikatora zvučnog polja, referentnog izvora i merne sonde na pouzdanost dobijenih rezultata metodom intenziteta zvuka.

7.3.4 Pouzdanost mernih rezultata

7.3.4.1 Indikator reaktivnosti zvučnog polja

Odstupanje zvučnog polja merne prostorije od idealnog (slobodnog) zvučnog polja definiše se indeksom reaktivnosti koji se određuje kao razlika nivoa zvučnog pritiska i nivoa intenziteta zvuka u posmatranoj tački. Obe neophodne veličine nivoa za izračunavanje indeksa reaktivnosti izmerene su mernom sondom za intenzitet zvuka, u istoj, središnjoj tački između dva mikrofona.

Indeks reaktivnosti zvučnog polja za sve merne pozicije prikazan je na slici sl. 7.22 i upoređen je sa odstupanjima nivoa zvučnog pritiska emisije dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti.



SI. 7.22 Indeks reaktivnosti zvučnog polja poređen sa odstupanjima mernih rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti

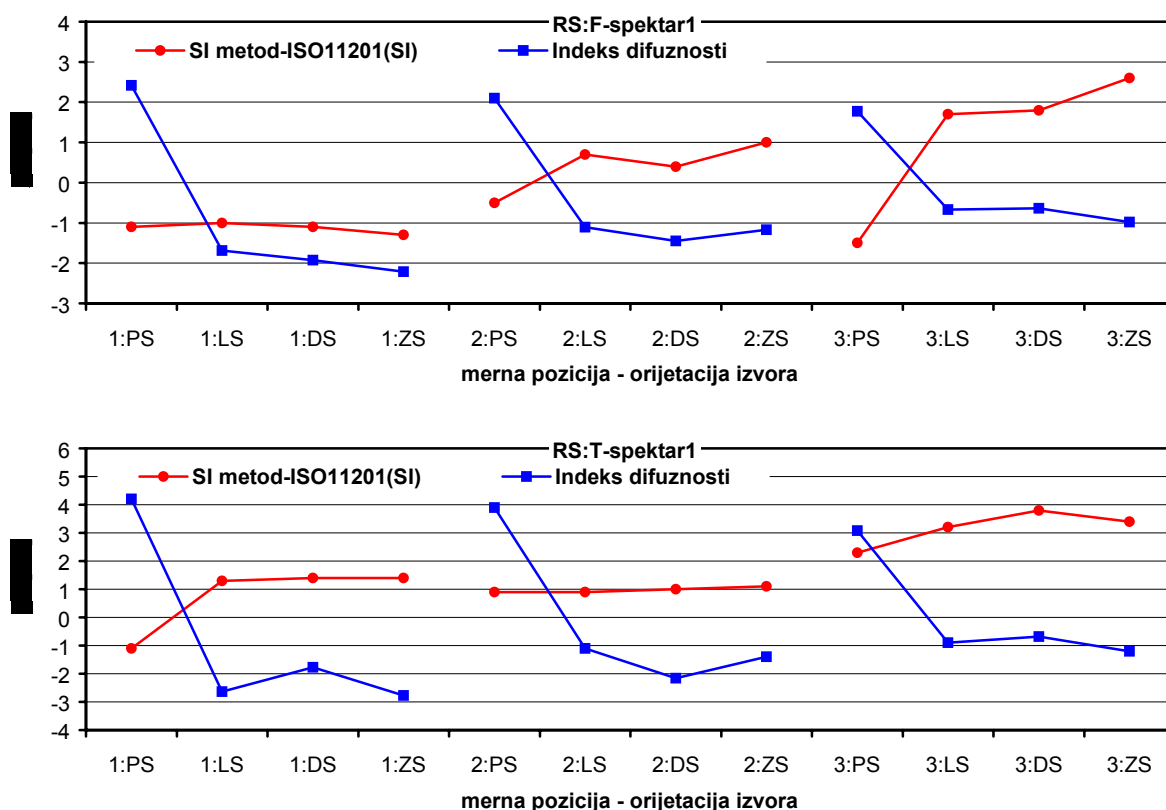
Indeks reaktivnosti zvučnog polja je najmanji za merne tačke koje se nalaze u direktnoj zoni zračenja izvora, nešto je veći u bliskoj zoni a najveći je u reverberacionoj zoni. Takođe, indeks reaktivnosti je najmanji za frontalnu orijetaciju izvora ka mernoj tački a najveći za slučaj kada je izvor zadnjom stranom okrenut prema mernoj tački.

Povećanje indeksa reaktivnosti uslovljava povećanje greške pri merenju intenziteta zvuka. Za vrednosti indeksa reaktivnosti do 8dB, greška se nalazi u opsegu ± 1 dB. Za vrednosti indeksa reaktivnosti u opsegu 8÷10dB, greška se nalazi u opsegu ± 2 dB. Za veće vrednosti indeksa reaktivnosti od 10dB, greška je veća od ± 2 dB.

7.3.4.2 Indikator difuznosti zvučnog polja

Mera difuznosti zvučnog polja za svaku mernu poziciju definisana je preko indeksa difuznosti koji se određuje kao razlika izmerenog nivoa zvučnog pritiska za posmatranu mernu poziciju i orijentaciju referentnog izvora, i srednje vrednosti nivoa zvučnog pritiska određene na osnovu izmerenih nivoa zvučnog pritiska za sve orijentacije referentnog izvora ka posmatranoj mernoj poziciji. Nivo zvučnog pritiska određen je mernom sondom za intenzitet zvuka u središnjoj tački između dva mikrofona,

Indeks difuznosti zvučnog polja za sve merne pozicije prikazan je na sl. 7.23. Indeks difuznosti zvučnog polja upoređen je sa odstupanjima nivoa zvučnog pritiska emisije dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti.



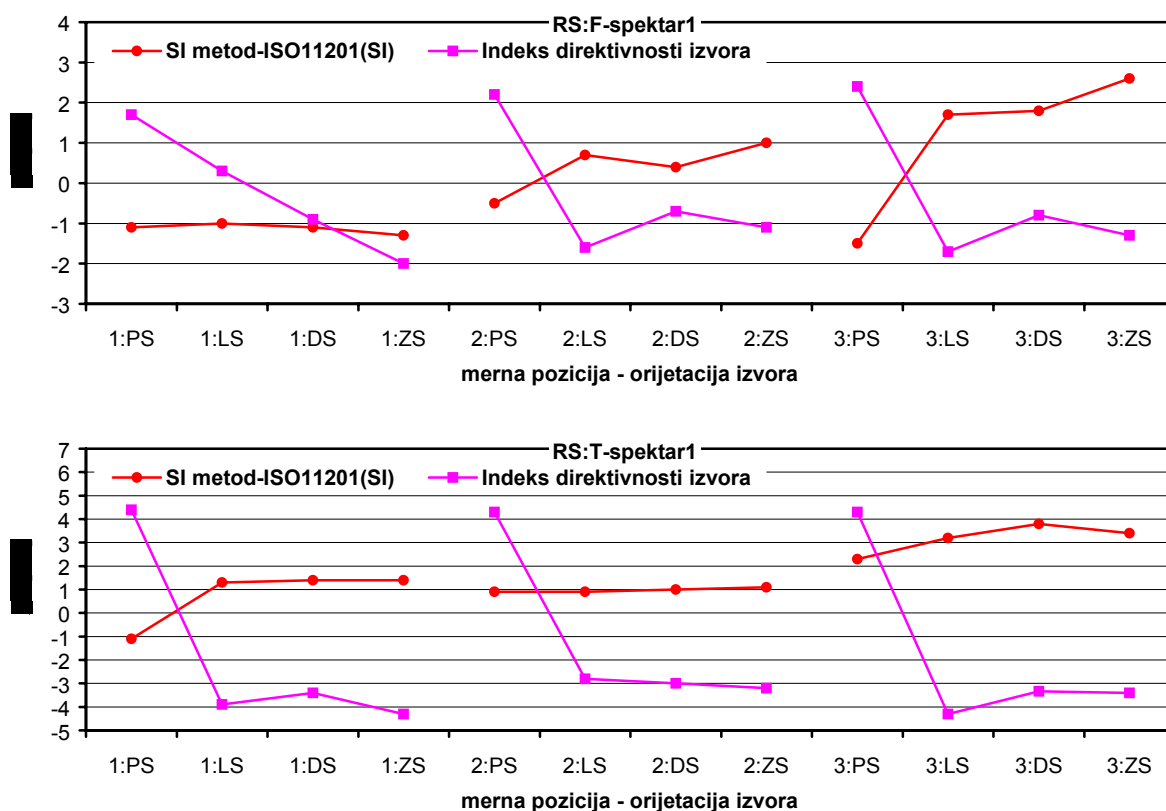
Sl. 7.23 Indeks difuznosti zvučnog polja poređen sa odstupanjima mernih rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti

Poređenjem indeksa difuznosti sa odstupanjima nivoa zvučnog pritiska emisije dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti, dobijaju se konfuzni rezultati. Dok manje vrednosti indeksa difuznosti za najudaljeniju tačku daju najnepreciznije rezultate, najveće vrednosti indeksa difuznosti za najbližu tačku ne daju najpreciznije rezultate. Na ovaj način se pokazuje da je dosta teško indeks difuznosti koristiti za ocenu pouzdanosti dobijenih rezultata metodom intenziteta zvuka.

7.3.4.3 Indikator direktivnosti referentnog izvora

Mera direktivnosti referentnog izvora definisana je preko indeksa direktivnosti koji se određuje kao razlika izmerenog nivoa intenziteta zvuka za posmatranu mernu poziciju i orijentaciju referentnog izvora i srednje vrednosti nivoa intenziteta zvuka, određene na osnovu izmerenih nivoa intenziteta zvuka za sve orijentacije referentnog izvora ka posmatranoj mernoj poziciji.

Indeks direktivnosti zvučnog polja za sve merne pozicije prikazan je na sl. 7.24. Indeks difuznosti zvučnog polja upoređen je sa odstupanjima nivoa zvučnog pritiska emisije dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti.



Sl. 7.24 Indeks direktivnosti referentnog izvora poređen sa odstupanjima mernih rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti

Veće vrednosti indeksa direktivnosti daju preciznije rezultate, tako da se za slučaj maksimalnih vrednosti indeksa direktivnosti, kada je referentni izvor frontalno usmeren ka mernoj poziciji, dobijaju najprecizniji rezultati. Ova činjenica navodi na zaključak da pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije izvora, izvor treba orijentisati tako da je njegova glavne petlja zračenja usmerena ka mernoj poziciji, što se u nekim slučajevima može poklopiti sa frontalnom orijetacijom izvora.

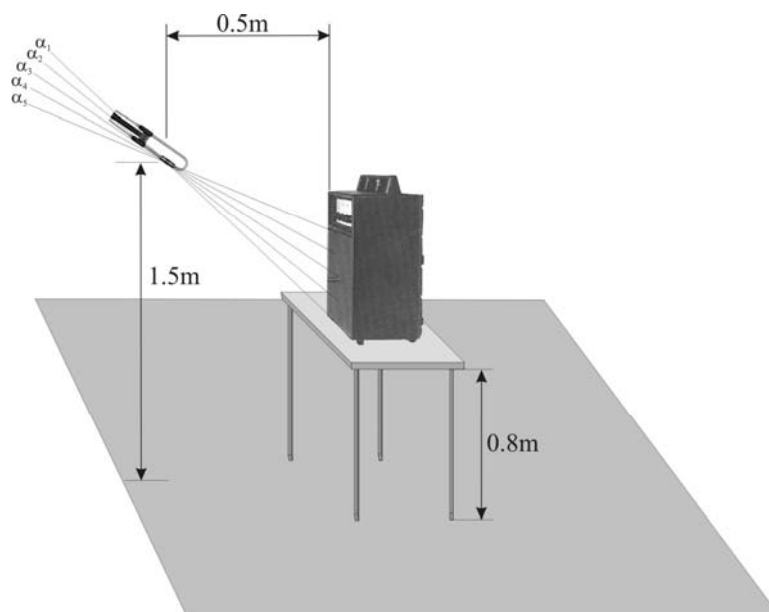
7.3.4.4 Indikator direktivnosti merne sonde

Uticao direktivnosti merne sonde na pouzdanost dobijenih rezultata ispitana je različitim orijetacijama merne sonde ka referentnom izvoru. U mernoj tački koja je od ose referentnog izvora udaljena 0.5m, izvršeno je merenje nivoa intenziteta zvuka sa pet različitih orijetacija merne sonde ka referentnom izvoru koji se nalazio na postolju visine 0.8m (sl. 7.25).

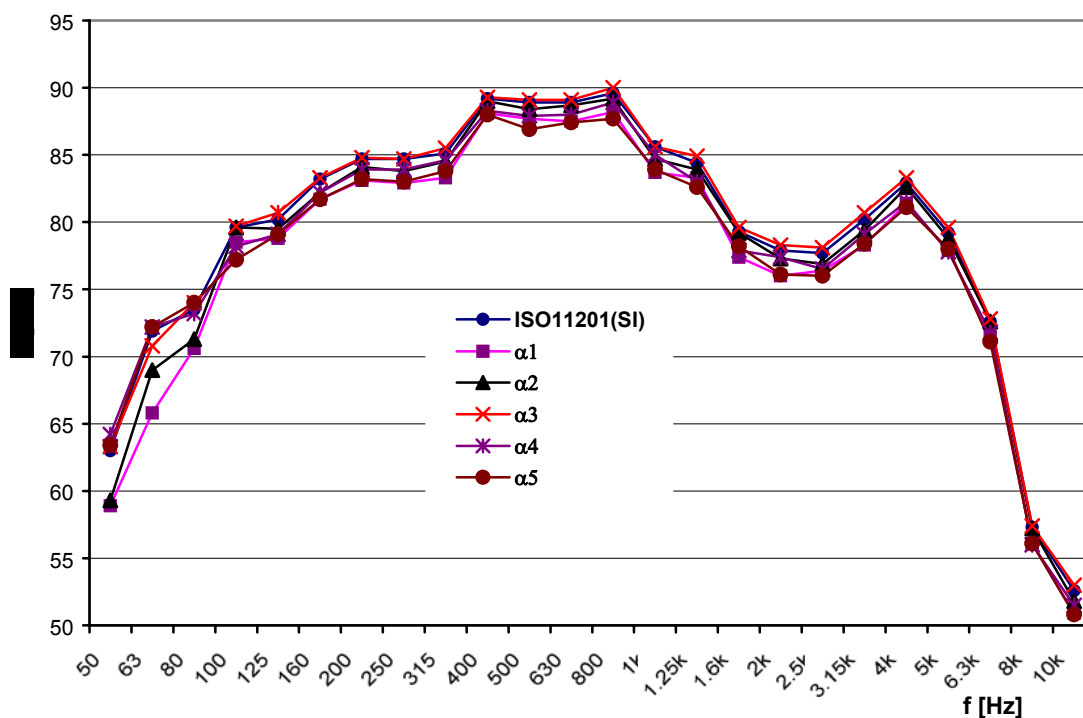
U zavisnosti od orijetacije merne sonde, dobijeni su A-ponderisani ukupni nivoi zvučnog pritiska emisije izvora u opsegu nivoa 93.8÷95.7dB(A). Referentna vrednost za ovu mernu poziciju iznosi 95.4dB(A). U frekvencijskim spektrima pojavljuju se nešto veće razlike u izmernim nivoima na nižim nego na višim frekvencijama (sl. 7.26).

Najveće vrednosti nivoa dobijaju su za orijetaciju merne sonde ka akustičkom centru referentnog izvora, tako da je očigledno važno, u proceduri određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke, tako orijentisati mernu sondu da registruje maksimalni nivo intenziteta zvuka. To praktično znači da je potrebno primeniti neki od metoda za

identifikaciju pravca u kome se pojavljuje maksimalni nivo intenziteta zvuka, npr. nulti metod koji je objašnjen u poglavlju 6.2.2.



Sl. 7.25 Ispitivanje uticaja direktivnosti merne sonde na pouzdanost rezultata

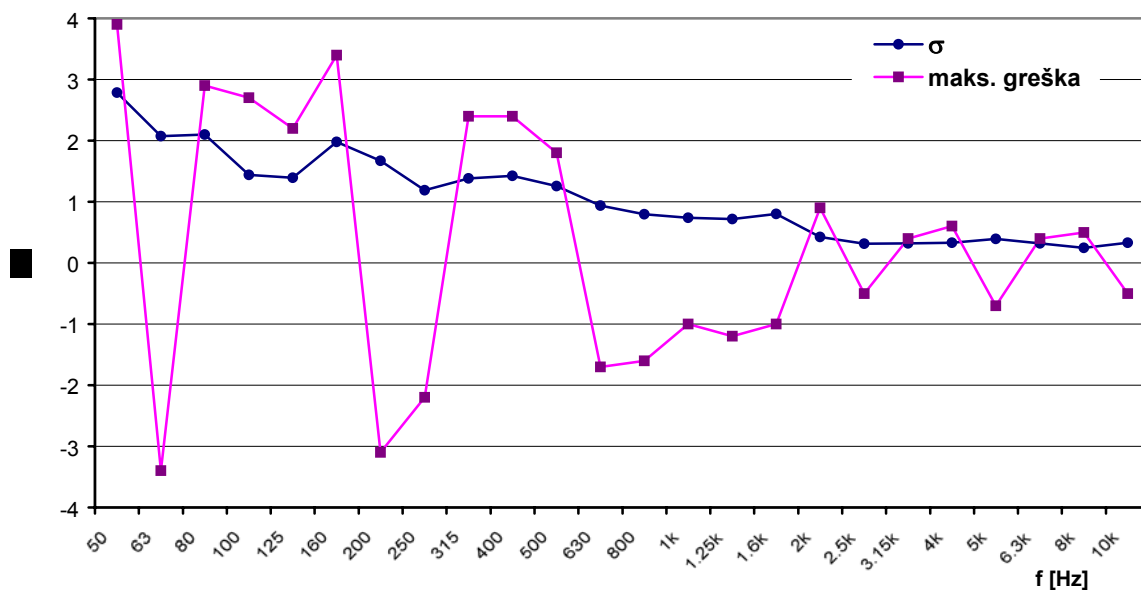


Sl. 7.26 Nivo zvučnog pritiska emisije u funkciji orijentacije merne sonde

7.3.4.5 Ponovljivost rezultata

Ispitivanje ponovljivosti rezultata pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora metodom intenziteta zvuka izvršeno je ponavljanjem testa merenja u mernoj tački 2, od pozicioniranja merne sonde do samog merenja. Izvršeno je merenje deset puta i nakon toga urađena je statistička analiza dobijenih rezultata. Kompletni rezultati su prikazani u prilogu E, tabela E.9.

Standardna devijacija rezultata sa maksimalnom greškom pri merenju nivoa zvučnog pritiska emisije izvora prikazana je na sl. 7.27.



Sl. 7.27 Standardna devijacija rezultata (sa maksimalnom greškom) dobijena primenom metode intenziteta zvuka

Dobijene vrednosti standardne devijacije rezultata primenom metode intenziteta zvuka u određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije izvora komparirane su sa standardima definisanim standardnim devijacijama za klase mernih metoda 1 i 2.

Tabela 7.6 Standardna devijacija rezultata određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije metodom intenziteta

Centralna frekvencija		Standardna devijacija, σ		
oktavnih pojaseva, [Hz]	tercnih pojaseva, [Hz]	Precizni metod (klasa 1), [dB]	Inženjerski metod (klasa 2), [dB]	Metod intenziteta, [dB]
63-125	50-160	2	3	1.5÷3
250-500	200-630	1.5	2	1÷2
1000-4000	800-5000	1	1.5	0.3÷1
	6300	2	2.5	do 0.3

Dobijeni rezultati pokazuju da standardna devijacija metode intenziteta zvuka do frekvencije 630Hz odgovara klasi tačnosti inženjerskih metoda i da se neznatno razlikuje od klase tačnosti preciznih mernih metoda, osim za frekvencije ispod 100Hz. Iznad 630Hz standardna devijacija odgovara granicama definisanim za precizne merne metode.

Dakle, prava vrednost nivoa zvučnog pritiska emisije izvora određena metodom intenziteta zvuka može se sa sigurnošću od 95% očekivati u opsegu $\pm 2\sigma$ oko izmerene vrednosti:

$$L'_p = L_I \pm 2\sigma$$

8

ZAKLJUČAK

OSTVARENI REZULTATI U ISTRAŽIVAČKOM PROCESU
DOPRINOS DISERTACIJE
PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA

8.1 OSTVARENI REZULTATI U ISTRAŽIVAČKOM PROCESU

Specifičnost standardizovanih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke, sa svim svojim ograničenjima i nedostacima, opredelila je područje, predmet i cilj istraživanja u disertaciji kroz definisanje i eksperimentalnu verifikaciju alternativnog metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije. Alternativni metod se zasniva na aproksimaciji nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke komponentom intenziteta zvuka u pravcu ose dvomikrofonске merne sonde u realnim ambijentalnim uslovima.

Sprovedena eksperimentalna istraživanja imala su za cilj potvrdu pretpostavljene aproksimacije i određivanje preciznosti definisane merne metode, kompariranjem sa rezultatima dobijenim standardizovanim metodama određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije izvora u uslovima slobodnog zvučnog polja.

Eksperimentalna istraživanja su realizovana kroz:

- određivanje dinamičko-frekvencijskog opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka izabranim mernim lancem,
- definisanje akustičke emisije referentnog izvora zvučnom snagom,
- definisanje akustičke emisije referentnog izvora nivoom zvučnog pritiska emisije u uslovima slobodnog i realnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni,
- definisanje pouzdanosti mernih rezultata pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije metodom intenziteta zvuka.

8.1.1 Dinamičko-frekvencijski opseg pouzdanog merenja

Verifikacija teorijske analize i numeričkih istraživanja u oblasti proširenja frekvencijskog opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka izvršena je serijom eksperimentalnih merenja nivoa intenziteta zvuka u realnom ambijentu paralelopipedne prostorije.

Prikazani rezultati u disertaciji pokazuju da se merenja intenziteta zvuka, različitim kombinacijama veličine mikrofona i njihovog međusobnog rastojanja, prilično slažu u frekvencijskom opsegu od 50Hz do 1.25kHz. Slaganje dobijenih rezultata je posledica kompenzacije fazne greške na niskim frekvencijama na osnovu unapred određenog rezidualnog indeksa reaktivnosti mernog lanca. Iznad frekvencije od 1.25kHz značajna odstupanja pokazuju merenja intenziteta zvuka konfiguracijom sonde sa $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima na međusobnom rastojanju od 50mm, što je posledica greške aproksimacije gradijenta pritiska konačnom razlikom.

Eksperimentalni rezultati dobijeni u seriji određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije izvora merenjem intenziteta zvuka konfiguracijom sonde sa $\frac{1}{2}$ "-mikrofonima na međusobnom rastojanju od 12mm pokazuju dobro slaganje sa merenjima referentnim konfiguracijama merne sonde za određene frekvencijske opsege. Na ovaj način se pokazuje da se ovom konfiguracijom može pokriti frekvencijski opseg od 50Hz do 10kHz, a da greška merenja bude u opsegu ± 1 dB. Izvedeni zaključak omogućio je da se u daljoj mernoj proceduri koristi samo jedna konfiguracija merne sonde što je znatno pojednostavilo i ubrzalo dalju proceduru.

Dinamički opseg izabrane konfiguracije određen u proceduri kalibracije mernog sistema definisanjem rezidualnog indeksa reaktivnosti čije vrednosti premašuju 10dB u veoma širokom frekvencijskom opsegu od 125Hz do 5kHz pokazuje da indeks reaktivnosti mernog okruženja može imati vrednosti veće od 10dB a da se fazna greška pri merenju ne povećava.

8.1.2 Zvučna snaga referentnog izvora

Zvučna snaga je određena primenom procedura definisanih odgovarajućim standardima, u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće površine (metodom zvučnog pritiska i metodom intenziteta zvuka) i u uslovima realnog zvučnog polja (samo metodom intenziteta zvuka).

Kod primene metoda intenziteta zvuka određeni su indikatori koji definišu mernu grešku i prisustvo usmerenih spoljnih izvora. Dobijene vrednosti indeksa reaktivnosti slobodnog zvučnog polja za oba oblika spektra emitovanog zvuka nalaze se ispod vrednosti dinamičkog opsega mernog lanca u svim frekvencijskim opsezima, što potvrđuje adekvatnost izabrane merne opreme. U uslovima realnog zvučnog polja, situacija je slična osim za veoma niske i visoke frekvencije, za slučaj kada izvor emituje signal tipa spektar 2. Na ovim frekvencijama merna greška nije zanemarljiva i dobijeni rezultati ne ispunjavaju zahteve standarda.

