

Neistota merania imisií hluku a hlukovej expozície

Milan Drahoš, Karol Richter

1. Úvod

Tento príspevok ma za cieľ oboznámiť odbornú verejnosť s významom neistoty v procese merania imisií hluku v prostredí a hlukovej expozície monitorovaných osôb (profesií) pri práci, s postupom stanovenia hodnoty rozšírenej neistoty získaných výsledkov určujúcich veličín imisií hluku a hlukovej expozície, ako aj so spôsobom posudzovania a oznamovania súladu výsledkov týchto meraní so špecifikáciou.

2. Význam neistoty

Neistotu výsledkov meraní spôsobujú náhodné chyby, ako i identifikovateľné a kvantifikovateľné zdroje chýb, ktoré ovplyvňujú výsledok merania. Preto sú pri určení neistoty výsledku merania predmetom bilancie všetky zdroje chýb daného druhu (modelu) merania. Pri bilancii zdrojov chýb jednotlivých druhov meraní vzniká množstvo nejasností, ktoré vyplývajú z rôznorodosti zdrojov chýb ovplyvňujúcich výsledok merania a z opisu ich pravdepodobnostného charakteru.

V dokumente [1] sa neistoty ovplyvňujúce výsledok merania definujú takto:

- ❑ neistota typu A (označenie u_A) - metóda vyhodnotenia neistoty vychádzajúca zo štatistickej analýzy série pozorovaní (výsledkov merania); je charakterizovaná výberovým rozptylom s_i^2 alebo výberovou smerodajnou odchýlkou s_i a počtom stupňov voľnosti n_i ,
- ❑ neistota typu B (označenie u_B) - metóda vyhodnotenia neistoty založená na inej metóde ako štatistickej analýze série pozorovaní; komponenty neistoty typu B pochádzajú z rôznych zdrojov a sú charakterizované príslušným rozptylom u_j^2 , alebo smerodajnou odchýlkou u_j ; ak sú medzi komponentmi vzájomné korelácie, zahrnie sa do výpočtu kovariancia.

Ekvivalencia vyhodnocovania štandardných neistôt typu A a typu B umožňuje zlúčiť všetky štandardné neistoty do jednej hodnoty - kombinovanej štandardnej neistoty, ktorá sa určí podľa vzťahu:

$$u_C^2 = u_A^2 + u_B^2$$

Aby sa zvýšila pravdepodobnosť, s akou sa nachádza skutočná hodnota v určitom intervale, zaviedol sa pojem rozšírená neistota U . Rozšírená neistota sa určí vynásobením štandardnej kombinovanej neistoty koeficientom pokrytia (rozšírenia) k_u :

$$U = k_u \cdot u_C$$

Hodnota koeficienta pokrytia sa volí v závislosti na požadovanom intervale spoľahlivosti. Pre $k_u = 2$ je táto pravdepodobnosť približne 95 %, pričom má byť splnená podmienka normality zdrojov neistôt, ktoré tvoria jednotlivé zložky kombinovanej štandardnej neistoty u_C .

Priradenie hodnoty kombinovanej štandardnej alebo rozšírenej neistoty k výsledku merania umožňuje porovnať výsledky meraní medzi rôznymi laboratóriami alebo posúdiť súlad výsledkov s limitnými (prípustnými) hodnotami. Neistota výsledku merania je aj kvantitatívnym ukazovateľom jeho kvality.

3. Určenie kombinovanej štandardnej neistoty

Kombinovaná štandardná neistota výsledkov merania sa získa zlúčením neistoty u_A a u_B . Metóda (spôsob) určenia štandardnej neistoty u_A vychádza zo štatistických postupov aplikovaných na sériu výsledkov meraní.

Metóda určenia štandardnej neistoty u_B vychádza z identifikácie a kvantifikácie komponentov (zdrojov chýb) ovplyvňujúcich výsledok merania, pričom súbor týchto komponentov nemusí byť pri každom druhu meraní rovnaký. Preto sa pri ich analýze (bilancii) nesmú nevynechať tie, ktoré môžu významne ovplyvniť túto neistotu. Poznanie hodnôt neistôt jednotlivých komponentov môže naznačiť cestu znižovania hodnoty tejto štandardnej neistoty.