Indikator prisustva negativne parcijalne zvučne snage u slobodnom zvučnom polju, u svim opsezima i za oba oblika spektra ima vrednost nula, što ukazuje da nije bilo jako usmerenih spoljnih izvora buke u neposrednoj okolini ispitivanog referentnog izvora. Isto važi i za slučaj realnog mernog okruženja kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 1.

Kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 1, dobijeni rezultati nivoa zvučne snage metodom intenziteta zvuka u oba merna okruženja, u proceduri kompariranja pokazuju visoku saglasnost sa referentnim vrednostima. Takođe je dobijena visoka saglasnost rezultata merenjem zvučnog pritiska i intenziteta zvuka u slobodnom zvučnom polju, kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 2.

Kada referentni izvor emituje signal oblika spektra 2, prisustvo pozadinske buke na višim frekvencijama u uslovima realnog zvučnog polja ima uticaj na merenje intenziteta zvuka, tako da se u određenim frekvencijskim opsezima i tačkama dobijaju negativne vrednosti intenziteta zvuka koji ukazuju na prisustvo spoljnog izvora buke. Razlika indikatora $F_3 - F_2$ ima vrednost 2.4, tako da se ne moraju preduzimati mere za eliminaciju uticaja spoljnje buke, ali se preciznost metode smanjuje.

8.1.3 Nivo zvučnog pritiska emisije referentnog izvora

Dobijeni rezultati u uslovima slobodnog zvučnog polja iznad reflektujuće ravni pokazuju da se odstupanja vrednosti dobijenih metodom intenziteta zvuka, od vrednosti dobijenih primenom ISO 11201 i merenjem zvučnog pritiska kondenzatorskim mikrofonom, kreću u opsegu ± 1 dB za signal tipa spektar 1, odnosno u opsegu ± 2 dB za signal tipa spektar 2. Kada se vrednosti nivoa zvučnog pritiska emisije određuju primenom ISO 11201 i merenjem zvučnog pritiska mernom sondom za intenzitet zvuka, odstupanja od vrednosti dobijenih metodom intenziteta zvuka se smanjuju i kreću se u opsegu ± 0.4 dB za signal tipa spektar 1, odnosno ± 0.5 dB za signal tipa spektar 2.

Razlozi za većim odstupanjima kada se za merenje zvučnog pritiska koristi kondenzatorski mikروفон sadržani su u sledećim činjenicama:

- kada se koristi merna sonda za intenzitet zvuka, zvučni pritisak i intenzitet zvuka se određuje u istoj tački, dok pri korišćenju kondenzatorskog mikrofona postoji mogućnost greške u pozicioniranju korišćenih mernih pretvarača;
- korišćeni kondenzatorski mikروفон je namenjen za slobodno zvučno polje, sa ravnom frekvencijskom karakteristikom u celom ispitivanom frekvencijskom opsegu, dok su kondenzatorski mikrofoni u konfiguraciji merne sonde za intenzitet zvuka namenjeni

za difuzno zvučno polje i njihova frekvencijska karakteristika ima određeni pad na višim frekvencijama.

Navedeni razlozi opredelili su referentne vrednosti za komparaciju rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka u realnom zvučnom polju.

Odstupanja rezultata dobijena korišćenjem različitih mernih metoda su manja za slučaj kada se referentni izvor nalazi na reflektujućoj podlozi, u odnosu na odstupanja kada se izvor nalazi na postolju. Takođe, u većini slučajeva, odstupanja se smanjuju za veća rastojanja mernih tačaka od ose referentnog izvora.

Veća odstupanja rezultata kada se referentni izvor nalazi na reflektujućoj podlozi, kao i pojava u određenim frekvencijskim opsezima negativnih vrednosti intenziteta zvuka, posledica su sledećih činjenica:

- postojanje reflektujućeg talasa se različito manifestuje pri merenju zvučnog pritiska i intenziteta zvuka u zavisnosti od amplitude i faze prostirućih zvučnih talasa;
- direktivnost referentnog izvora utiče da refleksije od podloge budu izraženije i da značajnije utiču na merne rezultate;
- uticaj električnog šuma merne opreme pri merenju intenziteta niskog nivoa na frekvencijama iznad 5kHz.

Korelacija odstupanja i orijentacije izvora prema mernoj tački je znatno manja u odnosu na ostale merne parametre.

Eksperimentalno ispitivanje alternativnog metoda određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije u uslovima realnog zvučnog polja izvršeno je komparacijom dobijenih vrednosti sa referentnim vrednostima.

Dobijeni rezultati ukazuju da se najmanje odstupanje od referentnih vrednosti javlja primenom metode intenziteta zvuka. Najmanja odstupanja se javljaju za mernu tačku koja se nalazi na rastojanju 0.5m od ose referentnog izvora za obe pozicije izvora. Nešto veća odstupanja javljaju se za mernu tačku na rastojanju 0.25m, a najveća za mernu tačku na rastojanju 0.75m. Analiza rezultata pokazuje da je razlog za ovako dobijena odstupanja pozicija merne tačke u odnosu na oblasti zračenja referentnog izvora.

Metodom intenziteta zvuka dobijeni su frekvencijski spektri nivoa zvučnog pritiska emisije izvora koji su za merne tačke 2 i 2' prilično saglasni sa referentnim frekvencijskim spektrom. Nešto veća odstupanja su dobijena u nižem frekvencijskom opsegu do 100Hz i na visokim frekvencijama iznad 5kHz. Razlozi za većim odstupanjima u pomenutim opsezima potiču od karakteristika referentnog izvora koji je namenjen za generisanje zvuka sa stabilnim odzivom u opsegu frekvencija 100Hz÷5kHz. Takođe, indeks reaktivnosti na sasvim niskim i visokim frekvencijama je veći od dinamičkog opsega mernog lanca, tako da se na tim frekvencijama javlja veća greška pri merenju intenziteta zvuka.

8.1.4 Pouzdanost mernih rezultata

Analizom mernih rezultata u funkciju razmatranja uticaja različitih indikatora na pouzdanost rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Indeks reaktivnosti zvučnog polja je najmanji za merne tačke koje se nalaze u direktnoj zoni zračenja izvora, nešto su veće u bliskoj zoni a najveće su u reverberacionoj zoni. Takođe, indeks reaktivnosti je najmanji za frontalnu orijentaciju izvora ka mernoj tački, a najveći za slučaj kada je izvor zadnjom stranom okrenut prema mernoj tački.

- Povećanje indeksa reaktivnosti uslovljava povećanje greške pri merenju intenziteta zvuka. Za vrednosti indeksa reaktivnosti do 8dB, greška se nalazi u opsegu ± 1 dB. Za vrednosti indeksa reaktivnosti u opsegu 8÷10dB, greška se nalazi u opsegu ± 2 dB. Za veće vrednosti indeksa reaktivnosti od 10dB, greška je veća ± 2 dB.
- Poređenjem indeksa difuznosti sa odstupanjima nivoa zvučnog pritiska emisije dobijenih metodom intenziteta zvuka od referentnih vrednosti, dobijaju se konfuzni rezultati. - dok manje vrednosti indeksa difuznosti za najudaljeniju tačku daju najnepreciznije rezultate, najveće vrednosti indeksa difuznosti za najbližu tačku ne daju najpreciznije rezultate. Na ovaj način se pokazuje da je dosta teško ovaj indeks koristiti za ocenu pouzdanosti dobijenih rezultata metodom intenziteta zvuka.
- Veće vrednosti indeksa direktivnosti daju preciznije rezultate, tako da se najprecizniji rezultati dobijaju za slučaj maksimalnih vrednosti indeksa direktivnosti, kada je referentni izvor frontalno usmeren ka mernoj poziciji. Ova činjenica navodi na zaključak da pri određivanju nivoa zvučnog pritiska emisije izvora, izvor treba orijentisati tako da je njegova glavna petlja zračenja usmerena ka mernoj poziciji, što se u nekim slučajevima može poklopiti sa frontalnom orijentacijom izvora.
- Najveće vrednosti nivoa dobijene su za orijentaciju merne sonde ka akustičkom centru referentnog izvora, tako da je veoma bitno orijentisati mernu sondu da registruje maksimalni nivo intenziteta zvuka. To praktično znači da je potrebno primeniti neki metod za identifikaciju pravca u kome se pojavljuje maksimalni nivo intenziteta zvuka.
- Standardna devijacija rezultata dobijenih metodom intenziteta zvuka do frekvencije 630Hz odgovara klasi tačnosti inženjerskih metoda i neznatno se razlikuje od klase tačnosti preciznih metoda, osim za frekvencije ispod 100Hz. Iznad 630Hz standarda devijacija odgovara granicama definisanim za precizne merne metode.
- Prava vrednost nivoa zvučnog pritiska emisije izvora određena metodom intenziteta zvuka može se sa sigurnošću od 95% očekivati u opsegu $\pm 2\sigma$ oko izmerene vrednosti.

8.2 DOPRINOS DISERTACIJE

Dobijeni rezultati u istraživačkom procesu, kao i iskazani zaključci, određuju naučni doprinos urađene disertacije:

- U teorijskom delu istraživanja u sveobuhvatnoj, obimnoj i detaljnoj analizi:
 - izvora buke kroz definisanje mehanizama generisanja buke, matematičku prezentaciju jednopolnih i dipolnih izvora, podelu izvora prema njihovim karakteristikama i definisanje osnovnih parametara za opisivanje akustičke emisije;
 - standardizovanih metoda za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije izvora buke i definisanjem procedura za izbor adekvatne metode u funkciji tipa ispitivanog izvora i raspoloživog mernog okruženja;
 - intenziteta zvuka kao indikatora prostiranja zvučne energije kroz definisanje intenziteta u realnom i kompleksnom domenu i klasifikaciju vektorskih polja u funkciji rotora i divergencije aktivne i reaktivne komponente intenziteta;
 - osnovnih mernih principa i sistema za intenzitet zvuka kroz definisanje dinamičko-frekvencijskog opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka, izvođenjem analitičkih izraza za određivanje donje i gornje granične frekvencije opsega pouzdanog merenja i definisanje procedure za određivanje dinamičkog opsega;

- U eksperimentalnom delu istraživanja metoda za valorizaciju akustičkih procesa u:
 - definisanju metodskih osnova, mernih procedura i njihovoj verifikaciji, uglavnom korišćenjem dobijenih rezultata u istraživačkom procesu, u oblasti:
 - akustičke aktivnosti izvora zvuka (buke);
 - identifikacije dominantnih izvora buke;
 - zvučne izolacije pregradnih konstrukcija;
 - zvučne apsorpcije apsorpcionih materijala;
 - specifične akustičke impedance apsorpcionih materijala;
- U eksperimentalnom delu istraživanja metoda za definisanje akustičke emisije izvora buke u:
 - definisanju alternativnog postupka za određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije aproksimacijom komponentom intenziteta zvuka u pravcu ose dvomikrofonske merne sonde u realnim ambijentalnim uslovima.
 - definisanju merne procedure koja se može aplikovati i u terenskim uslovima, u prostorijama koje po svojim akustičkim karakteristikama ne zadovoljavaju uslove za primenu standardizovanih metoda za merenje nivoa zvučnog pritiska emisije.
 - definisanju preciznosti mernog metoda u funkciji sledećih parametara:
 - pozicije ispitivanog izvora buke,
 - pozicije merne tačke,
 - indeksa reaktivnosti i difuznosti zvučnog polja,
 - indeksa direktivnosti ispitivanog izvora buke i merne sonde za intenzitet zvuka.
 - definisanje merne nesigurnosti koja obezbeđuje da standardna devijacija ponovljivosti mernih rezultata odgovara klasi tačnosti inženjerskih metoda.

Procedure sprovedenog istraživačkog procesa u konačnom su definisali postupak zasnovan na fizičkim zakonima generisanja i prenosa zvučne energije, koji brzo, precizno i pouzdano omogućuje određivanje nivoa zvučnog pritiska emisije buke koja nastaje u procesu eksploatacije izvora buke, u eksploatacionim uslovima i u realnim ambijentima gde su izvori smešteni.

8.3 PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

Definisani postupak određivanja nivoa zvučnog pritiska emisije merenjem intenziteta zvuka dvomikrofonskom procedurom omogućuje dalja istraživanja u pravcu:

I. Verifikacije definisanog postupka kroz primenu sledeće merne procedure na različite tipove izvora buke u različitim mernim okruženjima:

1. Merenje komponente intenziteta zvuka dvomikrofonskom sondom.

Ukoliko drugačije nije određeno test-kodom za ispitivani izvor buke, komponenta intenziteta zvuka određuje se u mernoj tački koja je locirana u direktnoj zoni zračenja izvora buke, na rastojanjima manjim od graničnog radijusa mernog okruženja.

Mernu sondu treba orijentisati ka akustičkom centru referentnog izvora, tako da registruje maksimalni nivo intenziteta zvuka na definisanoj poziciji. Može se primeniti nulti metod za identifikaciju pravca u kome se pojavljuje maksimalni nivoa intenziteta zvuka.

Ispitivani izvor treba orijentisati tako da je njegova glavna petlja zračenja usmerena ka mernoj poziciji, što se u nekim slučajevima može poklopiti sa frontalnom orijentacijom izvora.

Ispitivani izvor treba da bude lociran na reflektujućoj podlozi, ukoliko uslovi instaliranja i montiranja ne zahtevaju drugačiju lokaciju izvora.

2. **Određivanje vremenske promenljivosti zvučnog polja indikatorom F_I**

Indikator treba da zadovolji kriterijum da je njegova vrednost manja od 0.6. Ukoliko to nije slučaj, treba povećati vreme merenja ili meriti intezitet zvuka u periodu manje promenljivosti zvučnog polja.

3. **Određivanje indeksa reaktivnosti zvučnog polja indikatorom δ_{pl}**

Indikator treba da zadovolji kriterijum da je njegova vrednost manja od dinamičkog opsega mernog lanca koji se određuje u proceduri kalibracije. Ukoliko to nije slučaj, treba smanjiti rastojanje merne tačke do izvora buke, pri čemu treba voditi računa da se tačka ne locira u bliskoj zoni zračenja izvora buke.

4. **Određivanje preciznosti mernih rezultata.**

Preciznost mernih rezultata određuje se na osnovu indeksa reaktivnosti zvučnog polja. Za vrednosti indeksa reaktivnosti do 8dB, standardna devijacija je manja od 1dB, što odgovara klasi preciznih mernih metoda. Za vrednosti indeksa reaktivnosti u opsegu 8÷10dB, standardna devijacija je manja od 2dB, što odgovara klasi inženjerskih mernih metoda. Za veće vrednosti indeksa reaktivnosti od 10dB, standardna devijacija je veća od 2dB, što odgovara klasi preglednih metoda.

5. **Određivanje vrednosti nivoa zvučnog pritiska emisije.**

Prava vrednost nivoa zvučnog pritiska emisije izvora određena metodom intenziteta zvuka može se sa sigurnošću od 95% očekivati u opsegu

$$L'_p = L_I \pm 2\sigma.$$

II. **Primene definisanog postupka pri određivanju direktivnosti zračenja ispitivanih izvora buke.**

III. **Primene definisanog postupka u korelacionoj analizi parametara akustičke emisije izvora buke i mehanizama generisanja buke u cilju formiranja matematičkog modela izvora buke.**

LITERATURA

**PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA**

MR MOMIR PRAŠĆEVIĆ, DIPL. ING. EL.

DOKTORSKA DISERTACIJA

-
- [1] Anon: "Characteristics of microphone pairs and probes for sound intensity measurement", *Technical report*, Brüel&Kjær, Denmark, 1987
 - [2] Beranek L.L.: *Acoustics*, Mc Graw Hill Book Company Inc., New York, 1977
 - [3] Beranek L.L.: *Noise and Vibration Control*, Mc Graw Hill Book Company Inc., New York, 1971
 - [4] Bobrovnitskii Y.I.: "Modeling and characterization of airborne noise sources", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, 2003, 527-555
 - [5] Besancenez M., Marconnet P., Pavan A.: "Use of sound intensity in conditional maintenance", *The proceedings of Euronoise 98*, München, 1998, 769-774
 - [6] Bronuzzi F., Cigna C., Patrucco M., Sassone M.: "Sound power emission measurement and control on a 300t hydraulic press", *The proceedings of 16th ICA, USA*, 1998, 1869-1870
 - [7] Chalupova M., Sobotkova K.: "Acoustic Source Location and Identification", *Proceedings of the Conference on Noise Control Engineering*, Krakow, 1988, 247-250
 - [8] Cutanda V., Juhl P.M., Jacobsen F.: "A numerical investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies", *Proceeding of Fourth International Congress on Sound and Vibration*, St. Petersburg, Russia, 1996, 1897-1904
 - [9] Cvetković D., Praščević M.: "Acoustic emission valorization of noise sources", *The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy*, 2001, ID: 3C.11.02
 - [10] Cvetković D., Praščević M.: *Buka i vibracije - zbirka zadataka sa teorijskim osnovama*, Izdavačka jedinica Univerziteta u Nišu, Niš, 1998
 - [11] Cvetković D., Praščević M.: "Estimation of flanking transmission by sound intensity", *The proceedings of 15th Yugoslav and 3rd International Conference "Noise and vibration"*, Faculty of occupational Safety of University of Niš, Niš, 1995
 - [12] Cvetković D., Praščević M.: "Sound intensity as a function of partition sound insulation", *Journal de Physique IV, Colloque C5, supplement au Journal de Physique III*, Vol. 4, 1994, 155-158
 - [13] Cvetković D., Praščević M.: "Definisanje zvučne izolacije metodom intenziteta", *Zbornik radova 14. jugoslovenske i 2. međunarodne konferencije "Buka i vibracije u radnoj i životnoj sredini"*, Fakultet zaštite na radu Univerziteta u Nišu, Niš, 1993
 - [14] Cvetković D., Uzunović R., Praščević M.: "Comparative analysis of applicable methods of sound power determination", *Proceedings of 14th ICA, Beijing*, 1992 E4-1
 - [15] Druyvesteyn W.F., Bree H.E.: "Intensity measurements in various rooms / a new intensity probes", *The proceedings of 16th ICA, USA*, 1998, 2827-2828
 - [16] EC Council Directive 2000/14/EC of 8 May 2000 on the approximation of the laws of the Member States relating to the noise emission in the environment by equipment for use outdoors
 - [17] EC Council Directive 86/594/EEC of 14 June 1989 on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery
 - [18] EC Council Directive 89/392/EEC of 1 December 1986 on airborne noise emitted by household appliances
 - [19] European Commission Green Paper: "Future Noise policy", Brussels, 1996
 - [20] Fahy F.J.: *Sound intensity*, E&FN Spon, London, 1995
 - [21] Frederiksen E.: "Phase Characteristics of Microphones for Intensity Probes", *Intensity Measurement*, Brüel&Kjær, Denmark, 1988, 50-57
 - [22] Frederiksen E.: "Acoustic calibrator for intensity measurements systems", *Technical review*, No. 4, Brüel&Kjær, Denmark, 1987, 36-42
 - [23] Frederiksen E., Schultz O.: "Pressure microphones for intensity measurements with significantly improved phase properties", *Technical review*, No. 4, Brüel&Kjær, Denmark, 1986, 11-23

-
- [24] Furue Y., Miyake K., Konaya K.: "Approximate calculation of sound intensity radiated through an aperture from a source in a room", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5D.07.02
- [25] Gade S.: "Validity of Intensity Measurements in Partially Diffuse Sound Fields", Technical Review, No. 4, Brüel&Kjær, Denmark, 1985, 3-31
- [26] Gade S.: "Sound intensity (Theory)", Technical Review, No. 3, Brüel&Kjær, Denmark, 1982, 3-39
- [27] Gade S.: "Sound intensity (Instrumentation & Applications)", Technical Review, No. 4, Brüel&Kjær, Denmark, 1982, 3-32
- [28] Hüber G., Wittstock V.: "Investigation into the correlation between field indicators and sound absorption", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5A.09.06
- [29] Hüber G., Gerlach A.: "Determination of emission sound pressure levels using three-component sound intensity measurements", The proceedings of Euronoise 98, München, 1998, 807-811
- [30] Hynna P.: Applications of the intensity technique to ship structures: sound absorption, radiation and transmission loss, Technical Research Centre of Finland, Finland, 1990
- [31] ISO 3745: Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms, 1977
- [32] ISO 4871: Acoustics - Declaration and verification of noise emission values of machinery and equipment, 1996
- [33] ISO 7574: Acoustics - Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment, 1985
- [34] ISO 9614-1: Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Measurement at discrete points, 1993
- [35] ISO 9614-2: Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Measurement by scanning, 1996
- [36] ISO 11200: Acoustics - Noise emitted by machinery and equipment - Guidelines for the use of the basic standards for determination of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions, 1995
- [37] ISO 11201: Acoustics - Noise emitted by machinery and equipment - Measurement of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions - Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane, 1995
- [38] ISO 11202: Acoustics - Noise emitted by machinery and equipment - Measurement of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions - Survey method in situ, 1995
- [39] ISO 11203: Acoustics - Noise emitted by machinery and equipment - Measurement of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions from the sound power level, 1995
- [40] ISO 11204: Acoustics - Noise emitted by machinery and equipment - Measurement of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions - Method requiring environmental corrections, 1995
- [41] ISO 11689: Acoustics - Procedure for the comparison of noise emission data for machinery and equipment, 1996
- [42] Jacobsen F.: "State of art of sound intensity and its measurement and applications", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5KN1.02
- [43] Jacobsen F.: "Random errors in sound intensity estimation", JASA, Vol. 103, No. 2, 1998, 953-961
- [44] Jacobsen F.: "Sound intensity measurement at low levels", Journal of Sound and Vibration, No. 166, 1993, 195-207

- [45] Jacobsen F., Cutanda V., Juhl P.M.: "A sound intensity probe for measuring from 50Hz do 10kHz", Technical Review, No. 1, Brüel&Kjær, Denmark, 1996, 1-9
- [46] Jacobsen F., Cutanda V., Juhl P.M.: "A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies", Journal of Sound and Vibration, Vol. 128, No. 2, 1989, 247-257
- [47] Jacobsen F.: "A note on instantaneous and time-averaged active and reactive intensity", Journal of Sound and Vibration, No. 147, 1991, 489-496
- [48] Jacobsen F.: "Active and reactive sound intensity in a reverberation sound field", Journal of Sound and Vibration, No. 143, 1990, 231-240
- [49] Jacobsen F.: "Active and reactive, coherent and incoherent sound fields", Journal of Sound and Vibration, Vol. 130, No. 3, 1989, 493-507
- [50] Johansson Ö.: "A method to minimize the effect of random error when measuring intensity vector fields in narrow bands", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5A.09.03
- [51] Keith S.E., Krishnappa G., Chiu V.: "The potential for extending the frequency range of sound intensity standards", The proceedings of Euronoise, Naples, 2003, paper ID:169
- [52] Koyasu M.: "Japanese industrial standards for the determination, declaration and verification of noise emitted from machinery and equipment - state of the arts", The proceedings of Internoise 2000, Nice, France, 2000, paper ID: 563
- [53] Kurtović H.: Osnovi tehničke akustike, Naučna knjiga, Beograd, 1990
- [54] Larsen P., Manvell D.: "Demystifying sound power measurements with sound intensity", The proceedings of 16th ICA, USA, 1998, 775-776
- [55] Li J.F., Pascal J.C.: "Energy fields of partially coherent sources", JASA, Vol. 103, No. 2, 1998, 962-972
- [56] Mijić M., Šumarac D.: Elektroakustika, <http://telekomunikacije.etf.bg.ac.yu/predmeti/te4e>
- [57] Mijić M., Šumarac D.: Audiotehnika, <http://telekomunikacije.etf.bg.ac.yu/predmeti/te5aus>
- [58] Milošević M., Kurtović H.: Elektroakustika, Izdavačka jedinica Univerziteta u Nišu, Niš, 1996
- [59] Milošević M., Cvetković D., Prašćević M.: "Određivanje specifične akustičke impedance", Zbornik radova 39. konferencije ETRAN, Društvo za ETRAN, Zlatibor, 1995, 548-551
- [60] Milošević M., Nikolić J.: "Anehoična prostorija Elektronskog fakulteta u Nišu", Elektrotehnika, Vol. 32, No. 4, 1983, 617-620
- [61] Ognjanović M.: Generisanje buke u mašinskim sistemima, Mašinski fakultet Univeziteta u Beogradu, Beograd, 1995
- [62] Mondot J.M., Petersoon B: "Characterization of structure-borne sound sources: the source descriptor and the coupling function", Journal of Sound and Vibration, Vol. 114, No.1, 1987, 507-518
- [63] Pascal J.C., Li J.F.: "Irrotational Acoustic intensity and Boundary values", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5A.09.01
- [64] Pascal J.C., Carkes C.: "Systematic measurement errors with two microphone sound intensity meters", Journal of Sound and Vibration, Vol. 83, No.1, 1988, 53-65
- [65] Prašćević M., Cvetković D.: "Proširenje frekvencijskog opsega pouzdanog merenja intenziteta zvuka", Zbornik radova 47. konferencije ETRAN, Vol. 2, Društvo za ETRAN, Herceg Novi, 2003, 452-455
- [66] Prašćević M., Cvetković D., Mihajlov D.: "Komparativna analiza metoda za određivanje emisije nivoa buke", Zbornik radova 1. konferencije sa međunarodnim

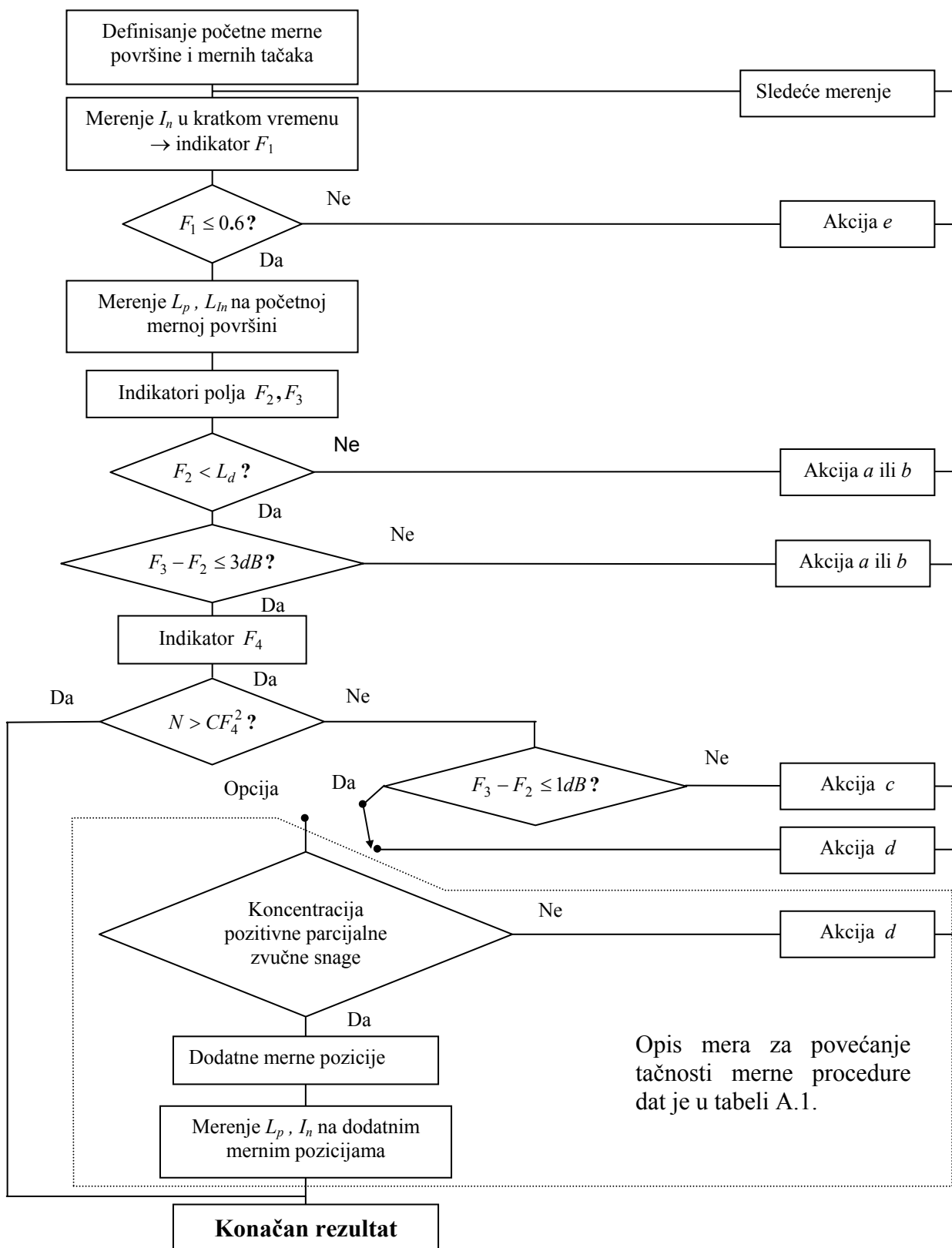
- učesćem "Ocena profesionalnog rizika - teorija i praksa", Fakultet zaštite na radu Univerziteta u Nišu, Niš, 2003
- [67] Prašćević M.: "Acoustic emission valorization of tyres by sound intensity method", Facta Universitatis, Series: Working and Living Environment Protection, Vol. 2, No. 2, University of Niš, Niš, 2002
- [68] Prašćević M., Cvetković D., Mihajlov D.: "Metode za valorizaciju emisije buke usled interakcije pneumatika i podloge", Zbornik radova 18. konferencije sa međunarodnim učesćem "Buka i vibracije", Fakultet zaštite na radu Univerziteta u Nišu, Niš, 2002, 15(1-11)
- [69] Prašćević M., Cvetković D., Mihajlov D.: "Valorizacija akustičke emisije mašinskih sistema metodom intenziteta zvuka", Zbornik radova sa naučno-stručnog "IRMES 2002", Mašinski fakultet Srpsko Sarajevo, Jahorina, 2002, 571-576
- [70] Prašćević M., Cvetković D., Mihajlov D.: "Intenzitet zvuka u funkciji identifikacije dominantnih izvora buke složenih mašinskih sistema", Zbornik radova (CD) sa seminara "Tehnička dijagnostika 2001", DP "OMO", Donji Milanovac, 2001
- [71] Prašćević M., Cvetković D.: "Diagnostics of acoustic processes by intensity measurement", Facta Universitatis, Series: Working and Living Environment Protection, Vol. 1, No. 2, University of Niš, Niš, 1997
- [72] Prašćević M.: "Determination of characteristics of absorption materials in regular shape room", The proceedings of Fourth International Congress on Sound and Vibration, Vol. 3, St. Petersburg, Russia, 1996, 1905-1912
- [73] Prašćević M., Cvetković D., Milutinović S.: "Jednobrojno izražavanje zvučne apsorpcije materijala", Zbornik radova 40. konferencije ETRAN, Društvo za ETRAN, Budva, 1996, 619-623
- [74] Prašćević M., Milošević M., Cvetković D.: "Komparativna analiza izmerenih vrednosti koeficijenta apsorpcije zvuka", Zbornik radova 39. konferencije ETRAN, Društvo za ETRAN, Zlatibor, 1995, 552-555
- [75] Prašćević M., Milošević M., Cvetković D.: "Rating of Sound Absorption by Intensity Measurement", The proceedings of 30th International Acoustics Conference, Slovakia, 1995, 199-205
- [76] Prašćević M.: "Određivanje akustičkih karakteristika apsorpcionih materijala merenjem intenziteta zvuka, magistarska teza, Elektronski fakultet Univerziteta u Nišu, 1994
- [77] Prašćević M., Cvetković D.: "Intenzitet zvuka u dijagnostici akustičkih procesa", Zbornik radova naučnog skupa "Preventivno iženjerstvo i informacione tehnologije", Fakultet zaštite na radu Univerziteta u Nišu, Niš, 1994, 52-1:4
- [78] Prašćević M., Milošević M., Cvetković D.: "Merenje vremena reverberacije realno-vremenskim analizatorom", Zbornik radova 38. konferencije ETRAN, Društvo za ETRAN, Niš, 1994, 209-210
- [79] Prašćević M., Cvetković D.: "Određivanje koeficijenta apsorpcije merenjem zvučnog intenziteta", Zbornik radova 37. konferencije ETAN, Društvo za ETAN, Beograd, 1993, 155-160
- [80] Prašćević M., Cvetković D.: "Identifikacija zvučnog izvora kao faktor ciljanog projektovanja zvučne zaštite", Zbornik radova 36. konferencije ETAN, Društvo za ETAN, Kopaonik, 1992, 135-142
- [81] Pravica P., Bagarić I.: Metrologija električnih veličina (opšti deo), Nauka, Beograd, 1993
- [82] Probst W.: "Experience with ISO 11200 series and possibilities of improvement", The proceedings of Euronoise, Naples, 2003, paper ID:086
- [83] Randall R. B.: Frequency analysis, Bruel&Kjaer, 1987

-
- [84] Rasmussen G., Brock M.: "Transducers for intensity measurements", Intensity Measurement, Brüel&Kjær, Denmark, 1988, 40-43
- [85] Rasmussen G.: "Intensity measurements", Proceedings of the 13th ICA, Belgrade, 1989, 3-14
- [86] Rasmussen P.: "Measuring intensity", Intensity Measurement, Brüel&Kjær, Denmark, 1988, 1-10
- [87] Rasmussen P.: "Phase Errors in Intensity Measurement", Intensity Measurement, Brüel&Kjær, Denmark, 1988, 11-18
- [88] Rasmussen P.: "Source location using vector intensity measurement", Intensity Measurement, Brüel&Kjær, Denmark, 1988, 72-84
- [89] Sehrudt G.A., Hoppe G.: "Choice or change? Remarks on test environments for machinery noise emission measurements", The proceedings of Internoise 2000, Nice, France, 2000, paper ID: 132
- [90] Serafettinoglu H.: "Noise labeling of electrical Home appliances and some practical considerations", The proceedings of Euronoise, Naples, 2003, paper ID:535
- [91] Simonović M., Kalić D., Pravica P.: Buka - štetna dejstva, merenje i zaštita, Institut za dokumentaciju zaštite na radu "Edvard Kardelj", Niš, 1982
- [92] Stanzial D., Bonsi D.: "An indicator based on modal intensity for testing the influence of the environment on the sound power of an acoustic source", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5A.09.04
- [93] Suzuki H.: "Time-dependent sound intensity measurement methods", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5A.09.05
- [94] Tachibana H., Suzuki H.: "ISO standards on sound power determination by sound intensity method", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5B.07.01
- [95] Tachibana H., Suzuki H.: "Procedures for the precision sound power determination by S.I. scanning method", The proceedings of 16th ICA, USA, 1998, 1459-1460
- [96] Uosukainen S.: Properties of acoustic energy quantities, Technical Research Centre of Finland, Finland, 1989
- [97] Uzunović R.: Zaštita od buke i vibracija: menadžment kvalitetom i okolinom, Lola Institut, Beograd, 1997
- [98] Veličković D.: Buka u životnoj sredini, Grafičko preduzeće "Punta", Niš, 1999
- [99] Veličković D.: Buka i vibracije II, Prosveta, Izdavačka jedinica Univerziteta u Nišu, Niš, 1990
- [100] Veličković D.: Buka i vibracije I, Prosveta, Izdavačka jedinica Univerziteta u Nišu, Niš, 1986
- [101] Vigran T. E.: "Acoustic Intensity - Energy Density Ratio: an Index for Detecting Deviations from Ideal Fields Conditions", Journal of Sound and Vibration, Vol. 127, No. 2, 1988, 343-351
- [102] Watkinson P. S.: "The practical assessment of errors in sound intensity measurements", Journal of Sound and Vibration, Vol. 105, No. 2, 1989, 247-257
- [103] Yun Z., Dian Xh.: "The study of sound field reactivity and sound intensity measurement", The proceedings of the Conference on Noise Control Engineering, Cracow, 1988, 421-424
- [104] Yano H., Tachibana H., Suzuki H.: "Experimental study on the accuracy of sound power determination by sound intensity using artificial complex sound sources", The proceedings of 17th ICA, Rome, Italy, 2001, ID: 5D.07.01
- [105] Yano H., Tachibana H., Suzuki H.: "Experimental study on the accuracy of sound power determination of S.I. scanning method", The proceedings of 16th ICA, USA, 1998, 1461-1462

PRILOG

ODREĐIVANJE ZVUČNE SNAGE METODOM INTENZITETA ZVUKA - ALGORITMI
ODREĐIVANJE ZVUČNE SNAGE ZUPČASTE PUMPE METODOM INTENZITETA ZVUKA
ODREĐIVANJE NIVOVA ZVUČNE SNAGE REFERENTNOG IZVORA
NIVO ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE IZVORA - MERNO OKRUŽENJE MO1
NIVO ZVUČNOG PRITISKA EMISIJE IZVORA - MERNO OKRUŽENJE MO2

PRILOG RAZVOJU METODE ZA VALORIZACIJU AKUSTIČKE EMISIJE IZVORA BUKE
DVOMIKROFONSKOM PROCEDUROM MERENJA INTENZITETA ZVUKA U REALNIM USLOVIMA



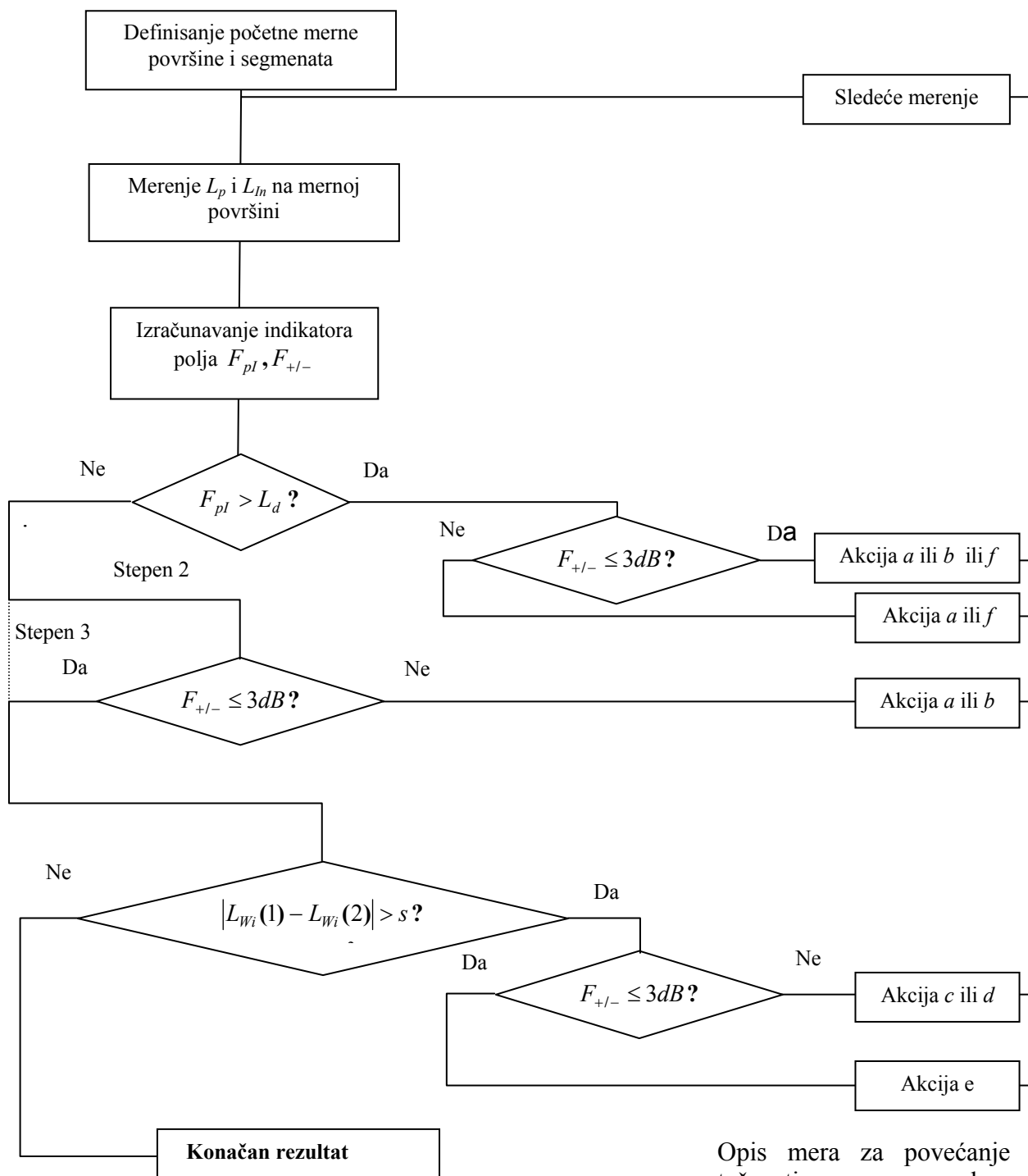
SI. A.1 Algoritam za određivanje nivoa zvučne snage metodom merenja intenziteta zvuka u diskretnim tačkama [34]

Tabela A.1 Mera za povećanje stepena tačnosti procedure određivanja zvučne snage primenom ISO 9614-1 [34]

Kriterijum	Kod	Mera
$F_1 > 0.6$	e	Smanjenje vremenske promenljivosti spoljnog intenziteta ili merenje u toku perioda manje promenljivosti ili povećanje mernog perioda na svakoj poziciji.
$F_2 \geq L_d$ ili $F_3 - F_2 \geq 3dB$	a	U prisustvu značajne pozadinske buke i/ili jake reverberacije, smanjenje rastojanja od merne površine do izvora na minimalno srednje rastojanje od 0.25m. U odsustvu značajnih spoljnih izvora buke i/ili jake reverberacije, povećanje srednjeg mernog rastojanja na 1m.
	b	Zaštita merne površine od spoljnih izvora buke ili smanjenje refleksija ka izvoru.
kriterijum 2 nije zadovoljen i $1dB < F_3 - F_2 \leq 3dB$	c	Povećanje gustine mernih tačaka uniformno da bi zadovoljili kriterijum 2.
Kriterijum 2 nije zadovoljen i $F_3 - F_2 \leq 1dB$	d	Povećanje srednjeg rastojanja merne površine od izvora uz isti broj mernih tačaka ili povećanje broja mernih tačaka na istoj površini.

Tabela A.2 Vrednosti faktora C (ISO 9614-1) [34]

Centralna frekvencija [Hz]		C		
oktavnih pojaseva	tercnih pojaseva	klasa 1	klasa 2	klasa 3
63-125	50-160	19	11	
250-500	200-630	29	19	
1000-4000	800-5000	57	29	
	6300	19	14	
A-ponderisani nivo (50Hz-6.3kHz)				8



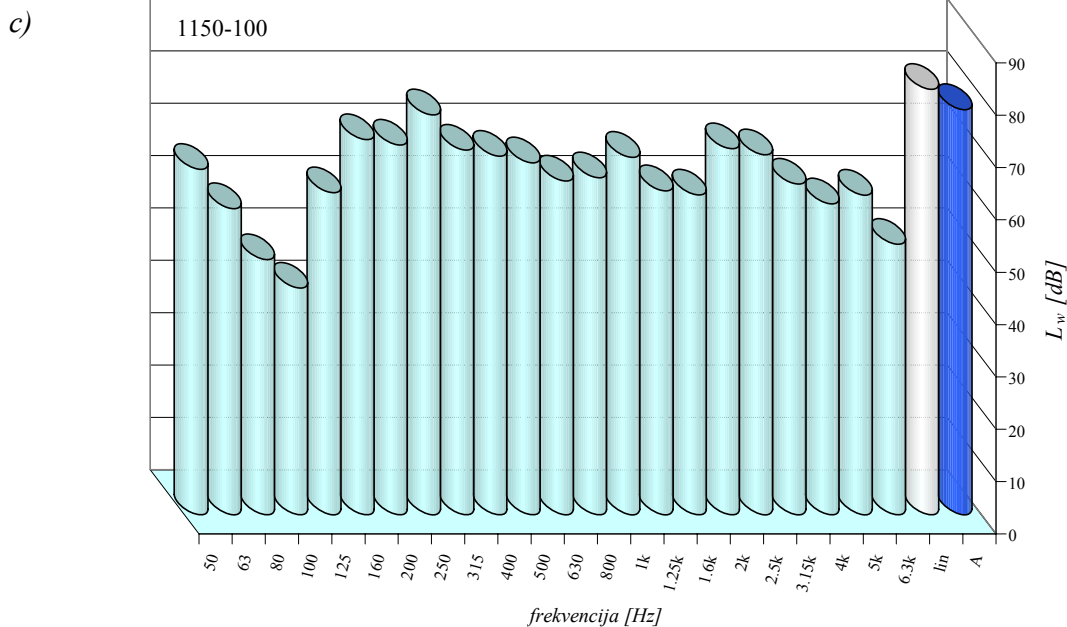
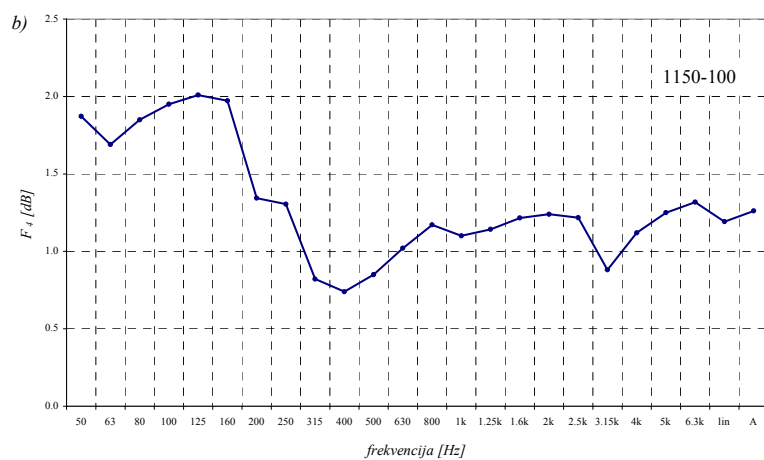
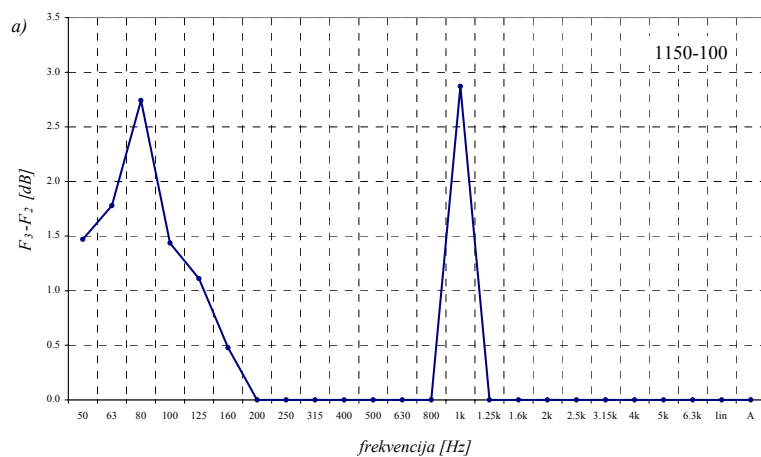
Sl. A.2 Algoritam procedure za određivanje nivoa zvučne snage metodom merenja intenziteta zvuka skeniranjem segmenata merne površine [20,35]

Tabela A.3 *Mere za povećanje stepena tačnosti procedure određivanja zvučne snage primenom ISO 9614-2 [35]*

Kriterijum	Kod	Mera
$F_{pl} > L_d$ $F_{+/-} > 3 \text{ dB}$	a	Smanjiti na pola rastojanje merne površine od izvora na ne manje od 100mm i duplirati gustinu linija skeniranja
	b	Zaštita merne površine od jakih spoljnih izvora buke posredstvom ekrana.
	f	Smanjenje negativnog uticaja reverberantnog zvučnog polja uvođenjem dodatne apsorpcije u test prostor na lokacijama udaljenim od izvora.
$F_{pl} > L_d$ $F_{+/-} \leq 3 \text{ dB}$	a	Smanjiti na pola rastojanje merne površine od izvora na ne manje od 100mm i duplirati gustinu linija skeniranja
	f	Smanjenje negativnog uticaja reverberantnog zvučnog polja uvođenjem dodatne apsorpcije u test prostor na lokacijama udaljenim od izvora.
$ L_{wi}(1) - L_{wi}(2) > s$	c	Identifikovanje u uklanjanje uzroka vremenske promenljivosti polja.
	d	Dupliranje gustine linija skeniranja na istom segmentu.
$ L_{wi}(1) - L_{wi}(2) > s$ i $F_{+/-} \leq 1 \text{ dB}$	f	Dupliranje srednjeg rastojanja merne površine od izvora zadržavajući istu gustinu linija skeniranja.