Pri fyzikálnych meraniach patria medzi identifikovateľné a kvantifikovateľné komponenty ovplyvňujúce neistotu u_B :

- vlastnosti použitých meracích prístrojov,
- vlastnosti použitých kalibračných prístrojov (kalibračného reťazca),
- meracie metódy (postupy),
- podmienky prostredia,
- vplyvy spôsobené podmienkami merania.

Postup určenia štandardnej neistoty u_B znamená, že každému ovplyvňujúcemu komponentu priradíme čiastkovú neistotu a ak medzi jednotlivými komponentami nie je korelácia, potom jednotlivé zložky neistoty zlúčime do výslednej hodnoty podľa vzťahu:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^k u_{B,j}^2}$$

kde k je celkový počet ovplyvňujúcich komponentov.

Odhad čiastkovej neistoty j – tého komponenta $u_{B,j}$ sa pri zohľadnení intervalu tolerancie alebo odchýlok $(+z_{\max,j}; -z_{\max,j})$ a posúdení priebehu pravdepodobnosti v tomto intervale určí podľa vzťahu:

$$u_{Bp,j} = \frac{|z_{\max,j}|}{\chi}$$

kde χ - hodnota zvolenej aproximácie rozdelenia pravdepodobnosti odchýlky (tolerancie) v intervale. Pre jednotlivé rozdelenia má hodnotu:

- $\chi = 1$ pre $z_{\max,j}$ s Diracovým bimodálnym rozdelením priebehu pravdepodobnosti,
- $\chi = 1,73$ pre $z_{\max,j}$ s rovnomerným rozdelením priebehu pravdepodobnosti,
- $\chi = 2$ pre $z_{\max,j}$ ktoré je superpozíciou viacerých nekorelovaných odchýlok,
- $\chi = 3$ pre $z_{\max,j}$ s normálnym rozdelením.

4. Analýza neistoty typu B

Na meranie určujúcich veličín imisií hluku v pracovnom alebo mimopracovnom prostredí a určujúcich veličín hlukovej expozície osôb vystavených pôsobeniu hluku pri práci sa používajú prístroje na meranie akustického tlaku – integrujúco-priemerujúce zvukomery a integrujúce zvukomery triedy 1 a 2. Postup merania jednotlivých určujúcich veličín, ako i postup pri internej kalibrácii meracieho reťazca stanovujú pracovné (metodické) postupy týchto meraní.

Štandardná neistota u_B sa pri týchto meraniach určí na základe bilancie identifikovateľných zdrojov chýb podľa vzťahu:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^k u_{Bp,j}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Brs}^2 + u_{Bm}^2 + u_{Bpo}^2}$$

kde $u_{Bp,j}$ - neistota určenia j - tého parametra meracieho prístroja (meradla),

u_{Bk} - neistota internej kalibrácie meracieho reťazca,

u_{Brs} - neistota meraním zisteného údajá v závislosti na rozlišovacej schopnosti meradla,

u_{Bm} - neistota merania použitou metódou (postupom),

u_{Bpo} - neistota zdrojov chýb vplyvom podmienok okolia (klimatické podmienky a pod.).

4.1 Analýza chýb zvukomerov

Postup pri analýze chýb prevádzkových vlastností zvukomerov spočíva v zistení intervalu možných tolerancií alebo odchýlok ($+z_{\max}$; $-z_{\max}$) parametrov (komponentov) zvukomerov s pripojeným meracím mikrofónom a vstavaným zobrazovacím zariadením. Vzhľadom na charakter vlastností parametrov zvukomerov sa chyby parametrov zvukomerov delia na frekvenčne závislé a frekvenčne nezávislé.