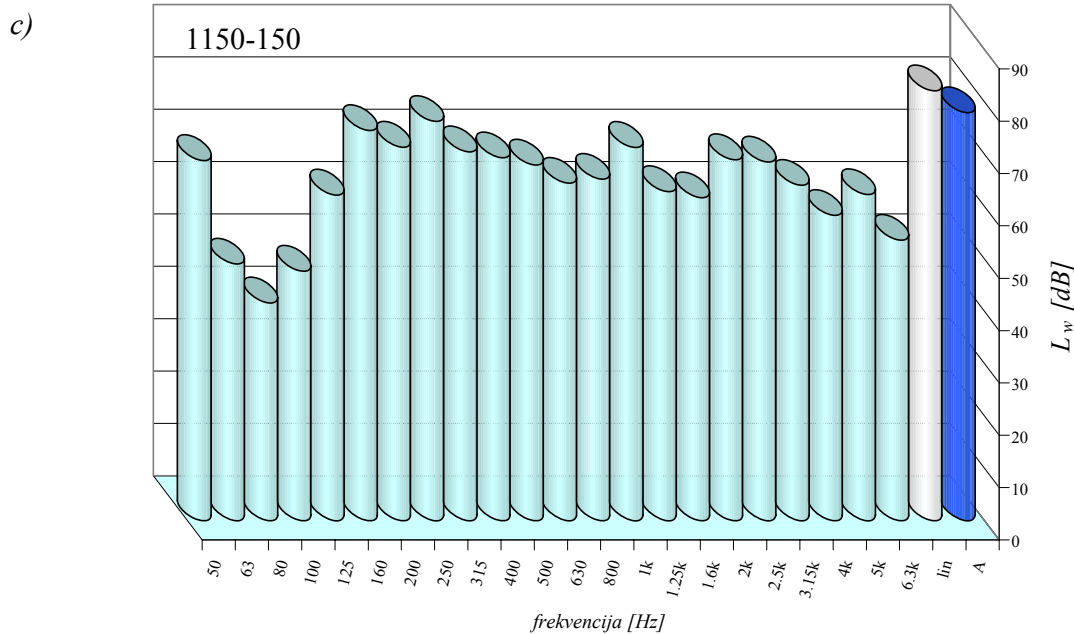
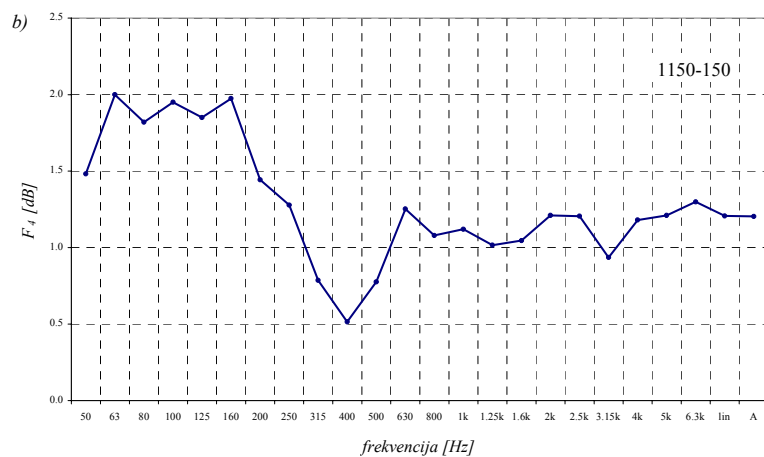
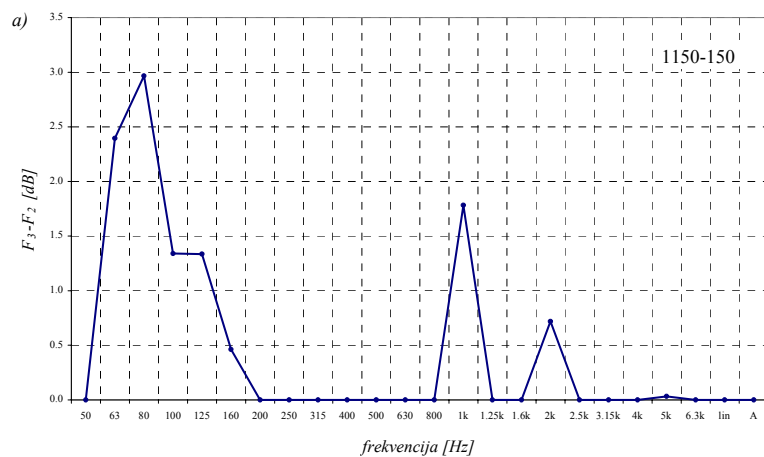
Tabela B.1 *Nivo zvučne snage zupčaste pumpe 3155.503.95Č u [dB] za različite režime rada, određen metodom merenja intenziteta zvuka u diskretnim mernim tačkama*

f [Hz]	režim rada zupčaste pumpe (n/p [min ⁻¹ /bar])					
	1150-100	1150-150	1150-200	1900-100	1900-150	1900-200
50	66.0	68.8	66.3	66.6	67.1	65.6
63	58.5	49.0	53.5	62.8	64.8	63.5
80	48.7	41.6	51.2	45.0	42.0	53.9
100	43.3	47.7	57.5	52.9	54.9	60.1
125	61.5	62.2	63.0	65.6	68.1	70.1
160	71.7	74.5	77.5	67.9	67.2	66.4
200	70.6	71.4	73.9	65.8	65.7	74.0
250	76.4	76.3	75.3	82.3	82.1	81.9
315	69.7	70.5	70.9	70.1	69.6	72.9
400	68.5	69.3	69.0	75.3	74.2	74.8
500	67.2	68.0	67.3	69.3	70.3	70.0
630	63.7	64.5	65.3	68.3	68.8	69.5
800	64.4	65.2	62.0	71.3	71.0	65.5
1000	68.3	71.3	71.7	73.3	73.9	74.6
1250	61.9	62.9	63.6	65.1	65.4	66.0
1600	61.1	61.7	62.4	64.9	65.5	66.0
2000	69.9	69.0	69.2	71.4	69.9	68.8
2500	68.8	68.5	68.6	69.4	68.9	68.4
3150	63.1	64.1	64.1	63.2	63.2	63.4
4000	59.4	58.3	57.9	62.4	62.9	63.4
5000	61.0	62.3	62.1	64.6	66.1	67.3
6300	51.6	53.6	57.2	60.6	62.3	63.6
L	81.3	82.1	82.6	85.1	85.8	86.3
A	77.4	77.9	78.4	80.9	81.5	82.1



	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	lin	A
L _w	66.0	58.5	48.7	43.3	61.5	71.7	70.6	76.4	69.7	68.5	67.2	63.7	64.4	68.3	61.9	61.1	69.9	68.8	63.1	59.4	61.0	51.6	81.3	77.4

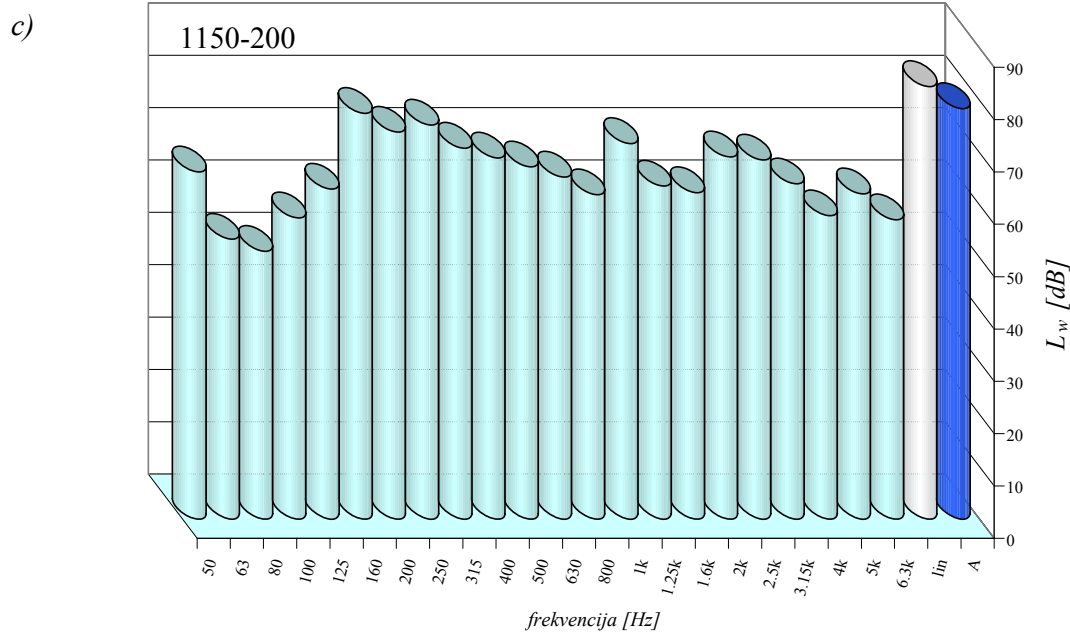
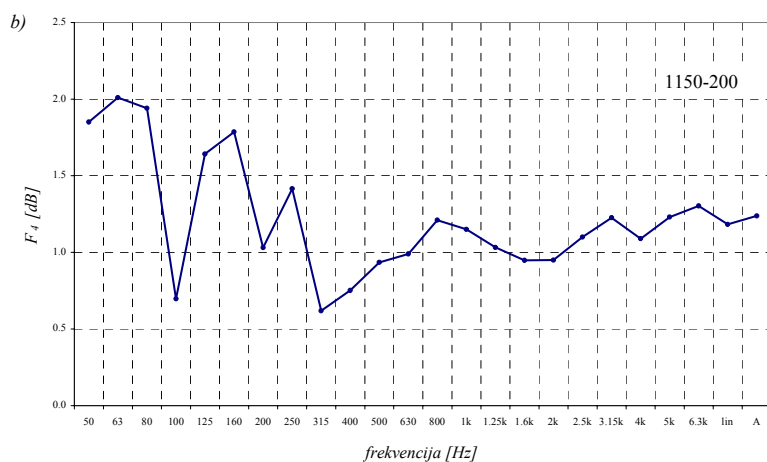
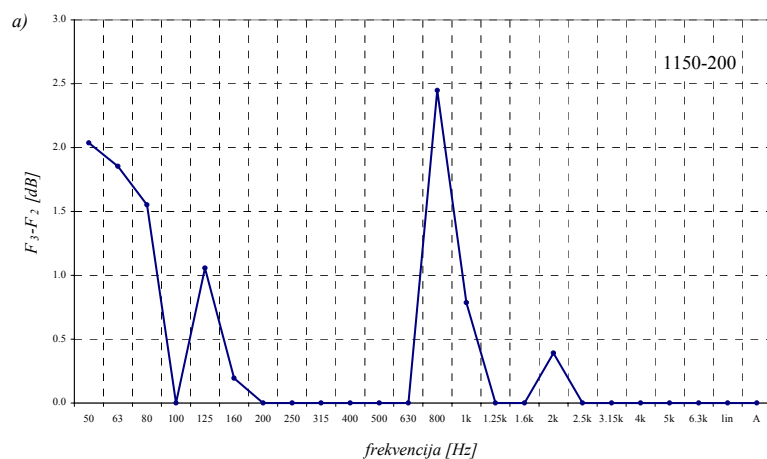
Sl. B.1 Režim ispitivanja pumpe – broj obrtaja 1150/min, pritisak 100bara
 a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage;
 b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage



	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	lin	A
L_w	68.8	49.0	41.6	47.7	62.2	74.5	71.4	76.3	70.5	69.3	68.0	64.5	65.2	71.3	62.9	61.7	69.0	68.5	64.1	58.3	62.3	53.6	82.1	77.9

Sl. B.2 Režim ispitivanja pumpe – broj obrtaja 1150/min, pritisak 150bara

- a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage;
 b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage

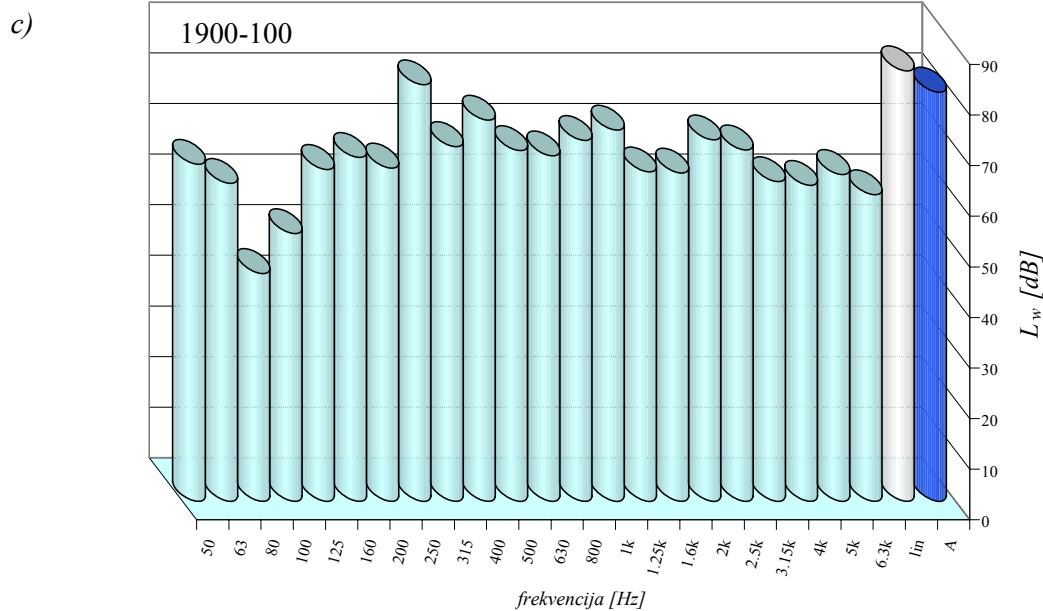
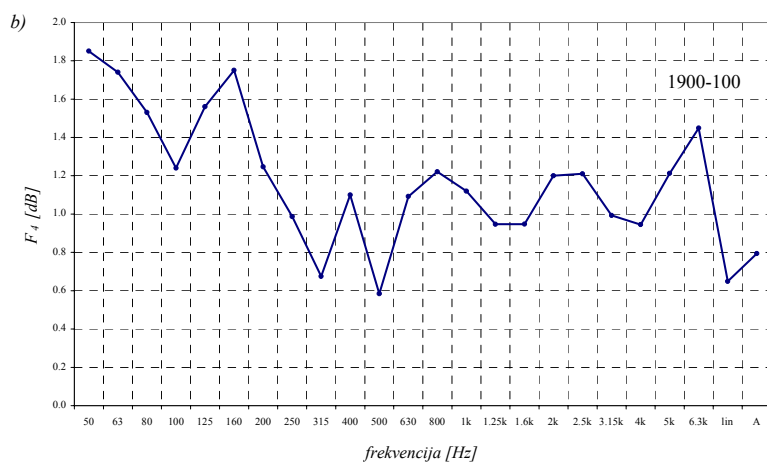
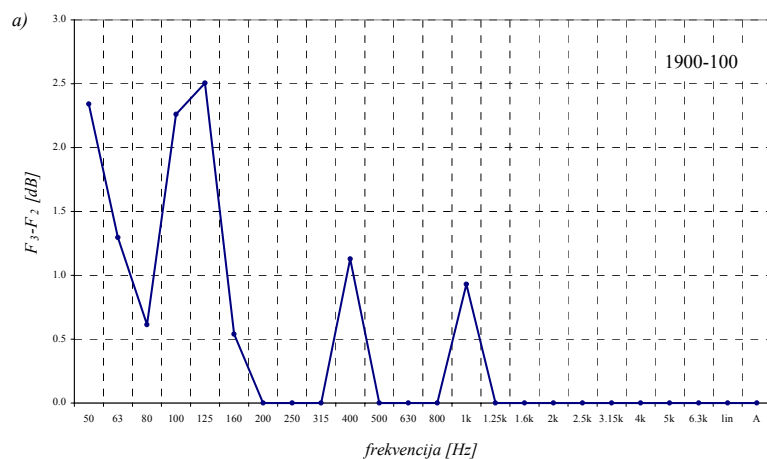


	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	lin	A
L_w	66.3	53.5	51.2	57.5	63.0	77.5	73.9	75.3	70.9	69.0	67.3	65.3	62.0	71.7	63.6	62.4	69.2	68.6	64.1	57.9	62.1	57.2	82.6	78.4

Sl. B.3 Režim ispitivanja pumpe – broj obrtaja 1150%/min, pritisak 200bara

a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage;

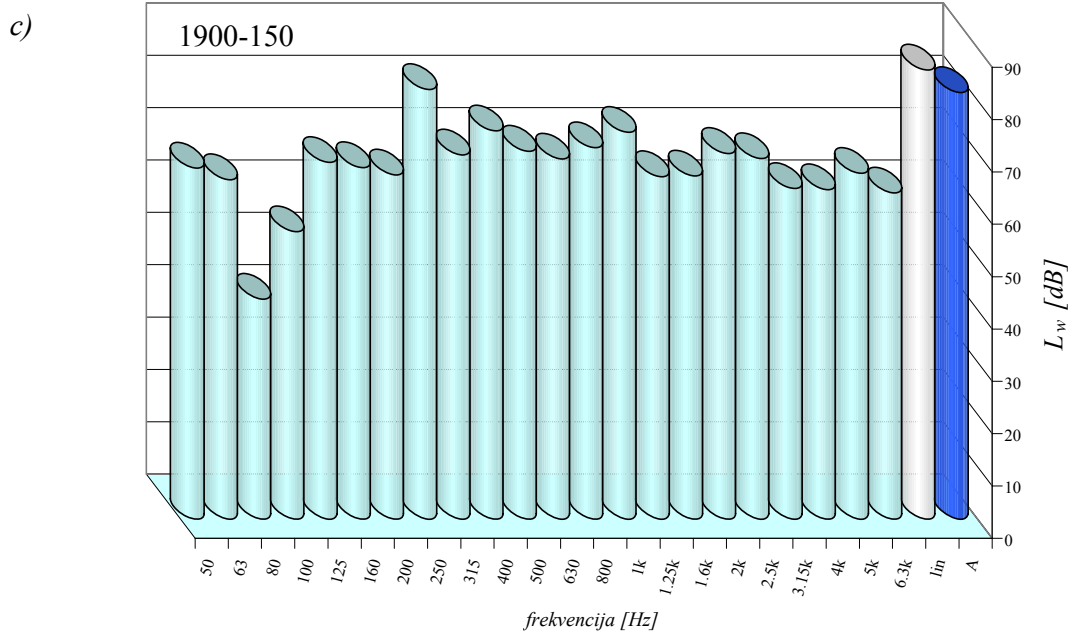
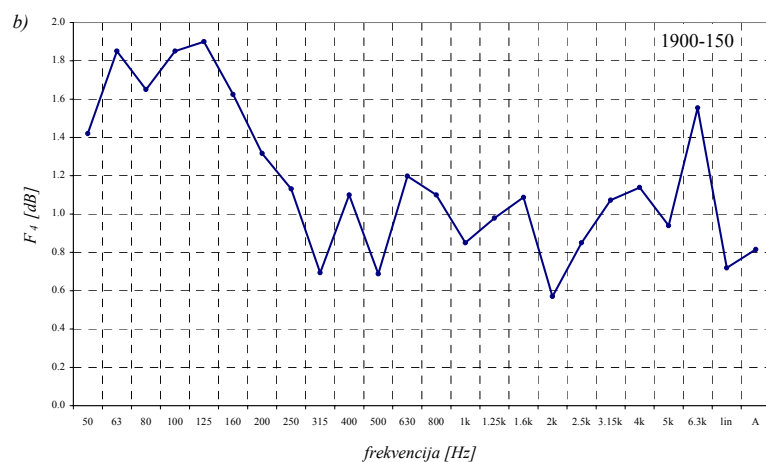
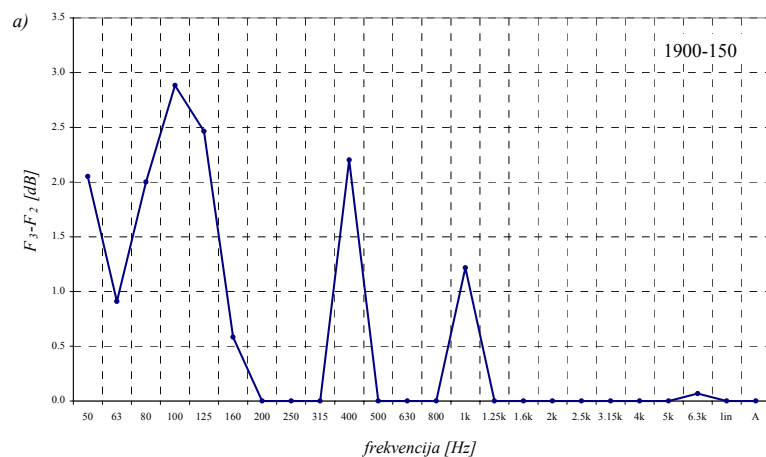
b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage



	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	lin	A
L_w	66.6	62.8	45.0	52.9	65.6	67.9	65.8	82.3	70.1	75.3	69.3	68.3	71.3	73.3	65.1	64.9	71.4	69.4	63.2	62.4	64.6	60.6	85.1	80.9

Sl. B.4 Režim ispitivanja pumpe – broj obrtaja 1900/min, pritisak 100bara

- a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage;
 b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage

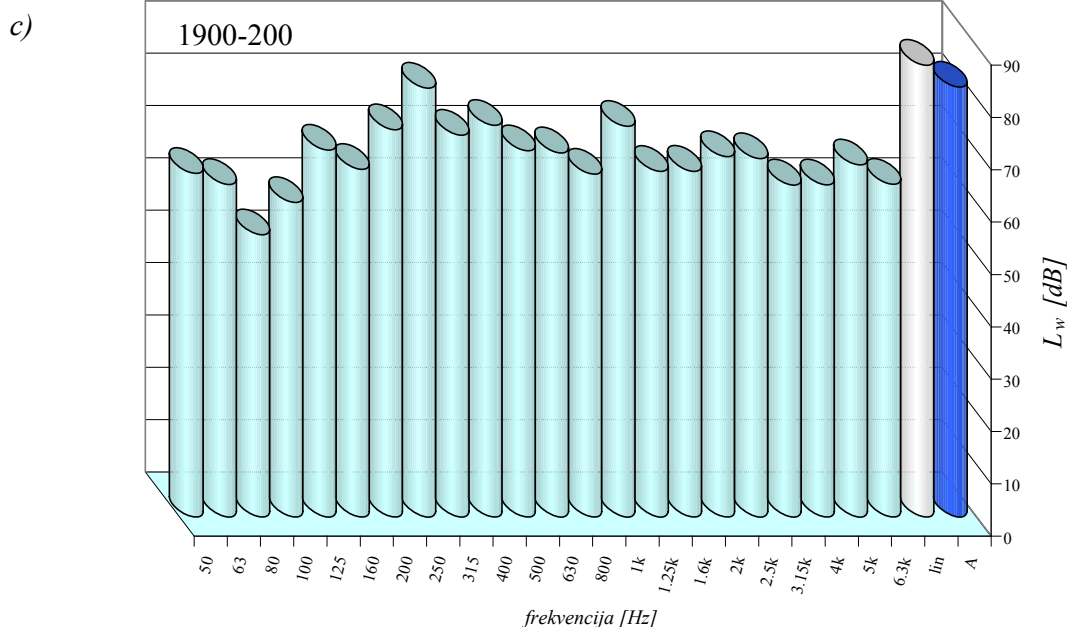
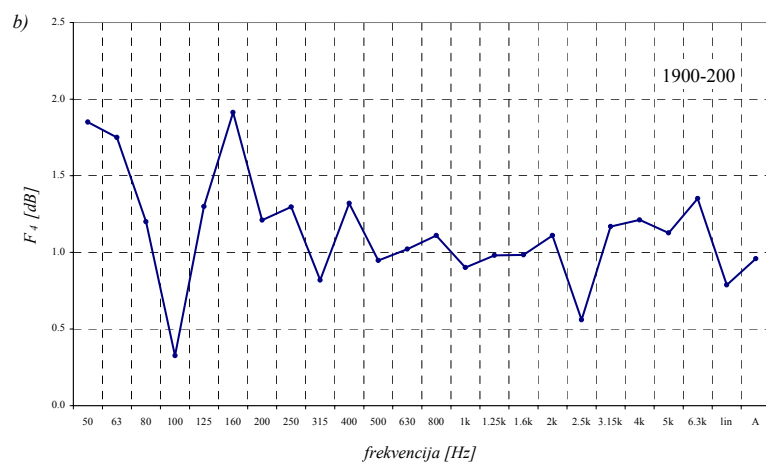
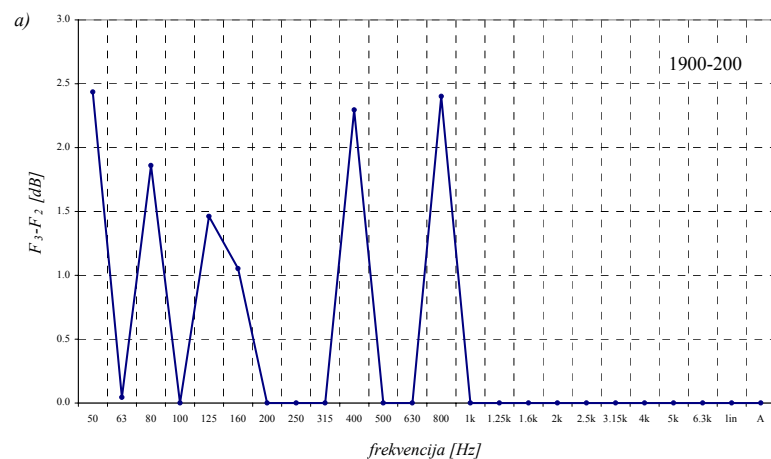


	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	lin	A
L_w	67.1	64.8	42.0	54.9	68.1	67.2	65.7	82.1	69.6	74.2	70.3	68.8	71.0	73.9	65.4	65.5	69.9	68.9	63.2	62.9	66.1	62.3	85.8	81.5

Sl. B.5 Režim ispitivanja pumpe – broj obrtaja 1900%/min, pritisak 150bara

a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage;

b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage



	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	lin	A	
Lw	65.6	63.5	53.9	60.1	70.1	66.4	74.0	81.9	72.9	74.8	70.0	69.5	65.5	74.6	66.0	66.0	66.0	68.8	68.4	63.4	63.4	67.3	63.6	86.3	82.1

Sl. B.6 Režim ispitivanja pumpe – broj obrtaja 1900%/min, pritisak 200bara

- a) Razlika indikatora reaktivnosti zvučnog polja i indikatora negativne parcijalne snage;
 b) Indikator uniformnosti zvučnog polja; c) Nivo zvučne snage

Tabela C.1 *Vreme reverberacije u [s] nastavne učionice Laboratorije za buku i vibracije Fakulteta zaštite na radu*

f [Hz]	pozicije referentnog izvora										\bar{T}_r	σ	σ^2
	1					2							
	pozicije mernih mikrofona												
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
50	4.50	3.90	3.56	2.38	3.12	2.35	2.86	3.89	4.01	3.50	3.41	0.716	0.5134
63	2.51	2.86	4.20	2.91	3.50	2.54	2.35	2.84	2.24	2.24	2.82	0.619	0.3833
80	2.12	3.35	2.78	2.17	2.00	1.76	2.15	1.91	1.97	1.97	2.22	0.482	0.2319
100	2.08	2.14	2.57	2.27	2.64	1.53	2.39	1.93	1.36	1.37	2.03	0.473	0.2239
125	2.14	2.14	2.21	1.27	1.38	1.67	1.61	1.98	2.51	2.51	1.94	0.440	0.1934
160	1.74	1.87	1.58	1.54	1.46	1.44	1.42	1.65	1.58	1.58	1.59	0.140	0.0197
200	1.34	1.35	1.15	1.54	1.46	1.56	1.25	1.18	1.51	1.51	1.39	0.153	0.0233
250	1.18	1.08	1.17	1.19	1.13	0.90	1.14	1.14	1.12	1.12	1.12	0.084	0.0070
315	0.99	1.00	1.12	0.98	1.02	0.83	0.95	0.97	1.03	1.03	0.99	0.074	0.0055
400	0.84	1.06	1.04	1.03	1.04	0.94	1.07	1.06	0.98	0.98	1.00	0.074	0.0054
500	0.99	1.03	1.05	1.01	1.05	1.07	1.06	1.02	1.12	1.12	1.05	0.041	0.0017
630	1.16	1.08	1.30	1.06	1.14	1.17	1.12	1.24	1.20	1.20	1.17	0.073	0.0053
800	1.26	1.34	1.18	1.22	1.16	1.19	1.25	1.25	1.16	1.16	1.22	0.059	0.0035
1000	1.35	1.38	1.31	1.26	1.31	1.31	1.28	1.43	1.33	1.33	1.33	0.048	0.0023
1250	1.40	1.36	1.31	1.33	1.33	1.41	1.34	1.61	1.40	1.40	1.39	0.085	0.0072
1600	1.45	1.43	1.42	1.39	1.36	1.41	1.40	1.59	1.42	1.42	1.43	0.062	0.0038
2000	1.47	1.46	1.42	1.43	1.40	1.39	1.35	1.52	1.39	1.39	1.42	0.049	0.0024
2500	1.40	1.38	1.45	1.36	1.36	1.39	1.40	1.40	1.38	1.38	1.39	0.025	0.0006
3150	1.40	1.31	1.33	1.32	1.36	1.27	1.29	1.39	1.32	1.32	1.33	0.044	0.0020
4000	1.31	1.27	1.24	1.21	1.22	1.25	1.21	1.33	1.25	1.25	1.25	0.040	0.0016
5000	1.21	1.16	1.12	1.15	1.18	1.14	1.13	1.34	1.17	1.17	1.18	0.063	0.0040
6300	1.20	1.13	1.10	1.09	1.12	1.14	1.13	1.20	1.11	1.11	1.13	0.038	0.0015
8000	0.97	0.93	0.88	0.94	0.93	0.91	0.95	0.94	0.96	0.96	0.94	0.026	0.0007
10000	0.93	0.85	0.81	0.86	0.84	0.84	0.84	0.91	0.79	0.80	0.85	0.045	0.0020

Tabela C.2 *Frekvencijski spektar zvučne snage u [dB] referentnog izvora buke - kataloške vrednosti*

<i>f</i> [Hz]	spektar 1	spektar 2
63	90.7	92.0
80	97.0	101.4
100	102.1	108.6
125	107.1	115.0
160	106.8	113.2
200	104.6	108.2
250	104.5	105.0
315	104.0	102.8
400	105.4	101.9
500	105.6	99.0
630	105.0	96.4
800	105.7	91.9
1000	102.5	82.6
1250	101.4	80.3
1600	103.2	75.0
2000	104.2	71.8
2500	103.8	70.5
3150	102.1	60.3
4000	98.6	68.2
5000	95.4	68.0
6300	90.2	
8000	90	

Tabela C.3 *Rezidualni indeks reaktivnosti u [dB] mernog lanca*

<i>f</i> [Hz]	½" mic						¼" mic					
	<i>Δr</i> = 12mm			<i>Δr</i> = 50mm			<i>Δr</i> = 6mm			<i>Δr</i> = 12mm		
	<i>L_{p0}</i>	<i>L_{I0}</i>	<i>δ_{pI0}</i>	<i>L_{p0}</i>	<i>L_{I0}</i>	<i>δ_{pI0}</i>	<i>L_{p0}</i>	<i>L_{I0}</i>	<i>δ_{pI0}</i>	<i>L_{p0}</i>	<i>L_{I0}</i>	<i>δ_{pI0}</i>
50	74.3	66.1	8.2	74.4	-61.7	12.7	74.1	-73.3	0.7	73.9	-72.3	1.6
63	74.2	65.0	9.2	74.2	55.6	18.6	73.9	-71.9	2.0	73.8	68.9	4.8
80	74.1	-61.2	12.9	74.2	-56.1	18.1	73.8	-71.6	2.1	73.6	-68.9	4.7
100	74.1	59.0	15.1	74.1	52.3	21.8	73.8	-68.9	4.9	73.7	-69.6	4.1
125	74.2	-54.4	19.8	74.0	-51.3	22.7	73.7	-69.6	4.1	73.7	-65.1	8.6
160	74.2	57.6	16.7	74.0	-57.4	16.6	73.7	-70.9	2.7	73.8	-67.0	6.8
200	74.3	-53.0	21.3	74.3	55.0	19.4	74.0	-65.0	9.0	74.0	-64.3	9.7
250	74.4	57.3	17.1	74.2	50.6	23.6	73.9	-65.0	8.9	74.1	-64.4	9.7
315	74.5	55.0	19.5	74.4	-52.3	22.1	74.1	-67.1	6.9	74.2	-64.5	9.7
400	74.6	54.0	20.5	74.6	46.4	28.2	74.2	-63.5	10.7	74.2	-61.0	13.3
500	74.6	-49.2	25.4	74.6	43.3	31.2	74.3	-64.2	10.1	74.3	-60.5	13.8
630	74.3	48.2	26.1	74.3	-44.8	29.6	74.0	-64.5	9.6	74.0	-60.0	14.1
800	73.8	50.7	23.1	73.8	39.7	34.1	73.5	-61.7	11.9	73.5	-58.9	14.6
1000	73.3	49.2	24.1	73.2	-39.7	33.5	73.0	-60.1	12.9	73.0	-58.1	14.9
1250	73.8	47.7	26.1	73.8	-43.6	30.2	73.6	-62.2	11.4	73.7	-59.2	14.5
1600	74.5	52.4	22.1	74.5	41.5	32.9	74.4	-59.6	14.8	74.4	-56.5	18.0
2000	71.9	45.2	26.8	71.9	-38.7	33.2	72.1	-59.7	12.4	72.1	-56.4	15.7
2500	73.0	48.2	24.8	72.9	39.0	33.9	73.6	-60.1	13.5	73.6	-57.0	16.6
3150	72.5	50.7	21.8	72.4	40.7	31.7	74.2	-58.9	15.3	74.1	-56.0	18.1
4000	74.8	50.6	24.2	74.6	46.4	28.1	78.9	-62.8	16.1	78.9	-59.8	19.1
5000	71.9	50.3	21.6	71.9	43.8	28.1	74.1	-59.2	14.9	74.1	-56.2	17.9
6300	54.7	-40.7	14.0	55.1	-37.4	17.7	56.3	-51.0	5.3	56.3	-48.0	8.3
8000	39.0	-29.4	9.6	39.8	-28.8	11.0	43.2	-41.2	2.0	43.1	-38.1	5.1
10000	41.7	-33.1	8.7	43.2	-36.7	6.5	46.9	-45.9	1.0	46.8	-44.2	2.6

Tabela C.4 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 1) u skladu sa ISO 3745

f [Hz]	Merne pozicije (sl. 7.9)										\bar{L}_p	\bar{L}_w
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
50	62.6	57.8	58.0	63.0	63.2	57.4	59.9	63.8	60.0	61.6	61.3	69.3
63	70.2	65.1	65.8	70.5	70.6	65.2	67.4	71.3	67.4	69.2	68.8	76.8
80	76.2	70.2	70.6	77.1	77.4	71.0	74.3	78.2	74.1	76.4	75.4	83.3
100	82.3	77.7	77.4	83.1	82.9	78.5	81.2	83.7	80.4	82.4	81.5	89.5
125	85.2	79.1	78.6	85.5	85.8	79.3	81.5	86.0	81.5	83.0	83.4	91.4
160	87.4	81.5	81.2	87.1	86.9	82.8	83.1	87.4	83.4	84.0	85.1	93.1
200	87.1	78.2	78.3	86.4	86.1	80.8	79.4	85.7	79.1	79.0	83.5	91.4
250	86.7	78.6	78.3	86.6	87.1	80.8	76.6	83.7	76.5	74.9	83.1	91.1
315	87.4	79.1	78.5	87.3	87.4	80.5	76.6	84.1	77.5	77.2	83.6	91.6
400	85.9	79.5	79.1	85.4	85.8	76.2	73.9	82.9	73.5	73.0	82.0	90.0
500	84.7	81.2	81.2	84.6	85.0	76.3	74.7	80.9	74.6	77.1	81.6	89.6
630	86.7	82.1	82.4	81.2	80.8	77.3	70.8	83.6	68.3	82.7	81.9	89.9
800	91.5	79.1	79.1	78.3	78.9	80.3	72.4	88.9	73.3	83.2	84.6	92.5
1000	88.9	72.9	74.1	71.3	71.3	72.6	71.2	86.4	72.1	75.8	81.3	89.3
1250	85.4	71.1	67.7	78.6	79.3	69.3	71.4	83.3	69.0	69.8	78.9	86.9
1600	83.4	64.2	64.7	78.6	77.9	66.6	68.6	79.9	67.5	74.4	77.0	85.0
2000	83.7	68.9	67.9	79.7	80.0	67.9	68.9	80.2	68.7	75.9	77.8	85.8
2500	81.1	67.6	66.8	77.5	79.6	61.7	71.6	77.4	72.3	70.2	75.9	83.8
3150	82.7	62.3	62.2	74.1	74.4	59.2	63.6	78.4	65.2	66.7	75.1	83.1
4000	84.6	64.0	64.2	74.6	74.9	55.1	63.9	81.5	63.1	67.6	77.0	85.0
5000	82.3	60.1	61.5	69.8	72.5	55.3	58.8	78.3	58.7	63.2	74.3	82.3
6300	74.8	49.5	56.5	64.5	65.6	46.6	50.5	71.4	49.8	52.3	67.1	75.1
8000	61.7	39.6	44.2	56.3	57.7	35.6	42.7	57.7	43.1	40.9	55.0	63.0
10000	58.3	35.7	39.7	49.7	50.8	34.1	35.3	54.7	38.1	37.2	50.9	58.8
A	96.8	85.7	85.6	90.5	90.9	84.3	82.0	93.9	82.0	87.3	90.6	98.5
L	98.8	90.2	90.0	95.8	95.9	90.0	89.2	96.7	89.2	91.6	94.2	102.1

Tabela C.5 Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 1) u skladu sa ISO 9614-1 (MOI)

f [Hz]	Merne pozicije (sl. 7.9)										\bar{L}_p	\bar{L}_I	\bar{L}_W
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
50	59.0	57.9	58.3	62.8	64.3	60.2	53.6	65.1	63.7	67.6	61.8	62.8	70.8
63	69.8	66.6	67.7	69.9	70.4	65.5	67.7	71.0	66.8	71.4	69.5	69.1	77.1
80	74.0	73.5	73.5	76.6	77.9	73.4	75.5	79.7	75.1	74.3	76.0	75.9	83.8
100	78.8	77.3	77.5	81.6	82.0	78.7	80.0	83.7	80.1	81.4	81.9	80.6	88.5
125	84.9	78.8	78.9	84.2	84.8	79.4	81.5	86.1	81.0	83.3	83.7	83.0	91.0
160	87.0	81.7	81.7	85.9	87.1	82.9	84.6	88.1	84.1	84.9	85.5	85.3	93.3
200	87.0	78.3	78.8	85.0	86.3	80.1	79.0	86.7	79.6	79.7	83.9	83.5	91.4
250	85.6	78.3	79.7	85.9	86.8	80.4	77.5	85.2	77.8	74.9	83.5	83.0	90.9
315	84.0	78.9	77.8	87.2	88.2	80.8	78.4	86.0	79.1	76.7	84.1	83.6	91.6
400	82.7	78.9	77.0	86.0	87.1	78.6	75.9	84.9	75.9	74.3	82.7	82.3	90.3
500	81.5	80.4	81.6	85.0	86.0	76.1	75.0	82.6	74.8	77.2	82.2	81.6	89.6
630	86.1	82.5	82.3	82.1	82.6	77.8	71.6	84.5	70.9	82.9	82.5	82.2	90.2
800	91.1	80.2	79.5	78.3	79.8	81.5	71.8	89.3	72.3	84.2	85.0	84.7	92.6
1000	85.3	74.5	73.8	71.7	71.8	72.8	71.7	87.0	72.4	75.8	81.7	80.1	88.1
1250	84.3	73.0	70.7	75.6	79.6	71.2	71.4	84.7	70.1	68.9	79.4	78.8	86.8
1600	82.3	65.2	65.5	76.2	76.5	68.4	70.0	81.2	69.0	74.1	77.3	76.5	84.5
2000	80.1	69.1	69.4	81.3	80.5	69.4	69.4	79.7	69.5	75.7	78.4	77.2	85.2
2500	79.1	67.4	69.2	80.2	81.3	63.2	73.9	73.5	72.7	72.0	76.7	76.2	84.2
3150	82.4	61.1	64.9	71.4	72.9	59.3	64.5	78.6	63.5	68.2	75.1	74.7	82.7
4000	81.6	61.1	60.4	72.6	75.2	58.5	65.0	80.0	62.3	69.0	76.6	75.0	82.9
5000	79.1	58.1	59.9	65.8	71.0	57.1	61.6	76.7	58.7	63.0	73.9	71.8	79.8
6300	74.6	52.3	54.7	62.0	63.8	49.2	54.5	72.7	51.3	51.6	67.0	67.2	75.2
8000	61.0	42.9	43.2	56.6	57.8	37.4	44.6	60.8	42.1	45.3	54.9	55.6	63.6
10000	58.0	34.9	34.3	48.2	49.9	30.0	34.3	54.7	32.0	41.6	50.0	50.5	58.4
A	95.2	86.0	85.8	90.6	91.5	85.1	82.9	94.4	82.6	87.7	91.0	90.3	98.3
L	97.4	90.2	90.2	95.3	96.3	90.3	89.8	97.4	89.7	91.9	94.6	94.0	102.0

Tabela C.6 Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 1) u skladu sa ISO 9614-1 (MO2)

f [Hz]	Merne pozicije (sl. 7.9)										\bar{L}_p	\bar{L}_I	\bar{L}_W
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
50	59.7	59.2	58.3	64.6	64.8	61.5	51.9	66.9	62.7	68.3	64.0	63.7	71.7
63	70.5	67.1	66.7	70.4	71.7	66.4	66.0	71.2	64.8	71.9	72.4	69.4	77.4
80	74.4	73.7	71.6	77.1	78.0	75.4	73.9	80.5	73.5	76.2	77.9	76.2	84.2
100	78.9	78.0	76.0	81.8	83.7	79.7	79.4	84.5	79.9	81.7	83.4	81.0	89.0
125	85.8	80.0	78.5	85.5	86.3	80.8	80.4	86.3	79.9	83.4	86.9	83.6	91.6
160	87.6	80.1	79.9	84.2	86.0	82.8	82.8	87.0	82.3	83.1	89.2	84.3	92.3
200	87.7	79.9	77.2	86.2	86.3	81.2	77.0	88.1	78.0	81.3	87.4	84.2	92.1
250	86.4	79.1	79.1	86.0	88.1	82.2	75.6	85.4	75.9	76.8	85.8	83.6	91.6
315	84.9	80.6	75.8	87.5	89.6	81.0	77.5	86.6	78.2	77.7	86.1	84.3	92.3
400	82.7	79.3	75.3	86.2	87.7	80.0	74.2	86.3	74.6	75.0	84.5	82.8	90.8
500	81.8	80.6	80.8	86.4	87.5	77.1	74.0	84.4	73.4	77.7	85.0	82.6	90.6
630	86.9	83.8	80.4	83.3	84.5	79.2	69.9	84.8	69.7	84.9	86.1	83.1	91.1
800	91.9	81.5	78.3	78.4	80.0	81.8	71.5	90.5	71.1	85.4	88.4	85.5	93.5
1000	85.6	74.2	73.6	69.9	71.7	71.6	70.0	86.3	71.5	74.0	85.3	79.7	87.7
1250	84.7	73.0	70.5	76.0	80.4	72.5	70.5	86.4	69.3	69.7	81.7	79.8	87.8
1600	82.5	65.4	65.5	77.8	76.7	68.9	69.7	83.1	68.1	75.9	79.6	77.5	85.5
2000	80.8	69.2	68.9	81.8	82.4	69.7	67.8	80.2	68.9	76.0	81.9	78.0	86.0
2500	80.0	69.1	67.9	80.4	83.1	63.4	72.0	75.4	72.4	72.9	79.3	77.1	85.1
3150	83.2	61.8	64.3	72.6	74.4	59.6	62.9	79.2	62.7	69.7	77.0	75.5	83.5
4000	81.7	62.3	58.4	72.7	75.3	60.1	63.5	80.6	61.7	70.8	81.3	75.2	83.2
5000	80.0	58.4	59.2	67.7	71.5	59.0	61.0	78.4	57.7	64.9	79.1	72.9	80.9
6300	75.0	50.7	53.6	60.3	62.5	49.0	53.5	70.7	49.8	51.6	68.5	66.7	74.7
8000	61.4	43.0	42.5	58.5	58.9	38.0	43.2	61.4	40.7	45.8	56.6	56.4	64.4
10000	58.8	36.5	34.3	48.5	51.9	31.7	34.0	55.2	31.9	42.6	54.8	51.3	59.3
A	95.8	86.9	84.7	91.2	92.8	85.7	81.6	95.2	81.6	88.9	94.2	91.0	99.0
L	98.0	90.9	89.0	95.8	97.2	91.1	88.4	98.1	88.4	92.5	97.6	94.5	102.5

Tabela C.7 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 2) u skladu sa ISO 3745

f [Hz]	Merne pozicije (sl. 7.9)										\bar{L}_p	\bar{L}_w
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
50	57.0	57.1	57.1	62.0	61.4	56.6	59.0	65.5	58.9	60.8	60.5	68.5
63	66.8	66.9	66.7	71.3	71.1	66.3	69.3	73.5	68.9	71.0	69.9	77.8
80	74.9	74.9	75.4	80.7	80.5	75.7	78.3	83.1	78.5	80.2	79.1	87.1
100	83.7	83.6	83.5	88.5	89.1	84.5	87.0	90.7	87.1	88.1	87.3	95.3
125	85.9	86.4	86.4	91.5	92.4	87.0	88.8	93.9	89.1	90.3	90.0	98.0
160	86.3	86.6	86.7	91.2	91.7	88.8	89.0	93.4	89.3	89.8	89.9	97.9
200	81.2	80.9	81.1	88.5	88.8	83.9	83.0	88.8	82.6	82.6	85.3	93.3
250	78.5	78.5	78.9	86.8	86.3	81.2	76.6	84.4	76.8	75.0	82.2	90.2
315	76.2	76.2	76.1	85.6	84.4	78.5	75.9	81.9	75.8	74.4	80.4	88.4
400	73.9	74.1	74.3	78.6	80.2	71.9	68.7	78.5	69.0	69.1	75.6	83.6
500	73.0	73.1	72.9	78.2	76.9	68.4	67.8	73.4	66.8	68.8	73.5	81.5
630	71.2	71.3	72.2	69.7	70.0	66.3	59.4	72.4	59.4	71.5	70.0	78.0
800	65.2	65.3	65.0	64.3	64.3	66.6	58.3	74.8	58.8	69.6	67.8	75.8
1000	54.8	55.0	55.8	55.1	52.4	54.9	54.0	68.5	54.7	58.3	60.1	68.1
1250	47.2	47.1	44.7	52.9	54.9	46.6	48.4	60.8	46.4	46.1	53.1	61.1
1600	35.7	35.7	36.3	48.6	48.0	37.9	40.6	52.1	39.1	45.6	45.7	53.7
2000	35.4	35.3	34.6	47.0	45.7	35.7	35.6	47.3	36.2	43.2	42.6	50.6
2500	30.6	30.6	29.7	41.7	41.6	29.8	34.2	40.9	35.5	33.7	37.3	45.3
3150	24.7	24.2	23.8	32.7	32.5	27.4	25.7	37.9	28.3	28.2	31.1	39.1
4000	24.4	23.4	23.4	31.3	31.2	26.8	24.2	37.6	27.8	27.7	30.4	38.4
5000	24.4	23.1	23.2	28.5	29.0	27.0	23.4	34.6	27.8	27.2	28.4	36.4
6300	21.0	20.7	20.4	24.7	24.8	24.1	20.3	29.8	24.5	23.7	24.4	32.4
8000	22.6	21.6	20.9	25.4	25.5	25.6	21.7	30.2	26.6	25.4	25.5	33.4
10000	23.6	22.2	22.1	26.4	26.4	26.6	23.1	31.1	27.7	26.1	26.4	34.4
A	79.6	79.7	79.9	85.7	85.7	80.8	80.0	85.9	80.1	81.1	82.7	90.7
L	91.4	91.7	91.7	97.2	97.6	93.1	93.9	98.7	94.1	94.9	95.2	103.2