4.1.1 Frekvenčne závislé chyby

Do tejto skupiny patria chyby parametrov zvukomerov, ktoré vykazujú závislosť na frekvenčnom spektre akustického tlaku a sú odvodené od:

- ❑ chyby frekvenčnej váhovej (integrálnej) charakteristiky, ktorá vzniká v dôsledku odchýlok tohto parametra od ideálnej frekvenčnej váhovej charakteristiky meranej vo zvukovom poli s rovinnými postupnými vlnami dopadajúcimi na mikrofón v referenčnom smere a
- ❑ chyby spôsobené smerovou charakteristikou, ktorá vzniká v dôsledku odchýlky citlivosti mikrofónu, vrátane vplyvu telesa zvukomera, osoby a pod., od citlivosti ideálneho mikrofónu zachytávajúceho zvukové vlny zo všetkých smerov s rovnakou citlivosťou ako vo zvukovom poli s rovinnými postupnými vlnami pri referenčnom smere dopadu.

4.1.2 Frekvenčne nezávislé chyby

Do tejto skupiny patria chyby, ktoré sú spôsobené odchýlkou parametrov zvukomerov pri špecifikovaných (normovaných) podmienkach:

- ❑ chyba linearity amplitúdovej charakteristiky,
- ❑ zmena úrovne vstupného signálu,

- ❑ časové váhové charakteristiky F a S,
- ❑ zmena statického tlaku,
- ❑ zmena teploty okolia,
- ❑ zmena relatívnej vlhkosti vzduchu,
- ❑ zmena napätia napájacieho zdroja.

Analýza zdrojov čiastkových neistôt (chýb) zvukomerov spočíva v zistení intervalu možných tolerancií alebo odchýlok (+ $z_{\max}$; - $z_{\max}$) jednotlivých prevádzkových parametrov zvukomerov a v určení ich priebehu pravdepodobnosti.

Normované hranice intervalu tolerancií alebo odchýlok frekvenčne závislých a frekvenčne nezávislých parametrov stanovuje STN EN 61672-1:2005 Elektroakustika, Zvukomery Časť.1: Technické požiadavky. Technické a prevádzkové požiadavky na zvukomery triedy 1 a 2 platia za určených referenčných podmienok prostredia: teplota vzduchu 23 °C, statický tlak 101,325 kPa a relatívna vlhkosť vzduchu 50 %.

Poznámka: Norma STN EN 61672-1:2005 nahrádza normy STN IEC 60651:1995+A2:2001 a STN EN 60804:2000.

Pre daný typ zvukomera používaného na meranie určujúcich veličín sa hranice intervalu odchýlok niektorých parametrov môžu určiť z odchýlok deklarovaných v kalibračnom certifikáte alebo v certifikáte o overení zvukomera s mikrofónom, alebo z technickej dokumentácie výrobcu.

4.1.3 Bilancia chýb z normovaných tolerancií a odchýlok

V tab. č. 1 sa uvádza bilancia zdrojov neistôt z normovaných tolerancií frekvenčne závislých parametrov v zodpovedajúcom frekvenčnom rozsahu a z normovaných odchýlok frekvenčne nezávislých parametrov pre zvukomery triedy 1 s pripojeným meracím mikrofónom.

Pri určení výslednej neistoty u_{Bp} sú predmetom bilancie neistôt frekvenčne závislých parametrov berú ich hodnoty, ktoré zodpovedajú sústredeniu akustickej energie monitorovaného zdroja/zdrojov hluku v danej frekvenčnej oblasti. Výsledná neistota odvodená z vlastností zvukomerov sa určí podľa vzťahu:

$$u_{Bp} = \sqrt{\sum_{j=1}^k u_{Bp,j}^2}$$

kde k je celkový počet frekvenčne závislých a nezávislých parametrov zvukomerov.

Príklad: Ak je akustická energia monitorovaného zdroja hluku sústredená vo frekvenčnej oblasti 80 Hz až 4 kHz, potom je výsledná neistota u_{Bp} pre hladiny A akustického tlaku určená z normovaných tolerancií a odchýlok zvukomerov triedy 1 a pre rozsah uhla dopadu rovinných zvukových vln:

- ± 30° od referenčného smeru $u_{Bp} = 1,835$ dB,
- ± 90° od referenčného smeru $u_{Bp} = 2,966$ dB.

Tab. č. 1: Bilancia zdrojov neistôt z normovaných tolerancií a odchýlok jednotlivých parametrov zvukomerov triedy 1

Zdroj neistoty – parameter		Tolerancia / odchýlka			Príspevok $u_{Bp,j}$ [dB]
		$ Z_{max} $ [dB]	Priebeh pravdepodobnosti	χ [-]	
Frekvenčná váhová funkcia A, C a Z (čl. 5.4, tab. 2)	31,5 Hz až 4 kHz	1,6	rovnom.	1,73	0,925
	> 4 kHz až 8 kHz	2,6			1,503
	> 8 kHz až 12,5 kHz	4,5			2,601
	> 12,5 kHz až 16 kHz	10,2			5,896
Smerová charakteristika $\pm 30^\circ$ od ref. smeru (čl. 5.3, tab.1)	250 Hz až 1 kHz	1,3	rovnom.	1,73	0,751
	> 1 kHz až 2 kHz	1,5			0,867
	> 2 kHz až 4 kHz	2,0			1,156
	> 4 kHz až 8 kHz	3,5			2,023
	> 8 kHz až 12,5 kHz	5,5			3,179
Smerová charakteristika $\pm 90^\circ$ od ref. smeru (čl. 5.3, tab.1)	250 Hz až 1 kHz	1,8	rovnom.	1,73	1,040
	> 1 kHz až 2 kHz	2,5			1,445
	> 2 kHz až 4 kHz	4,5			2,601
	> 4 kHz až 8 kHz	8,0			4,624
	> 8 kHz až 12,5 kHz	11,5			6,647
Chyba linearity amplitúdovej charakteristiky (čl. 5.5.5)		1,1	rovnom.	1,73	0,636
Zmena úrovne vstupného signálu od 1 dB do 10 dB (čl. 5.5.6)		0,6	rovnom.	1,73	0,347
Časové váhové charakteristiky F a S (čl. 5.7.3)		0,3	rovnom.	1,73	0,173
Zmena statického tlaku od 85 kPa do 108 kPa (čl. 6.2)		0,7	rovnom.	1,73	0,405
Zmena teploty vzduchu od - 10 °C do 50 °C (čl. 6.3)		0,8	rovnom.	1,73	0,462
Zmena relatívnej vlhkosti vzduchu od 25 % do 90 % (čl. 6.4)		0,8	rovnom.	1,73	0,462
Zmena napätia napájacieho zdroja (čl. 5.20)		0,3	rovnom.	1,75	0,173

4.1.4 Bilancia chýb z overených parametrov

Pre daný typ zvukomera s pripojeným meracím mikrofónom sa neistota u_{Bp} môže určiť na základe:

- zistených odchýlok frekvenčného priebehu útlmu váhových filtrov A (C), odchýlok frekvenčnej charakteristiky mikrofónu, chyby linearity amplitúdovej charakteristiky a odchýlok úrovne vstupného signálu deklarovaných v prílohe certifikátu o overení daného zvukomera,
- upresnenia smerových charakteristík mikrofón/zvukomer a ostatných parametrov, napr. podľa technickej dokumentácie výrobcu.

V tab. č. 2 sa uvádza bilancia frekvenčne závislých a nezávislých parametrov pre integračný zvukomer - presný modulárny analyzátor zvuku B & K typ 2260 v. č. 2361226 s predpolarizovaným $\frac{1}{2}$ " meracím mikrofónom B & K typ 4189 v. č. 2418077.

Tab. č. 2: Bilancia zdrojov neistôt - pre analyzátor zvuku B & K typ 2260 s meracím mikrofónom B & K typ 4189