Tabela C.8 Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 2) u skladu sa ISO 9614-1 (MOI)

f [Hz]	Merne pozicije (sl. 7.9)										\bar{L}_p	\bar{L}_I	\bar{L}_W
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
50	57.1	57.3	58.6	61.1	62.5	56.8	59.8	65.2	59.0	61.7	62.1	60.7	68.7
63	67.7	67.0	68.7	70.4	73.0	67.5	71.2	73.1	69.0	73.2	72.5	70.7	78.7
80	75.5	75.8	76.7	80.1	82.2	77.5	78.7	83.1	79.0	81.9	80.8	79.8	87.8
100	84.7	84.5	85.7	87.9	89.5	85.9	89.3	90.1	87.5	90.4	89.5	88.0	96.0
125	86.4	86.7	89.3	91.4	93.5	88.1	89.9	93.1	89.6	93.6	92.4	90.9	98.9
160	87.0	86.7	88.8	90.2	92.5	88.9	91.3	92.8	89.6	93.1	91.3	90.6	98.6
200	81.2	81.5	83.5	88.1	90.2	84.7	86.0	87.9	82.9	83.0	87.1	85.9	93.9
250	79.1	79.0	80.5	86.2	88.1	82.8	78.9	84.0	77.6	78.2	84.0	83.0	90.9
315	76.3	76.2	76.9	85.4	85.6	78.6	76.9	81.8	76.8	75.0	81.4	80.8	88.8
400	74.5	74.2	74.5	78.2	81.2	73.9	70.7	78.0	69.4	69.2	77.4	76.0	84.0
500	73.3	74.0	73.7	77.9	78.1	69.8	70.2	73.0	67.6	69.2	75.4	74.0	82.0
630	71.4	72.0	74.3	69.0	71.2	66.7	60.5	71.6	60.3	72.1	71.6	70.6	78.6
800	65.5	65.5	67.2	63.5	66.2	68.4	58.5	74.6	59.6	70.2	69.0	68.2	76.2
1000	55.0	55.3	57.2	54.9	52.5	56.3	56.8	68.5	55.5	59.1	62.0	60.3	68.3
1250	48.0	47.6	45.8	52.5	55.2	47.8	50.0	60.3	47.3	49.1	54.7	53.1	61.1
1600	36.5	36.1	37.7	48.0	49.5	39.4	42.5	51.5	39.5	46.1	47.4	45.8	53.8
2000	36.0	35.6	35.7	46.8	47.3	37.2	36.6	46.7	36.8	45.3	44.1	43.2	51.2
2500	31.4	31.5	31.8	41.3	42.2	31.6	34.8	40.2	36.2	36.4	38.8	37.6	45.6
3150	24.8	24.8	26.8	32.5	32.8	28.0	28.2	37.0	29.0	29.7	32.8	31.1	39.0
4000	25.1	24.3	23.6	30.3	31.4	26.9	27.1	37.3	28.6	28.3	31.6	30.4	38.4
5000	22.8	23.0	24.7	27.3	30.9	25.7	24.6	34.2	27.1	27.9	29.9	28.4	36.4
6300	21.0	20.8	20.6	24.0	26.1	25.1	22.7	29.6	25.2	24.0	26.0	24.8	32.8
8000	22.8	21.8	23.0	25.3	26.2	25.9	22.3	29.7	26.8	26.0	26.6	25.6	33.6
10000	23.7	22.9	23.5	25.9	28.0	27.6	25.3	30.3	28.5	26.7	27.9	26.8	34.8
A	80.0	80.1	81.7	85.2	86.9	81.6	82.1	85.3	80.5	83.5	84.4	83.3	91.3
L	92.0	92.0	94.0	96.7	98.7	93.9	95.8	98.0	94.4	97.8	97.1	95.9	103.9

Tabela C.9 Rezultati merenja nivoa intenziteta zvuka u [dB] pri određivanju nivoa zvučne snage referentnog izvora (spektar 2) u skladu sa ISO 9614-1 (MO2)

f [Hz]	Merne pozicije (sl. 7.9)										\bar{L}_p	\bar{L}_I	\bar{L}_W
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
50	62.6	60.4	55.9	61.3	62.6	57.2	60.5	61.7	57.7	66.8	69.3	61.7	69.7
63	69.1	68.6	68.7	71.0	72.4	67.8	68.7	73.7	70.7	73.0	78.0	70.8	78.8
80	78.8	77.6	77.9	82.0	83.2	78.1	80.1	84.1	80.1	78.9	85.8	80.7	88.6
100	89.5	84.1	84.4	88.5	89.1	85.2	86.9	90.3	86.8	88.1	91.5	87.7	95.7
125	93.1	86.8	87.3	92.2	92.6	87.5	90.6	93.6	89.5	92.0	97.5	91.1	99.1
160	92.8	88.0	87.8	92.6	93.2	89.4	90.8	94.3	90.2	91.2	98.5	91.5	99.5
200	91.2	82.2	82.4	89.3	90.2	83.8	83.3	90.5	83.2	84.2	93.3	87.5	95.5
250	89.0	79.2	80.5	87.1	88.0	81.0	78.5	86.1	79.2	75.6	91.0	84.6	92.6
315	88.5	77.5	76.4	86.0	86.5	79.3	77.5	84.5	77.3	75.7	90.2	83.4	91.3
400	87.3	74.3	72.5	81.7	82.8	75.3	72.2	80.9	71.8	70.0	87.2	80.5	88.5
500	85.7	73.6	74.1	78.9	79.5	68.7	68.3	75.5	67.8	69.2	83.5	78.1	86.1
630	83.5	72.2	72.2	72.6	73.6	67.9	61.3	74.1	60.7	72.6	77.8	75.4	83.4
800	80.6	67.2	66.0	65.1	66.6	68.2	57.8	75.7	57.8	71.2	78.4	72.8	80.8
1000	73.1	57.1	56.1	55.1	55.2	56.1	54.4	69.5	55.1	59.1	74.2	65.2	73.1
1250	65.2	49.6	47.6	50.9	56.3	47.7	48.4	62.3	47.5	45.2	60.9	57.7	65.7
1600	64.0	32.3	32.3	48.1	47.6	37.6	41.8	53.5	39.4	44.4	57.6	54.7	62.7
2000	45.8	31.2	35.1	45.3	47.2	32.3	31.2	46.8	28.0	43.0	50.7	43.0	51.0
2500	35.1	34.1	34.1	42.1	43.6	34.8	-21.3	28.9	29.9	31.0	40.5	37.3	45.3
3150	31.5	-25.5	26.4	14.9	19.3	28.5	24.8	35.8	26.4	-25.7	37.1	29.0	37.0
4000	30.8	25.9	-26.9	27.8	28.1	25.6	24.8	28.9	-24.2	25.6	32.3	27.3	35.3
5000	42.8	31.8	32.8	35.6	-33.8	31.8	-30.7	30.8	31.9	32.8	39.9	35.6	43.6
6300	29.0	23.7	-25.9	25.9	24.9	26.8	-25.9	24.9	24.9	-25.9	32.0	26.0	34.0
8000	28.9	25.4	26.7	27.8	-28.9	29.1	27.8	26.8	-25.7	26.4	33.6	27.5	35.5
10000	27.4	-26.5	25.8	26.6	26.6	26.4	-26.2	26.5	26.1	-25.5	32.6	26.4	34.4
A	90.6	80.7	80.7	86.6	87.4	81.4	81.5	87.2	81.0	82.4	91.7	85.4	93.4
L	99.6	92.6	92.7	98.0	98.7	93.7	95.2	99.2	94.6	96.1	103.0	96.8	104.7

Tabela D.1 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1 (RS:F) u [dB]

<i>f</i> [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	58.8	59.9	61.3	58.5	59.2	58.6	58.4	58.0	57.7	57.0	57.4	57.1
63	66.6	67.7	67.0	65.7	67.5	67.7	66.2	65.8	65.6	65.3	65.9	64.9
80	73.0	74.5	75.4	72.2	73.1	74.0	72.3	72.6	73.3	71.7	71.9	72.3
100	79.4	80.5	80.1	79.6	79.8	79.3	79.0	79.6	79.2	78.8	79.6	78.9
125	80.9	81.9	82.1	80.8	81.5	81.6	80.5	80.9	80.9	80.1	80.3	80.3
160	81.3	82.9	83.5	81.6	82.0	82.5	81.3	82.0	82.5	81.3	82.0	82.4
200	78.6	80.4	80.7	77.7	78.8	79.1	77.1	78.1	78.4	76.7	77.7	77.9
250	73.2	73.6	74.5	70.5	72.6	73.2	72.8	71.1	71.2	68.7	68.4	68.8
315	73.0	74.9	74.7	73.4	72.6	72.9	71.2	73.3	73.4	73.5	72.8	72.7
400	75.4	75.3	75.5	71.3	73.0	72.9	71.8	72.8	72.6	68.9	70.1	69.7
500	73.0	73.9	73.7	71.2	70.4	70.2	70.2	70.9	70.5	69.8	67.6	67.5
630	80.1	81.1	81.1	79.3	80.8	80.6	80.1	79.2	79.1	77.0	77.1	77.0
800	80.5	81.9	82.0	78.9	79.9	80.0	78.8	79.0	79.2	80.0	80.5	80.5
1000	77.4	79.0	79.2	74.5	75.7	75.8	75.2	75.1	75.2	74.7	75.6	75.8
1250	72.2	72.8	73.1	66.1	70.1	70.1	69.0	67.1	67.0	68.7	68.1	68.4
1600	73.6	74.6	74.9	70.5	70.7	71.0	70.5	70.5	70.6	67.3	69.3	69.3
2000	76.8	75.6	76.0	73.8	73.8	74.1	70.1	74.2	74.6	66.4	67.2	67.1
2500	72.0	73.4	72.9	68.7	76.2	75.8	69.5	71.1	71.0	64.4	66.8	66.5
3150	68.6	71.7	71.6	64.9	67.6	67.4	62.2	66.2	65.6	66.9	64.8	64.3
4000	68.7	69.5	69.9	65.1	67.4	67.7	65.2	65.0	65.1	62.1	62.8	63.1
5000	64.9	67.3	67.1	62.4	63.2	63.1	62.4	62.6	62.4	56.5	56.6	55.9
6300	56.7	55.9	56.9	54.4	55.8	56.9	55.4	55.0	56.1	48.2	46.0	46.1
8000	48.6	48.1	50.0	41.9	43.4	44.0	42.9	40.7	40.4	38.8	37.7	36.6
10000	44.6	41.3	42.0	35.4	38.5	37.3	39.1	36.0	28.7	33.9	33.0	-23.6
A	86.2	87.1	87.3	84.0	85.6	85.6	84.0	84.4	84.4	83.2	83.6	83.6
L	89.7	90.8	91.1	88.7	89.6	89.7	88.5	89.0	89.1	88.0	88.5	88.5

Tabela D.2 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2 (RS:F) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	58.6	58.6	59.2	57.4	57.3	58.0	57.3	57.4	58.2	55.9	56.4	55.9
63	66.5	66.3	66.7	65.3	65.1	63.4	65.3	64.9	63.3	64.6	64.3	63.5
80	73.0	73.2	74.4	71.6	71.5	72.5	71.6	71.6	72.6	70.4	70.9	71.6
100	79.5	79.3	78.9	78.9	78.6	77.9	78.2	78.6	77.9	78.3	78.3	77.7
125	81.3	81.6	81.3	79.9	79.6	79.7	80.2	80.0	79.8	79.6	79.4	79.4
160	82.0	82.1	82.7	81.3	80.4	81.0	80.7	80.4	81.0	80.7	80.9	81.5
200	80.8	80.6	80.7	77.2	77.9	77.8	77.3	78.1	78.2	76.7	77.7	77.8
250	76.3	75.6	76.3	73.0	72.2	72.0	73.3	74.1	74.6	70.1	69.6	69.8
315	74.6	73.8	74.4	70.9	72.5	71.3	71.6	71.6	72.2	72.2	73.6	73.2
400	74.3	75.1	75.1	72.7	70.6	70.2	72.6	73.0	72.6	69.3	68.6	68.5
500	72.1	72.0	72.1	68.0	70.8	68.9	68.3	69.4	69.4	65.0	66.7	65.9
630	79.6	79.7	79.5	77.7	76.4	76.2	77.4	77.8	77.6	73.1	73.8	73.6
800	82.5	82.6	82.7	77.8	77.6	77.5	77.5	78.6	78.7	77.9	77.9	78.1
1000	80.1	80.0	80.2	74.3	73.6	73.7	74.6	74.7	74.8	75.4	75.1	75.3
1250	73.5	73.1	73.4	64.9	65.1	64.6	67.0	69.8	70.0	69.3	70.8	71.0
1600	73.5	72.5	72.8	70.8	69.8	70.0	69.1	70.7	71.0	71.8	70.7	71.0
2000	78.0	75.5	75.6	71.0	71.2	71.5	71.6	72.1	72.4	72.6	71.1	71.6
2500	74.7	73.8	73.6	68.4	67.7	67.1	70.2	67.3	66.9	64.2	66.6	66.4
3150	72.7	73.7	73.6	65.1	65.0	64.4	63.3	66.0	65.9	63.8	63.0	62.9
4000	72.7	72.6	72.4	64.5	61.6	61.3	65.0	66.9	66.9	60.5	59.1	59.5
5000	67.7	68.1	67.6	61.4	58.1	57.7	58.4	59.7	59.7	58.2	55.3	55.1
6300	58.1	57.9	59.0	53.7	48.7	49.3	55.9	54.5	55.8	46.1	44.2	44.5
8000	49.7	48.8	50.3	43.4	40.6	40.2	44.4	41.5	41.5	38.4	36.5	34.5
10000	46.9	43.1	43.4	42.1	35.3	30.0	38.3	37.8	36.4	35.4	32.1	-26.9
A	87.7	87.4	87.5	83.0	82.4	82.3	82.9	83.6	83.6	82.6	82.5	82.7
L	90.8	90.7	90.8	88.0	87.6	87.5	87.8	88.1	88.2	87.3	87.5	87.6

Tabela D.3 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3 (RS:F) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	57.4	58.0	50.5	56.6	56.7	56.7	56.6	56.3	-51.3	55.3	55.0	-41.5
63	65.5	65.4	63.5	63.9	63.8	62.3	64.6	64.2	64.9	62.7	63.2	61.1
80	71.8	72.1	73.1	70.6	70.3	71.3	70.7	70.3	71.0	68.9	69.0	69.7
100	78.2	78.6	78.3	77.3	77.9	77.5	77.8	77.4	77.0	77.1	77.1	76.9
125	80.9	81.1	80.7	79.1	79.4	79.2	79.3	79.5	79.3	78.5	78.6	78.6
160	81.7	81.9	82.3	80.1	80.1	80.7	80.2	80.0	80.7	80.3	80.1	80.6
200	81.1	80.9	81.2	77.1	76.7	77.0	78.1	77.8	77.8	77.1	76.8	77.0
250	77.5	79.5	79.3	74.5	75.1	75.1	75.6	76.0	76.1	71.2	72.4	72.5
315	75.4	75.8	76.2	71.2	72.2	72.7	74.7	73.5	74.1	69.6	70.5	70.7
400	74.1	74.9	74.9	72.3	72.8	72.2	72.2	70.6	70.7	68.0	69.1	68.8
500	71.9	72.0	71.3	67.8	66.8	66.9	69.5	70.4	70.0	67.1	68.6	68.3
630	77.6	77.9	78.0	72.8	72.3	72.1	73.6	72.9	72.4	67.1	68.4	67.8
800	83.0	83.1	83.1	75.1	74.6	74.7	77.3	76.5	76.6	73.3	72.8	72.9
1000	80.8	81.5	81.7	72.9	72.8	73.0	73.0	73.0	73.1	72.4	72.3	72.5
1250	75.6	76.5	76.7	65.3	65.6	65.9	70.0	69.3	69.5	69.4	69.0	69.4
1600	72.4	70.0	70.6	67.5	67.0	67.1	68.9	68.0	68.2	68.1	67.6	67.8
2000	74.4	73.3	73.3	72.3	70.7	71.0	72.9	70.4	70.6	71.5	71.4	71.6
2500	75.0	77.8	77.4	68.8	68.1	68.2	69.7	69.5	69.4	68.1	70.0	70.0
3150	75.1	71.7	71.7	66.6	63.7	63.5	65.2	64.2	64.2	61.6	62.6	62.6
4000	76.0	76.6	76.8	62.8	64.1	64.2	62.8	62.5	61.9	57.6	56.9	56.9
5000	71.1	72.6	72.8	60.7	63.9	63.9	58.5	60.3	60.3	54.3	55.0	55.0
6300	62.4	62.2	63.0	51.9	48.9	49.7	54.1	53.2	53.8	43.5	45.0	45.4
8000	53.5	51.7	53.5	44.1	40.3	40.5	43.4	43.6	44.7	37.3	36.9	35.7
10000	48.8	45.3	46.5	41.7	34.2	-12.1	37.6	36.7	34.2	32.9	32.9	-20.1
A	88.0	88.3	88.4	81.5	81.0	81.1	82.6	81.8	81.9	80.3	80.4	80.6
L	90.8	91.1	91.2	86.8	86.9	87.0	87.6	87.2	87.3	86.1	86.1	86.3

Tabela D.4 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	63.6	63.1	61.1	60.1	61.1	56.8	60.8	60.2	58.4	58.8	59.0	57.9
63	71.0	70.3	69.9	68.0	70.5	70.6	68.3	70.2	68.4	67.0	67.1	66.5
80	76.4	75.7	76.8	72.8	78.4	79.7	73.6	78.2	78.7	72.5	72.2	72.9
100	78.4	78.8	79.5	75.2	82.6	83.9	75.7	82.8	82.6	76.1	76.2	75.2
125	80.8	81.2	80.3	74.9	84.0	83.9	75.9	83.3	83.0	73.0	72.8	70.3
160	85.4	85.6	85.5	81.3	88.1	88.0	82.1	87.6	86.9	79.6	79.0	78.5
200	85.2	85.3	85.2	81.6	86.1	86.3	81.9	85.5	85.0	81.2	80.6	80.1
250	83.4	83.6	84.0	77.9	82.7	81.6	78.6	80.4	80.1	78.6	79.5	79.4
315	86.5	86.5	86.3	79.7	78.9	78.9	80.9	78.3	77.7	76.7	75.8	74.8
400	87.8	87.8	88.0	82.3	80.0	80.1	83.3	79.4	78.9	79.0	79.4	78.9
500	86.9	87.0	87.1	80.2	79.4	79.1	81.5	80.5	80.1	77.4	78.4	78.0
630	86.5	87.0	87.0	79.8	80.1	80.1	80.4	81.1	80.7	79.0	79.9	79.5
800	87.8	88.4	88.5	80.2	73.5	75.2	81.1	73.8	74.5	72.9	72.4	72.1
1000	84.7	85.0	85.1	74.8	69.5	72.1	75.0	72.5	72.8	74.8	71.8	71.5
1250	81.6	82.0	82.1	71.5	72.9	76.2	73.0	72.8	76.8	74.1	75.5	75.4
1600	78.9	77.8	78.2	69.8	65.8	69.1	72.3	67.9	70.5	70.2	68.0	68.2
2000	79.4	77.6	77.9	74.1	75.1	77.9	76.3	74.9	79.8	76.7	76.7	76.7
2500	78.0	80.2	79.8	73.4	75.4	70.1	72.4	76.8	70.3	72.8	75.8	75.6
3150	77.9	77.9	77.9	67.3	64.9	65.1	68.5	65.8	65.8	67.1	66.5	66.5
4000	77.7	79.8	80.0	62.7	60.8	60.1	67.0	61.1	61.1	60.4	61.5	61.3
5000	72.6	75.1	75.3	64.0	58.9	56.7	61.6	57.8	55.4	52.8	57.3	57.0
6300	61.0	64.4	65.4	56.7	45.9	47.1	55.9	47.1	48.1	46.2	48.6	48.8
8000	58.1	56.9	58.6	42.7	67.8	33.5	44.6	65.9	33.8	36.1	36.1	34.0
10000	52.9	49.3	51.4	37.3	30.7	-25.8	37.0	31.8	-26.4	32.5	32.6	-25.8
A	93.7	94.1	94.1	86.4	86.1	86.5	87.4	86.5	86.9	85.1	85.6	85.3
L	96.6	96.8	96.9	90.5	93.5	93.7	91.3	93.2	92.9	89.0	89.2	88.7

Tabela D.5 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2' (RS:T) u [dB]

<i>f</i> [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	61.5	62.2	64.0	59.9	60.3	58.7	59.1	59.3	60.7	57.0	58.1	58.7
63	69.8	69.7	69.8	67.7	68.0	68.4	66.9	67.1	65.9	65.6	65.6	62.8
80	74.9	74.7	75.9	72.7	73.4	74.9	72.2	72.1	72.5	70.8	71.6	72.5
100	77.8	77.8	78.3	75.7	76.6	77.4	75.3	75.8	75.1	75.6	76.6	75.6
125	79.2	78.9	79.1	72.9	74.3	74.8	73.3	71.4	70.7	72.0	72.6	71.0
160	83.5	83.4	83.4	79.7	80.2	80.4	80.1	78.2	77.8	75.1	74.6	74.4
200	84.5	84.4	84.3	81.2	81.8	81.8	80.8	80.0	79.3	79.0	78.5	78.2
250	83.6	84.3	84.5	79.6	81.2	81.6	79.3	79.7	79.0	79.3	80.5	80.3
315	84.6	84.6	84.7	77.8	79.3	79.7	78.1	75.2	74.8	74.7	75.7	76.0
400	88.1	88.4	88.5	83.2	84.9	84.9	83.2	81.5	80.9	76.1	76.1	75.8
500	86.5	86.9	87.2	80.8	82.2	82.5	80.6	79.3	79.0	78.2	79.0	78.9
630	87.2	88.0	88.1	81.4	82.4	82.6	81.1	81.0	80.6	78.9	79.1	78.6
800	88.7	89.0	89.2	77.9	79.0	79.2	77.8	76.2	75.7	79.3	80.7	80.5
1000	84.5	84.5	84.7	71.0	73.4	73.7	72.6	69.5	69.0	70.3	72.0	71.8
1250	82.7	82.8	83.0	72.7	73.8	74.1	72.0	70.7	70.1	72.3	71.6	71.5
1600	78.8	80.3	80.7	69.3	72.2	72.6	71.6	71.0	70.6	76.1	76.1	76.2
2000	76.2	78.2	78.3	70.7	72.6	72.8	72.1	68.5	67.5	78.3	79.0	79.3
2500	78.8	78.2	78.0	75.3	77.9	77.9	75.5	74.9	74.2	75.4	76.1	76.2
3150	79.8	79.3	79.6	68.2	69.9	70.2	67.8	65.2	64.5	65.2	64.7	64.8
4000	82.9	81.5	81.7	63.9	63.4	63.7	65.3	63.0	62.4	56.3	57.0	57.0
5000	78.5	77.4	77.7	64.0	64.1	64.3	63.5	60.6	59.9	53.7	53.3	53.2
6300	71.0	71.4	72.4	57.6	59.2	60.2	57.2	55.6	55.8	46.0	44.5	44.3
8000	58.7	55.8	57.9	47.3	48.2	50.3	44.1	41.4	41.6	36.9	36.1	34.3
10000	56.0	50.2	53.1	39.6	37.5	37.2	41.0	36.9	31.0	32.6	32.5	-26.0
A	94.4	94.5	94.7	86.7	87.4	87.8	86.1	85.2	85.5	86.2	86.8	86.8
L	96.6	96.9	97.0	90.4	91.7	91.9	90.3	89.2	88.7	88.7	89.3	89.1

Tabela D.6 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	60.1	59.9	63.0	58.1	57.1	55.4	57.9	57.8	56.6	55.1	56.3	-48.3
63	67.6	67.1	67.7	65.5	64.4	64.0	65.4	65.5	63.4	63.5	63.9	61.0
80	72.9	72.7	74.1	70.8	70.5	71.9	71.4	71.0	72.0	69.4	70.0	71.0
100	76.2	75.9	76.1	75.1	74.4	74.3	74.8	74.4	74.2	75.9	75.7	75.0
125	76.7	75.8	76.2	70.4	69.3	70.0	70.6	70.3	71.1	72.7	73.0	72.2
160	80.6	79.6	80.1	75.1	74.3	74.6	75.7	75.2	75.4	67.4	67.9	67.6
200	82.4	82.1	82.1	78.5	77.2	77.3	78.1	78.1	78.1	74.9	75.4	75.3
250	83.9	83.7	83.6	79.9	79.3	79.1	79.7	79.7	79.5	79.1	79.2	78.9
315	82.2	81.5	82.0	76.1	75.0	75.6	76.1	76.4	76.8	77.8	77.8	77.9
400	86.9	86.4	86.4	80.6	79.9	79.8	80.8	80.9	80.8	72.4	71.8	71.8
500	86.4	86.0	86.2	81.1	80.3	80.5	80.8	80.9	81.1	77.0	77.7	77.6
630	87.2	86.7	86.7	79.5	78.9	78.8	79.6	79.3	79.3	74.7	75.6	75.4
800	87.3	86.9	87.1	75.3	74.9	74.9	74.8	74.5	74.6	79.6	79.9	79.9
1000	83.1	82.8	83.0	71.4	70.7	70.8	71.4	71.7	71.6	72.6	72.8	72.7
1250	81.7	81.3	81.6	70.4	69.5	69.7	69.9	70.0	70.1	68.9	67.6	68.0
1600	83.6	82.7	83.1	69.3	67.8	68.0	70.7	70.6	70.7	67.9	70.7	70.9
2000	83.1	81.7	82.1	70.0	68.6	68.7	69.7	69.2	69.2	74.0	76.2	76.5
2500	79.7	78.4	78.8	71.0	70.5	70.5	71.1	71.7	71.6	69.1	71.9	72.0
3150	77.3	75.9	76.2	64.7	62.4	62.6	65.9	64.7	64.7	58.6	59.2	59.1
4000	76.4	75.8	75.6	62.9	62.0	61.9	65.1	64.9	64.8	58.1	55.7	55.8
5000	72.7	71.8	71.8	65.6	64.0	64.2	63.1	62.7	62.8	56.5	54.9	55.1
6300	70.7	69.1	70.1	58.0	56.0	57.0	57.1	56.1	56.8	45.5	40.8	40.1
8000	61.1	57.1	59.2	45.8	41.4	42.6	44.1	42.1	43.0	33.9	33.2	27.0
10000	59.2	52.7	55.7	39.2	35.0	30.9	40.6	38.0	36.8	30.6	31.4	-27.8
A	93.9	93.3	93.5	84.7	83.9	84.0	84.7	84.6	84.7	83.7	84.6	84.6
L	95.8	95.2	95.4	88.6	87.9	87.9	88.6	88.6	88.6	87.0	87.5	87.4

Tabela D.7 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 1 (RS:F) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	58.0	58.8	59.9	56.6	58.2	-52.4	57.2	57.8	58.9	56.5	57.6	57.4
63	68.5	69.5	68.1	67.2	69.0	67.8	67.7	68.2	67.3	67.5	67.6	65.9
80	77.8	78.7	79.4	76.5	77.9	78.7	76.9	77.4	78.2	76.0	76.9	77.8
100	86.2	87.0	86.7	85.4	86.3	85.7	85.9	86.2	85.7	85.6	86.1	85.3
125	88.3	89.5	89.6	87.8	89.0	88.9	88.4	88.8	88.8	87.8	88.2	88.1
160	87.6	88.6	89.3	87.1	87.3	88.1	87.0	88.2	88.8	87.1	87.3	88.0
200	82.8	84.3	84.5	80.5	82.2	82.4	81.2	81.7	82.1	81.0	81.3	81.6
250	73.0	74.7	75.6	70.9	73.5	74.2	72.7	71.5	71.9	69.2	71.4	71.5
315	71.5	72.8	72.7	71.1	69.8	70.2	70.0	71.3	71.5	70.9	72.3	71.5
400	69.0	70.6	71.0	66.1	67.9	67.9	67.3	68.6	68.4	65.3	65.6	65.0
500	64.7	66.3	66.0	61.9	62.3	62.2	62.1	62.8	62.5	60.2	58.9	58.6
630	69.2	70.4	70.5	68.0	69.8	69.7	69.4	68.8	68.8	65.9	66.3	66.2
800	66.8	68.0	68.2	64.7	66.2	66.3	65.2	65.4	65.5	66.5	66.9	67.0
1000	59.8	61.5	61.7	56.9	57.6	57.7	57.2	57.9	58.0	56.9	57.9	57.9
1250	49.7	50.5	50.8	42.9	46.4	45.4	45.4	43.9	41.8	45.8	44.9	44.0
1600	45.3	46.2	45.9	41.0	42.8	42.0	41.9	41.7	39.9	38.6	40.9	38.2
2000	43.9	43.3	42.4	41.3	40.9	38.9	37.6	41.4	39.7	33.7	34.2	-30.2
2500	35.8	36.9	-31.3	32.9	38.6	29.9	32.9	35.8	-32.9	30.2	33.9	-34.8
3150	30.0	35.5	23.4	27.7	33.5	-25.5	26.6	30.8	-24.7	28.0	33.0	-26.9
4000	28.2	29.2	-25.4	27.0	27.4	-22.9	27.1	26.5	-23.0	26.8	27.0	-22.8
5000	27.4	31.1	-31.6	27.0	30.7	-31.5	27.0	30.7	-31.9	26.7	30.4	-31.7
6300	23.9	34.4	-25.8	23.2	34.4	-26.0	23.3	31.0	6.7	23.2	33.2	-23.4
8000	25.4	16.4	9.6	25.3	16.8	8.2	25.4	11.3	1.3	25.4	18.4	8.2
10000	26.2	25.1	-25.3	26.2	24.6	-25.0	26.2	24.5	-24.7	26.3	24.8	-25.1
A	79.3	80.5	80.8	78.2	79.1	79.4	78.5	79.2	79.4	78.2	78.6	78.8
L	93.0	94.1	94.3	92.2	93.1	93.3	92.6	93.2	93.4	92.3	92.6	92.7

Tabela D.8 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 2 (RS:F) u [dB]

<i>f</i> [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	58.4	58.6	56.2	57.3	56.2	53.5	56.6	56.8	57.9	55.8	55.7	-49.1
63	68.8	68.7	67.8	67.7	67.0	66.1	67.4	67.3	65.9	66.2	66.2	65.3
80	77.9	77.6	78.5	76.5	76.1	77.1	76.3	76.6	77.4	75.3	75.0	76.0
100	86.5	86.1	85.7	85.7	84.9	84.4	85.6	85.1	84.7	85.7	84.9	84.3
125	89.2	89.3	89.1	88.4	87.3	87.3	88.3	88.3	88.1	87.5	87.2	87.1
160	88.4	88.2	88.8	87.4	86.3	86.9	87.0	87.4	88.1	87.3	86.7	87.3
200	83.9	84.4	84.4	81.3	81.4	81.3	81.4	82.2	82.4	81.6	81.2	81.4
250	76.9	76.5	77.1	74.2	72.1	72.6	74.8	75.2	75.6	71.3	70.0	70.6
315	71.4	71.8	72.4	70.0	70.5	70.0	70.4	70.2	71.1	70.4	70.5	70.6
400	71.1	71.1	71.1	69.1	68.1	67.2	68.4	69.2	68.8	65.2	65.1	64.7
500	64.5	64.9	64.9	61.6	62.1	60.6	61.8	62.5	62.5	58.0	56.1	55.5
630	68.9	68.9	68.8	67.4	65.6	65.4	67.0	67.4	67.3	62.7	62.7	62.6
800	68.8	68.9	69.0	64.5	63.5	63.5	64.5	65.5	65.5	64.3	64.1	64.2
1000	62.4	62.4	62.7	57.0	56.1	56.0	57.1	56.7	56.8	58.0	57.5	57.7
1250	51.1	50.7	50.9	42.7	44.9	41.8	44.7	47.6	47.1	47.2	47.9	47.4
1600	44.8	44.4	43.7	42.5	43.6	38.6	41.1	42.7	41.6	43.4	42.0	40.5
2000	45.1	42.6	41.2	38.7	39.8	35.0	39.1	39.5	35.9	40.6	38.7	34.1
2500	37.3	37.2	-30.4	32.7	37.1	-38.2	33.8	34.4	-34.4	30.1	33.7	-34.7
3150	32.9	36.1	28.2	27.5	35.0	-29.4	27.4	32.3	-26.4	27.1	33.7	-28.5
4000	30.3	29.7	-26.0	27.0	36.3	32.0	27.4	26.5	-23.0	26.5	24.0	-20.8
5000	28.2	31.2	31.8	26.9	37.0	-30.0	26.9	30.4	-31.5	26.7	30.2	-31.8
6300	24.8	34.4	-25.5	22.7	36.5	-27.8	23.3	34.4	-26.2	22.8	31.0	7.9
8000	25.7	16.5	5.8	25.4	26.7	22.3	25.4	4.9	-5.9	25.4	13.1	5.7
10000	26.3	25.0	-25.5	26.2	26.4	-24.1	26.3	24.8	-25.1	26.4	24.5	-24.6
A	80.3	80.3	80.5	78.7	77.8	77.9	78.5	78.9	79.1	78.1	77.6	77.9
L	93.8	93.7	93.8	92.7	91.7	91.9	92.5	92.6	92.8	92.2	91.8	91.9

Tabela D.9 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 3 (RS:F) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	57.0	57.3	52.6	55.2	55.8	53.0	56.8	56.3	57.9	54.5	54.3	53.5
63	67.2	67.4	65.9	66.0	65.9	64.6	66.5	66.1	66.6	64.7	64.7	61.7
80	76.1	76.7	77.5	74.4	75.0	75.9	75.3	75.1	75.9	73.5	73.0	74.2
100	84.8	85.5	85.2	83.6	84.1	83.7	84.0	84.5	84.1	83.8	83.6	83.1
125	88.2	88.6	88.5	86.2	86.8	86.7	87.7	87.2	86.9	86.4	86.1	85.9
160	87.6	87.7	88.3	86.1	86.1	86.6	86.5	86.4	87.0	86.5	86.1	86.8
200	83.8	84.8	84.8	80.6	81.3	81.2	81.2	81.5	81.6	81.2	80.2	80.5
250	78.8	80.2	80.4	74.7	74.5	75.0	77.6	76.8	76.9	72.3	73.4	73.6
315	72.8	73.2	73.9	69.4	71.9	71.7	71.5	72.3	72.8	69.9	68.1	68.5
400	69.8	71.6	71.8	66.4	68.7	67.8	66.1	65.9	66.1	64.7	63.4	63.2
500	63.8	64.1	63.9	60.7	59.5	59.4	64.5	63.8	63.4	58.6	60.5	60.3
630	66.6	67.2	67.2	61.4	61.4	61.0	62.6	61.9	61.3	56.8	56.0	55.5
800	68.5	68.7	68.8	61.1	60.9	61.0	64.2	63.6	63.6	59.8	58.5	58.7
1000	63.0	63.9	64.2	54.7	55.2	55.3	55.0	55.3	55.3	55.1	54.5	54.6
1250	52.9	54.1	54.3	43.0	43.4	41.4	48.2	47.5	47.0	47.6	46.9	46.4
1600	43.6	42.9	42.1	38.4	39.1	34.8	40.3	40.7	38.3	39.6	39.0	34.4
2000	41.4	41.0	39.0	38.6	38.7	34.1	40.0	37.9	32.4	39.0	38.8	34.9
2500	37.5	40.3	36.1	32.6	34.2	-34.0	34.1	34.9	-34.0	32.6	34.8	-33.8
3150	34.5	34.8	19.8	27.6	35.0	-30.0	27.0	34.6	-29.3	26.6	35.0	-29.5
4000	32.2	33.5	-25.3	26.7	25.9	-21.7	26.8	26.2	-22.6	26.3	24.2	-20.2
5000	28.7	32.0	-31.5	26.7	30.5	-31.8	26.7	30.3	-31.6	26.6	30.3	-31.7
6300	24.2	34.4	-25.2	22.8	34.5	-27.0	23.2	34.4	-26.6	22.7	34.5	-26.4
8000	25.3	0.0	-5.3	25.3	0.8	12.4	25.3	9.4	-5.9	25.4	0.0	-2.9
10000	26.2	25.3	-25.8	26.4	24.4	-24.4	26.4	24.8	-24.6	26.5	24.8	-24.2
A	79.8	80.5	80.7	77.1	77.6	77.7	78.2	78.0	78.3	77.2	76.8	77.0
L	92.9	93.4	93.5	91.0	91.4	91.4	91.9	91.7	91.8	91.2	90.8	91.0

Tabela D.10 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački I' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	62.3	63.1	65.0	59.6	61.1	56.8	60.4	60.2	58.4	58.3	58.3	-38.0
63	72.6	73.5	73.4	69.9	70.5	70.6	70.6	70.2	68.4	69.0	68.5	68.0
80	80.3	81.1	82.2	77.2	78.4	79.7	78.2	78.2	78.7	76.4	76.2	76.4
100	84.5	85.5	86.3	81.7	82.6	83.9	82.2	82.8	82.6	82.2	82.9	81.7
125	88.0	88.7	87.8	82.3	84.0	83.9	84.1	83.3	83.0	79.7	79.7	77.2
160	91.0	91.4	91.4	86.5	88.1	88.0	88.4	87.6	86.9	84.6	83.9	83.1
200	88.2	88.9	88.9	85.0	86.1	86.3	85.5	85.5	85.0	84.0	84.1	83.7
250	83.7	84.7	85.2	79.1	80.7	81.6	80.1	80.4	80.1	79.9	80.0	79.9
315	83.8	84.7	84.5	77.5	78.9	78.9	78.9	78.3	77.7	72.1	72.9	72.3
400	82.9	83.7	83.9	77.2	80.0	80.1	79.4	79.4	78.9	75.5	74.6	74.0
500	79.1	80.1	80.2	72.8	74.8	75.0	74.7	74.5	74.0	69.8	71.2	70.9
630	76.0	77.2	77.3	69.5	71.4	71.7	71.1	71.2	70.9	69.1	69.5	69.1
800	74.1	75.1	75.2	66.4	67.7	67.8	67.8	67.4	67.0	56.7	59.5	59.3
1000	66.8	67.8	67.9	57.3	58.3	58.4	58.2	57.5	56.8	56.2	53.3	52.8
1250	58.2	59.4	59.5	48.3	49.9	49.8	50.2	49.9	49.0	51.4	52.4	52.2
1600	50.2	50.4	50.6	40.8	43.2	42.4	44.8	44.0	42.5	41.4	40.2	37.4
2000	46.4	45.4	45.1	40.2	43.5	42.3	44.0	43.3	41.4	44.0	43.4	42.4
2500	39.9	42.4	40.1	37.0	37.6	-22.2	36.3	37.0	-31.1	36.9	39.4	33.7
3150	37.5	39.1	36.3	29.3	35.4	20.6	30.2	35.2	-19.2	30.1	35.1	-8.7
4000	33.8	37.3	32.5	27.0	28.6	-25.4	28.2	29.4	-25.7	27.3	28.4	-22.6
5000	29.7	33.9	-30.6	27.5	31.5	-31.7	27.6	31.3	-31.5	27.1	30.8	-31.6
6300	25.0	33.7	20.4	23.9	34.0	-24.7	24.6	33.9	-22.3	24.2	33.8	-23.2
8000	25.8	21.5	7.8	25.4	23.7	14.0	25.7	24.6	12.3	25.6	24.2	14.7
10000	27.3	28.4	-27.4	26.4	25.7	-25.8	27.0	26.1	-26.4	27.2	27.7	-27.2
A	85.7	86.5	86.6	80.5	82.2	82.4	82.0	81.7	81.2	78.9	78.9	78.4
L	95.8	96.5	96.5	91.4	92.8	93.1	92.7	92.4	91.9	90.1	90.0	89.3

Tabela D.11 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 2' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	61.0	61.7	60.5	58.3	59.3	61.1	58.8	58.0	60.0	56.6	56.8	59.4
63	71.0	71.8	71.1	68.6	69.1	68.6	68.7	68.3	66.1	67.0	66.7	64.9
80	79.2	79.4	80.7	76.4	77.2	78.5	77.0	76.4	77.1	75.5	75.0	75.9
100	84.5	84.8	85.3	81.9	82.1	82.9	82.2	81.7	81.2	82.3	82.4	81.4
125	86.7	86.5	86.6	80.0	80.8	81.3	80.2	78.5	78.4	78.8	78.9	77.6
160	89.1	89.3	89.4	84.9	85.3	85.5	85.7	84.3	84.0	79.3	79.3	78.9
200	87.3	88.0	87.9	83.7	84.3	84.4	83.8	83.1	82.6	81.9	81.5	81.2
250	84.0	85.4	85.6	80.1	81.1	81.5	80.2	80.3	79.9	80.6	80.5	80.2
315	82.2	82.4	82.5	74.7	76.4	76.9	75.5	73.1	73.2	72.6	73.2	73.6
400	83.2	84.1	84.1	78.2	79.4	79.4	78.3	76.9	76.5	71.0	71.0	70.6
500	79.0	79.7	80.0	73.0	74.4	74.8	73.0	72.2	72.2	71.0	71.0	71.0
630	77.2	77.9	78.1	70.6	71.5	71.7	71.0	71.0	70.7	67.9	67.5	67.1
800	74.9	75.7	75.8	63.2	64.3	64.7	63.7	62.0	61.8	66.3	67.0	66.9
1000	66.5	66.9	67.1	52.8	54.9	55.3	54.3	52.3	51.8	53.1	54.6	54.1
1250	59.4	59.7	60.0	49.3	50.1	50.0	48.3	46.7	45.3	47.8	46.9	45.9
1600	50.7	52.4	52.6	40.4	43.0	42.1	43.2	42.7	40.9	46.5	46.3	45.8
2000	43.0	45.7	45.2	37.1	38.9	34.6	38.6	36.3	-25.8	45.6	45.7	45.2
2500	40.1	40.4	36.8	37.7	39.9	35.8	38.1	38.3	21.0	38.2	38.9	31.9
3150	38.9	39.4	37.3	29.1	34.0	-23.6	29.1	32.8	-26.8	29.5	34.5	-25.7
4000	38.0	38.0	34.5	27.4	26.4	-22.7	27.4	26.7	-22.9	28.5	27.2	-24.1
5000	32.9	34.4	-29.2	27.3	30.9	-31.8	27.3	30.6	-31.6	28.7	30.3	-31.7
6300	26.6	31.7	19.1	24.0	34.4	-25.6	23.8	34.4	-25.6	24.6	34.1	-24.8
8000	25.7	20.2	9.1	25.5	15.3	4.4	25.4	19.7	10.1	27.0	21.1	10.8
10000	26.7	26.7	-26.3	26.3	24.7	-25.1	26.4	24.9	-25.2	27.3	25.9	-26.3
A	85.3	86.0	86.1	80.0	80.9	81.2	80.3	79.3	79.0	77.7	77.6	77.4
L	94.7	95.2	95.3	90.4	91.0	91.4	90.8	89.8	89.5	88.4	88.3	87.9

Tabela D.12 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 2) u mernoj tački 3' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod	ISO 11201 (CM)	ISO 11201 (SI)	SI metod
50	58.8	58.9	57.0	56.9	56.3	60.5	57.7	54.4	57.4	55.5	55.3	51.9
63	69.3	68.9	68.6	66.5	66.4	65.8	67.9	65.4	65.4	65.9	65.1	65.1
80	77.9	77.1	78.2	75.1	75.0	76.3	75.5	74.0	75.1	74.5	73.2	74.0
100	83.1	83.0	83.4	80.9	81.0	81.0	81.5	81.3	80.7	82.5	81.3	80.6
125	83.8	83.9	84.4	77.1	76.8	77.8	78.3	78.9	78.2	79.7	78.9	78.0
160	86.1	85.7	86.3	80.5	79.6	80.1	81.6	72.4	72.6	71.5	72.1	72.3
200	85.7	85.4	85.4	81.0	80.7	80.8	81.9	78.0	77.9	78.5	77.9	77.9
250	84.6	84.5	84.5	80.0	79.7	79.5	80.5	79.5	79.3	80.3	79.4	79.1
315	80.0	79.7	80.3	74.1	74.1	74.7	75.2	75.5	75.6	76.3	75.4	75.5
400	81.6	81.7	81.8	75.4	74.9	74.8	76.2	66.8	67.0	67.8	67.4	67.5
500	79.4	79.0	79.3	73.7	73.2	73.4	74.2	69.9	69.8	69.8	69.7	69.6
630	76.6	76.4	76.6	68.7	68.0	68.0	69.4	64.4	64.3	64.7	64.3	64.1
800	73.5	73.2	73.5	61.4	61.3	61.4	61.7	66.2	66.2	66.5	66.2	66.2
1000	65.5	65.5	65.8	54.1	53.4	53.3	54.6	54.1	53.9	54.7	54.0	53.8
1250	58.6	58.5	58.9	46.9	46.5	45.6	46.9	45.0	44.2	47.1	45.1	43.9
1600	54.8	54.2	54.4	40.2	39.6	35.9	42.6	41.3	39.7	39.4	41.3	39.4
2000	50.1	49.4	49.5	37.1	35.6	-27.8	37.1	42.9	41.7	41.2	42.7	41.5
2500	42.7	42.0	40.5	34.3	35.4	-33.6	34.8	36.1	-32.3	33.6	36.2	-32.3
3150	36.2	37.4	32.9	27.4	33.8	-28.2	27.9	33.8	-28.3	26.6	33.6	-28.3
4000	32.7	32.9	-27.2	26.6	27.0	-23.3	27.3	25.8	-22.3	26.5	24.2	-20.9
5000	29.4	32.7	-31.5	27.3	30.4	-31.6	27.2	29.8	-31.6	26.9	29.9	-31.7
6300	26.5	32.3	19.8	23.5	31.0	1.2	23.6	34.4	-26.1	23.4	31.0	3.7
8000	25.6	21.7	10.9	25.4	11.9	-19.0	25.3	14.5	5.4	25.4	15.3	5.8
10000	26.5	25.8	-25.9	26.3	24.2	-24.6	26.2	25.1	-25.8	26.6	24.8	-25.5
A	84.2	84.0	84.2	78.2	77.8	77.9	78.6	76.5	76.9	76.8	76.1	76.0
L	93.0	92.8	93.1	88.1	87.8	88.0	88.9	86.7	86.5	87.5	86.6	86.3

Tabela E.1 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1 (RS:F) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod
50	56.0	56.1	59.5	55.2	56.0	59.5	54.7	55.1	59.9	54.6	54.6	59.6
63	68.1	66.8	70.2	65.2	64.8	69.2	65.5	65.2	68.5	62.4	61.9	67.5
80	67.1	67.2	73.4	67.4	66.6	73.6	66.6	67.1	73.3	69.0	69.1	74.5
100	78.5	78.1	76.3	74.6	74.8	73.5	74.2	73.5	73.0	70.9	70.6	73.9
125	82.6	80.2	78.7	80.4	79.3	78.0	79.3	79.6	76.6	77.9	75.9	74.7
160	82.4	82.3	82.4	80.8	80.4	80.8	79.7	79.5	82.8	77.7	77.2	81.4
200	81.4	80.3	78.2	78.4	78.3	76.5	79.0	78.1	73.4	77.2	77.6	76.9
250	79.8	78.8	76.8	78.3	77.7	74.2	77.4	77.4	73.0	78.8	79.2	78.3
315	80.8	79.2	70.5	79.6	79.0	73.8	77.6	77.6	73.2	80.1	78.7	72.3
400	81.0	79.0	65.4	79.0	77.2	67.4	77.5	77.3	62.1	76.9	75.7	71.8
500	80.0	80.0	76.6	78.1	76.6	73.7	78.5	78.1	74.5	76.9	77.2	72.5
630	81.8	80.9	79.8	80.0	80.4	79.5	79.9	80.5	76.1	79.2	78.6	75.0
800	82.9	82.3	81.6	81.1	80.1	80.2	81.3	81.4	77.1	80.3	79.9	75.4
1000	79.1	78.6	77.5	77.3	77.1	74.7	76.7	77.0	74.5	75.3	75.4	71.8
1250	76.2	75.1	71.4	75.3	75.6	68.2	75.2	75.4	55.5	74.3	73.8	53.8
1600	78.5	77.7	73.5	77.2	77.1	73.7	76.2	76.1	71.2	77.0	75.8	70.4
2000	80.4	79.8	74.2	79.4	78.4	70.8	77.8	78.1	73.7	77.7	77.1	73.4
2500	78.8	78.4	69.3	77.9	77.5	70.0	76.5	77.1	70.8	76.1	75.4	68.7
3150	75.7	75.5	69.7	74.0	75.2	63.7	74.4	73.9	67.7	75.7	75.1	65.3
4000	75.4	74.3	68.4	73.4	74.5	67.2	73.8	74.2	66.9	74.1	72.6	66.3
5000	71.7	69.8	62.4	70.8	72.0	63.7	71.5	70.9	66.9	70.3	69.1	64.5
6300	61.9	60.7	57.6	61.4	61.9	53.0	61.3	60.1	57.7	59.3	59.0	56.2
8000	54.5	53.2	53.0	52.6	51.3	41.0	52.2	52.2	52.5	52.4	52.0	49.6
10000	50.3	48.1	-27.6	49.3	49.7	33.7	49.5	49.2	42.5	48.3	46.8	39.5
A	90.0	89.2	86.0	88.5	88.2	84.6	87.9	88.1	83.3	87.6	87.0	82.3
L	92.6	91.7	89.5	90.8	90.4	88.1	90.2	90.3	87.5	89.8	89.2	87.2

Tabela E.2 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2 (RS:F) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod
50	56.5	55.5	60.6	53.4	51.6	54.7	53.7	53.4	57.7	53.0	52.6	60.4
63	67.9	67.2	70.0	62.3	62.0	68.6	65.5	63.7	67.9	60.7	59.7	69.1
80	65.5	65.0	70.6	61.8	61.0	71.5	63.4	62.6	71.5	62.9	61.5	74.8
100	78.8	78.1	75.9	73.6	69.8	73.2	74.4	72.7	73.1	69.7	67.6	75.0
125	81.7	80.5	79.3	78.5	75.5	78.0	79.2	76.6	76.3	75.8	76.6	75.4
160	81.7	81.1	81.8	77.5	74.4	79.7	78.5	76.8	81.8	77.1	76.0	83.2
200	80.3	79.0	76.3	76.0	75.9	75.3	77.7	77.2	63.0	75.0	77.0	78.2
250	79.5	79.2	77.5	76.4	73.8	73.5	76.6	77.4	74.5	76.7	75.3	79.2
315	79.5	79.4	74.5	78.5	74.5	75.5	77.3	76.2	67.6	76.8	78.0	73.6
400	79.9	79.0	72.3	77.4	73.8	71.7	77.5	76.7	71.0	75.8	76.1	72.2
500	78.5	76.8	74.4	75.6	74.1	69.0	77.2	77.1	73.6	75.2	75.7	73.9
630	80.0	79.6	78.7	78.6	76.2	76.1	79.1	78.2	77.8	76.5	79.1	75.5
800	82.4	82.5	82.7	78.6	77.7	76.1	80.1	78.7	79.1	77.7	77.8	76.9
1000	79.7	78.7	79.5	74.3	73.2	74.3	76.1	75.6	71.7	75.8	74.5	72.9
1250	76.7	76.4	74.5	73.2	73.2	71.2	76.1	73.8	70.3	73.6	72.6	55.5
1600	78.3	77.7	73.4	75.2	74.7	70.6	76.6	74.7	62.1	75.9	74.6	71.1
2000	79.8	78.9	74.2	76.8	75.5	61.8	77.9	75.9	74.5	77.8	78.4	75.4
2500	79.2	78.1	72.0	75.0	75.3	73.0	76.8	76.2	72.8	74.6	75.5	68.9
3150	76.9	75.1	72.5	71.9	71.5	69.9	73.5	74.4	68.1	73.2	72.3	67.0
4000	75.5	74.4	69.8	71.3	70.7	70.5	74.4	73.2	70.3	72.2	72.6	67.9
5000	71.5	69.7	65.4	68.2	65.1	65.0	69.7	68.3	64.5	69.0	69.4	65.9
6300	61.9	60.8	56.3	58.6	57.1	57.2	60.4	59.4	57.9	58.6	59.1	56.5
8000	55.1	54.2	49.9	49.5	49.7	51.8	52.0	50.0	51.3	51.4	49.0	50.8
10000	50.8	48.3	40.1	45.2	46.0	40.0	48.7	46.5	40.4	46.4	47.2	39.8
A	89.7	88.9	86.9	86.2	85.1	83.1	87.6	86.5	84.0	86.2	86.4	83.5
L	92.0	91.3	89.7	88.7	86.9	86.9	89.7	88.6	87.4	88.1	88.4	88.5

Tabela E.3 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3 (RS:F) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod
50	55.2	55.5	54.0	52.1	49.9	52.9	52.7	49.3	58.3	50.4	52.0	52.5
63	67.8	69.2	66.7	62.8	62.5	63.7	65.0	61.9	66.6	61.2	62.6	68.0
80	65.1	66.0	65.6	60.0	59.2	68.5	62.2	59.4	65.5	59.8	55.0	66.6
100	78.4	79.6	74.4	73.1	76.1	70.2	74.6	76.0	68.8	68.9	69.7	67.6
125	80.9	81.1	74.5	77.2	73.3	75.3	80.1	80.8	76.7	74.9	73.5	75.4
160	80.3	81.4	76.7	77.4	75.7	78.7	77.9	75.2	79.8	75.4	72.8	75.9
200	79.3	80.1	79.1	74.5	72.9	77.3	77.2	73.6	72.8	73.6	74.6	66.7
250	80.4	81.5	74.5	75.3	78.7	77.9	76.6	78.1	73.9	75.0	77.6	77.6
315	79.9	80.8	73.3	76.2	79.5	70.6	75.6	77.1	70.4	74.6	68.7	70.7
400	78.5	79.2	76.5	76.8	74.0	59.8	77.3	78.8	73.4	75.6	76.8	73.8
500	78.0	79.0	69.9	74.9	74.8	63.4	77.7	75.4	74.9	73.8	77.5	74.3
630	80.8	81.7	76.6	76.7	78.5	70.3	77.6	78.3	74.1	77.1	78.8	72.2
800	83.0	83.9	83.9	79.0	75.5	77.9	78.6	80.0	76.7	77.8	73.4	69.8
1000	80.5	80.9	77.4	74.8	71.6	73.6	75.5	77.4	76.2	74.3	73.6	75.1
1250	76.9	77.1	72.5	72.5	76.0	67.1	74.2	71.7	69.1	72.3	75.3	72.0
1600	77.9	78.0	75.5	74.6	72.7	71.2	76.5	76.8	74.8	74.7	76.4	73.6
2000	79.4	79.4	68.7	76.5	77.0	73.7	78.5	80.5	72.9	76.3	72.5	72.9
2500	78.3	79.1	60.1	74.7	75.2	72.5	76.6	74.4	64.4	74.1	69.1	67.8
3150	76.0	76.6	73.3	71.3	74.3	61.6	73.4	70.1	69.7	72.4	71.9	71.5
4000	75.9	76.8	73.4	71.1	71.0	61.7	72.7	69.8	66.7	71.3	73.7	69.9
5000	72.4	72.5	70.2	67.1	66.8	62.9	69.1	64.7	59.3	67.6	61.3	64.7
6300	62.6	63.0	60.7	57.6	59.1	51.0	59.3	55.4	51.5	57.3	60.6	53.7
8000	55.0	55.1	53.1	49.5	50.5	49.7	51.0	51.9	49.5	50.4	50.5	53.0
10000	51.0	49.1	40.3	45.9	41.7	-22.7	46.9	46.2	33.1	45.7	43.2	39.7
A	89.7	90.3	86.8	85.7	85.8	82.7	87.1	87.3	83.6	85.4	85.1	83.0
L	91.9	92.6	88.8	87.9	88.1	86.2	89.3	89.5	86.6	87.1	87.1	85.6

Tabela E.4 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 1' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod
50	60.4	59.9	66.6	55.0	55.1	57.0	55.5	57.1	61.6	55.4	55.8	58.4
63	71.5	71.9	75.0	65.3	65.4	69.4	67.0	67.4	70.3	62.5	63.7	65.3
80	75.2	74.4	71.3	66.8	68.4	69.2	69.5	69.1	70.2	68.0	68.6	69.1
100	81.4	81.7	81.3	72.4	74.2	74.4	74.3	73.8	72.9	68.3	68.9	65.9
125	86.8	86.6	83.1	79.9	81.0	78.4	82.5	82.5	79.4	79.8	80.4	75.5
160	85.5	85.9	86.7	78.6	79.0	80.2	80.6	81.3	81.6	78.1	79.3	77.3
200	86.4	86.0	86.2	78.1	78.7	80.3	81.6	81.8	82.7	77.9	79.0	78.9
250	86.6	87.1	84.5	79.5	80.1	77.4	80.4	80.7	79.1	78.5	79.3	78.7
315	87.1	87.5	86.7	79.2	79.0	79.0	80.1	80.5	79.6	79.5	79.5	75.7
400	89.5	89.9	89.3	81.0	82.3	83.9	84.0	84.6	82.4	81.2	81.2	77.6
500	89.9	89.0	88.7	83.0	83.1	82.1	83.5	83.6	82.1	80.6	80.7	77.1
630	89.4	89.3	88.5	80.5	81.7	80.7	82.2	82.2	82.0	81.7	83.0	80.1
800	89.5	89.5	90.2	82.0	82.1	81.2	82.3	82.5	80.0	81.1	81.8	76.3
1000	86.6	86.8	87.0	77.6	77.6	75.0	78.8	78.6	75.7	76.8	77.4	71.4
1250	84.5	84.5	84.7	75.3	76.7	69.8	77.2	77.8	75.2	75.9	77.2	75.4
1600	83.5	83.4	79.2	78.3	78.2	61.1	77.4	78.7	73.7	77.6	78.6	75.3
2000	84.6	84.3	77.9	80.4	80.7	76.0	80.8	81.6	75.9	80.5	81.0	78.9
2500	84.5	84.8	81.5	78.7	78.9	74.6	79.8	79.1	75.5	80.0	79.4	77.7
3150	81.7	81.7	79.5	76.0	76.9	69.3	76.5	76.6	72.5	76.1	76.6	73.9
4000	82.4	81.9	81.6	74.4	74.6	68.7	75.0	75.5	70.4	74.0	74.2	71.3
5000	78.4	77.1	75.7	71.3	71.0	66.3	71.0	71.3	66.8	70.9	70.9	66.7
6300	68.8	66.9	65.1	61.2	61.3	58.0	61.7	61.7	58.5	60.2	60.0	56.9
8000	62.1	59.2	61.0	53.6	54.1	52.9	53.5	53.2	52.7	51.9	51.8	51.8
10000	55.9	54.6	52.6	47.5	47.9	23.6	48.7	48.7	38.6	47.9	47.8	40.2
A	96.7	96.6	95.7	89.6	90.0	87.4	90.4	90.7	87.9	89.5	90.0	87.0
L	99.0	99.0	98.3	91.6	92.1	91.0	93.0	93.3	91.6	91.3	91.9	89.1

Tabela E.5 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 2' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod
50	58.3	59.7	63.0	55.4	56.9	60.1	54.8	54.9	60.1	54.8	55.6	53.5
63	71.0	70.9	71.9	66.9	66.4	71.4	66.0	64.8	67.7	64.0	65.2	67.1
80	71.5	72.1	73.5	65.6	65.1	68.4	64.9	64.4	67.0	63.1	64.7	68.5
100	80.2	79.0	79.6	74.6	75.8	75.5	72.8	72.7	72.2	70.2	70.1	62.3
125	85.0	81.2	80.2	81.6	80.2	76.5	80.1	79.8	75.6	80.3	80.1	72.2
160	84.3	84.2	83.2	78.6	79.4	80.0	78.7	78.1	78.9	77.5	78.1	73.7
200	84.3	84.6	84.7	78.7	79.0	81.5	78.9	79.5	80.8	79.3	79.7	78.2
250	85.9	86.2	84.7	80.4	81.1	79.9	79.7	79.6	80.2	79.1	79.7	79.2
315	85.1	85.8	85.1	78.4	79.8	77.5	76.9	77.1	76.2	78.2	78.8	76.0
400	89.4	89.6	89.2	82.1	83.2	84.1	81.9	82.8	80.4	80.1	80.7	72.7
500	88.8	89.6	88.9	82.7	83.6	82.8	81.4	81.6	81.3	82.4	82.1	75.8
630	88.7	89.8	88.9	82.9	83.3	82.6	81.5	81.0	80.5	82.1	82.7	79.1
800	89.7	90.7	89.6	82.4	82.5	80.5	80.2	79.9	75.2	83.3	84.1	81.3
1000	85.0	85.9	85.6	78.9	80.0	76.0	77.8	77.2	72.3	77.1	78.1	73.0
1250	84.2	84.5	84.4	76.8	77.6	74.9	76.7	75.8	71.9	75.6	76.5	72.7
1600	82.7	80.7	79.3	78.5	79.8	70.1	76.9	77.4	71.2	78.8	79.5	77.1
2000	83.3	79.1	77.9	81.1	81.5	76.7	79.3	80.0	73.3	80.7	81.4	80.0
2500	83.2	78.2	77.7	80.7	80.6	76.5	78.8	78.9	77.1	80.0	80.4	78.9
3150	82.3	80.1	80.2	78.0	77.6	72.2	74.1	74.3	69.5	77.0	77.2	74.8
4000	82.6	83.1	82.9	75.1	74.9	68.6	74.6	73.9	69.8	74.5	74.9	71.1
5000	79.3	79.2	79.2	71.5	71.4	65.6	69.5	69.8	61.1	71.7	71.9	67.4
6300	72.7	71.8	72.6	62.5	62.6	60.1	61.0	60.8	58.9	60.9	60.2	56.7
8000	60.0	59.5	57.3	54.7	55.5	55.9	53.1	52.2	52.3	53.5	52.5	50.8
10000	57.1	54.9	52.6	49.0	49.8	38.4	48.1	47.6	39.5	48.4	48.5	36.6
A	96.1	96.1	95.4	90.6	91.1	88.3	89.1	89.1	86.2	90.2	90.7	87.9
L	98.2	98.4	97.7	92.5	93.0	91.6	91.3	91.3	89.7	91.9	92.3	89.2

Tabela E.6 Rezultati merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora (spektar 1) u mernoj tački 3' (RS:T) u [dB]

f [Hz]	RS:PS			RS:LS			RS:DS			RS:ZS		
	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod	ISO 11202 (CM)	ISO 11202 (SI)	SI metod
50	55.8	57.8	61.7	51.6	52.8	60.8	52.9	54.9	61.6	53.1	53.3	56.3
63	69.8	70.0	71.0	63.8	64.1	71.0	65.9	66.5	70.0	63.3	63.9	66.8
80	68.8	70.1	64.6	60.5	61.6	66.5	62.0	64.2	54.3	61.6	62.2	68.4
100	79.4	80.2	77.8	72.3	72.9	74.4	72.9	73.9	74.1	70.5	70.8	-60.3
125	83.6	84.0	77.3	76.2	77.7	58.1	79.6	80.5	75.3	79.1	80.2	67.9
160	82.8	83.4	81.5	75.8	76.9	72.9	78.2	79.9	77.7	77.8	79.0	73.4
200	83.3	83.9	84.0	75.3	76.0	77.9	77.5	78.8	81.4	78.4	79.4	78.3
250	84.5	84.6	84.9	78.1	78.6	79.4	78.4	78.9	81.8	78.5	79.7	80.4
315	84.6	86.2	84.8	76.4	77.4	77.2	76.1	77.8	78.6	77.9	78.4	75.1
400	87.8	89.3	88.5	79.8	80.5	82.1	80.9	82.3	80.8	78.6	78.4	-72.4
500	88.1	88.6	88.4	79.8	79.9	81.8	80.4	81.5	82.8	80.2	81.6	76.7
630	88.0	88.9	88.8	78.4	79.3	80.8	79.8	81.3	82.6	80.8	82.0	74.7
800	88.3	88.8	89.6	78.4	79.6	79.7	80.2	81.3	80.7	82.0	81.8	82.5
1000	84.1	85.4	85.4	75.2	76.0	75.3	75.5	76.5	77.7	77.3	77.9	76.2
1250	82.5	82.7	84.1	73.5	74.3	71.1	76.2	77.3	74.3	74.9	75.3	73.9
1600	84.1	84.9	85.1	75.9	77.0	69.7	77.6	78.4	71.8	77.9	78.5	75.4
2000	84.0	85.4	84.7	77.3	78.0	75.7	79.7	80.3	78.5	78.8	79.1	78.9
2500	82.6	84.4	79.7	76.4	76.9	76.5	77.9	79.4	76.2	78.2	79.0	79.4
3150	81.0	80.6	76.1	73.7	73.8	70.9	74.1	75.1	70.5	76.0	76.9	75.7
4000	79.1	79.5	77.0	71.9	71.9	69.7	74.3	74.4	69.5	73.8	74.3	72.9
5000	77.1	77.4	73.1	68.8	69.6	68.6	70.1	70.5	67.0	70.4	71.9	70.4
6300	70.9	71.1	73.0	59.4	59.4	61.5	60.4	60.4	59.4	60.8	60.1	58.0
8000	61.1	60.2	62.0	51.5	52.2	55.3	52.2	52.7	54.6	52.4	52.2	52.0
10000	60.7	57.3	58.3	46.5	47.2	39.2	48.2	47.9	41.3	47.5	47.9	39.9
A	95.2	96.1	95.6	87.0	87.7	87.1	88.5	89.6	88.4	88.9	89.5	88.0
L	97.2	98.0	97.5	89.1	89.8	89.8	90.5	91.7	91.3	90.7	91.4	89.2

Tabela E.7 Indikator lokalnog mernog okruženja K_3 u [dB] za merno okruženje MO2

f [Hz]	Merne pozicije					
	1	2	3	1'	2'	3'
50	7.97	8.35	8.91	4.59	6.03	7.70
63	7.29	7.66	8.20	4.07	5.43	7.03
80	6.46	6.81	7.33	3.47	4.71	6.21
100	6.17	6.51	7.02	3.26	4.46	5.92
125	6.03	6.36	6.87	3.16	4.34	5.78
160	5.38	5.70	6.19	2.73	3.80	5.15
200	4.98	5.28	5.75	2.47	3.47	4.75
250	4.36	4.65	5.09	2.09	2.98	4.16
315	4.05	4.32	4.74	1.90	2.74	3.85
400	4.07	4.34	4.76	1.91	2.75	3.87
500	4.20	4.47	4.90	1.99	2.85	4.00
630	4.48	4.77	5.21	2.16	3.08	4.27
800	4.60	4.89	5.34	2.23	3.17	4.39
1000	4.86	5.16	5.62	2.39	3.37	4.64
1250	4.98	5.29	5.75	2.47	3.47	4.76
1600	5.06	5.37	5.84	2.52	3.54	4.84
2000	5.05	5.36	5.83	2.52	3.53	4.83
2500	4.98	5.29	5.75	2.47	3.47	4.76
3150	4.85	5.16	5.62	2.39	3.37	4.64
4000	4.68	4.98	5.43	2.28	3.24	4.47
5000	4.50	4.79	5.24	2.17	3.09	4.29
6300	4.40	4.69	5.13	2.11	3.01	4.19
8000	3.89	4.16	4.57	1.81	2.62	3.70
10000	3.64	3.89	4.29	1.67	2.43	3.45

Tabela E.8 *Nivo zvučnog pritiska emisije u [dB] za različite orijentacije merne sonde ka referentnom izvoru*

f [Hz]	ISO 11201(SI)	Orijentacija merne sonde				
		α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
50	63.0	58.9	59.3	63.3	64.2	63.4
63	71.9	65.8	69.0	70.8	72.2	72.2
80	73.5	70.6	71.3	74.0	73.2	74.0
100	79.6	78.5	79.6	79.7	78.2	77.2
125	80.2	78.8	79.5	80.7	79.1	79.1
160	83.2	81.7	82.2	83.3	82.2	81.7
200	84.7	83.1	84.1	84.8	83.9	83.2
250	84.7	82.9	83.8	84.7	83.9	83.0
315	85.1	83.3	84.5	85.5	84.6	83.8
400	89.2	88.1	89.0	89.3	88.3	88.0
500	88.9	87.7	88.4	89.1	87.9	86.9
630	88.9	87.5	88.7	89.1	88.0	87.4
800	89.6	88.2	89.2	90.0	88.9	87.7
1000	85.6	83.7	84.7	85.6	85.0	83.9
1250	84.4	83.3	83.9	84.9	83.0	82.6
1600	79.3	77.4	79.2	79.6	77.9	78.2
2000	77.9	76.0	77.3	78.3	77.4	76.1
2500	77.7	76.4	76.9	78.1	76.5	76.0
3150	80.2	78.3	79.4	80.7	79.1	78.4
4000	82.9	81.4	82.6	83.3	81.5	81.1
5000	79.2	77.9	78.8	79.6	77.8	78.0
6300	72.6	71.5	72.6	72.8	71.8	71.1
8000	57.3	56.1	57.2	57.4	56.0	56.1
10000	52.6	50.9	51.8	53.0	51.5	50.8
A	95.4	94.0	95.0	95.7	94.5	93.8
L	97.7	96.3	97.2	97.9	96.8	96.1

Tabela E.9 *Rezultati ispitivanja ponovljivosti merenja nivoa zvučnog pritiska emisije referentnog izvora, u [dB], u mernoj tački 2 (RS:F)*

f [Hz]	Redni broj merenja										\bar{L}	σ	MAKSIMALNA GREŠKA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
50	60.9	68.0	65.8	62.3	66.6	60.9	64.8	64.9	68.4	62.3	64.5	2.787	3.9
63	73.1	76.8	71.6	75.4	75.0	74.0	70.9	75.6	77.3	74.0	74.4	2.072	-3.4
80	75.5	72.4	71.6	75.9	73.9	77.1	71.9	75.0	71.9	76.6	74.2	2.100	2.9
100	80.3	78.5	81.3	78.4	78.4	80.7	78.8	82.3	79.2	78.2	79.6	1.441	2.7
125	83.4	83.0	83.0	85.3	81.4	81.4	84.0	85.6	83.3	83.7	83.4	1.394	2.2
160	82.1	83.9	83.2	87.6	82.3	86.2	86.1	82.3	85.7	82.8	84.2	1.980	3.4
200	81.2	79.5	81.8	79.5	81.7	79.9	81.1	77.0	77.8	81.4	80.1	1.671	-3.1
250	80.7	80.6	80.2	79.3	82.6	81.0	81.8	81.6	78.6	81.1	80.8	1.187	-2.2
315	76.6	75.3	75.5	78.8	78.3	76.3	74.6	74.9	77.0	76.1	76.3	1.384	2.4
400	75.8	72.4	75.3	74.1	73.8	73.5	76.3	76.7	73.1	74.9	74.6	1.425	2.4
500	75.6	75.2	75.8	76.9	78.1	75.4	75.7	75.9	78.2	78.4	76.5	1.254	1.8
630	81.0	80.4	81.5	81.2	80.0	78.8	79.8	79.6	81.2	81.7	80.5	0.936	-1.7
800	85.3	85.7	85.0	83.9	85.4	85.7	85.8	85.1	84.8	83.4	85.0	0.794	-1.6
1000	80.0	81.4	81.6	81.0	79.8	81.4	80.6	81.6	80.5	79.7	80.8	0.736	-1.0
1250	76.0	76.4	75.4	75.4	74.7	76.5	76.7	76.7	75.0	75.7	75.8	0.717	-1.2
1600	74.2	73.4	73.6	75.1	75.2	74.9	74.0	73.4	75.3	75.3	74.4	0.799	-1.0
2000	74.3	75.2	75.0	74.6	74.9	74.5	74.6	74.5	74.9	75.7	74.8	0.425	0.9
2500	72.6	72.7	73.1	73.2	72.5	73.2	72.4	73.0	72.6	73.2	72.8	0.314	-0.5
3150	73.3	73.3	72.6	72.7	73.3	72.9	73.5	73.0	73.3	72.7	73.1	0.318	0.4
4000	70.6	70.9	70.1	70.4	70.1	70.0	70.7	69.9	70.5	70.1	70.3	0.332	0.6
5000	65.4	66.4	66.4	66.3	66.5	66.0	66.3	65.5	66.4	65.9	66.1	0.393	-0.7
6300	56.7	57.1	56.7	56.6	57.3	56.7	57.4	57.2	57.1	57.3	57.0	0.317	0.4
8000	50.3	50.4	50.6	50.8	50.5	50.2	51.0	50.7	50.5	50.4	50.5	0.245	0.5
10000	40.9	41.0	40.5	40.2	41.0	40.4	40.5	40.6	41.1	40.3	40.7	0.331	-0.5
A	88.6	88.9	88.8	88.5	88.7	88.9	89.0	88.7	88.6	88.3	88.7	0.211	-0.4
L	92.1	92.2	92.3	93.1	92.1	92.6	92.8	92.5	92.3	92.0	92.4	0.350	0.7