Zdroj neistoty – parameter		Odchýlka			Príspevok $u_{Bp,j}$ [dB]
		$ z_{max} $ [dB]	Priebeh pravdepodobnosti	χ [-]	
Frekvenčná váhová funkcia A a frekvenčná charakt. mikrofónu (Certifikát o overení č.: 04255, 04255.2)	25 Hz až 4 kHz	0,6	Normálne	2,0 (superpoz. odchýlok)	0,300
	> 4 kHz až 8 kHz	0,8			0,400
	> 8 kHz až 12,5 kHz	1,4			0,700
Frekvenčná váhová funkcia C a frekvenčná charakt. mikrofónu (Certifikát o overení č.: 04255, 04255.2)	20 Hz až 4 kHz	0,5	Normálne	2,0 (superpoz. odchýlok)	0,250
	> 4 kHz až 8 kHz	0,8			0,400
	> 8 kHz až 12,5 kHz	1,5			0,750
Frekvenčná váhová funkcia LIN (Z), frekvenčná charakt. mikrofónu (Certifikát o overení č.: 04255, 04255.2)	20 Hz až 31,5 Hz	0,6	normálne	2,0 (superpoz. odchýlok)	0,300
	> 31,5 Hz až 4 kHz	0,5			0,250
	> 4 kHz až 8 kHz	0,8			0,400
	> 8 kHz až 12,5 kHz	1,5			0,750
Smerová charakteristika $\pm 30^\circ$ od ref. smeru (Dokument B & K BB 1046 –14)	250 Hz až 1 kHz	0,5	rovnom.	1,73	0,289
	> 1 kHz až 2 kHz	0,5			0,289
	> 2 kHz až 4 kHz	0,8			0,462
	> 4 kHz až 8 kHz	1,2			0,694
	> 8 kHz až 12,5 kHz	1,5			0,867
Smerová charakteristika $\pm 90^\circ$ od ref. smeru (Dokument B & K BB 1046 –14)	250 Hz až 1 kHz	0,5	rovnom.	1,73	0,289
	> 1 kHz až 2 kHz	1,5			0,867
	> 2 kHz až 4 kHz	2,0			1,156
	> 4 kHz až 8 kHz	3,0			1,734
	> 8 kHz až 12,5 kHz	6,5			3,757
Chyba linearity amplitúdovej charakteristiky pri 31,5 Hz, 1 kHz a 8 kHz (Certifikát o overení č.: 04255)		0,4	normálne	3,0	0,133
Zmena úrovne vstupného signálu od 1 dB do 10 dB (Certifikát o overení č.: 04255)		0,4	normálne	3,0	0,133
Časové váhové charakteristiky F a S (STN EN 61672-1 čl. 5.7.3)		0,3	rovnom.	1,73	0,173
Zmena statického tlaku od 85 kPa do 108 kPa (Dokument B & K BE 1375-12)		0,3	rovnom.	1,73	0,173
Zmena teploty vzduchu od -10°C do $+50^\circ\text{C}$ (Údajový list B & K BP 1955-11)		0,49	rovnom.	1,73	0,283
Zmena relatívnej vlhkosti vzduchu od 25 % do 90 % (Údajový list B & K BP 1955-11)		0,49	rovnom.	1,73	0,283
Zmena napätia napájacieho zdroja (STN EN 61672-1 čl. 5.20)		0,3	rovnom.	1,75	0,173

Príklad: Ak je pri meraní imisií hluku s týmto meracím reťazcom akustická energia monitorovaného zdroja hluku sústredená vo frekvenčnej oblasti 80 Hz až 4 kHz, potom je

výsledná neistota u_{Bp} pre hladiny A akustického tlaku a pre rozsah uhla dopadu zvukových vln:

$\pm 30^\circ$ od referenčného smeru $u_{Bp} = 0,767$ dB,

$\pm 90^\circ$ od referenčného smeru $u_{Bp} = 1,308$ dB.

4.2 Analýza chýb kalibrácie meracieho reťazca

Chybu internej (prevádzkovej) kalibrácie meracieho reťazca mikrofón - zvukomer udáva neistota kalibrácie použitého akustického kalibrátora $u_{Bk,a}$ a neistota nastavenia kalibračnej hodnoty $u_{Bk,o}$, ktorú udáva chyba odčítania údajov na stupnici alebo displeji.

Údaj o neistote hladiny akustického tlaku kalibrátora sa uvádza v kalibračnom liste, napr. pre akustický kalibrátor B & K typ 4231 sa deklaruje neistota kalibrácie $u_{Bk,a} = 0,1$ dB. Hodnotu neistoty odčítania údajov udáva polovica hodnoty rozlišovacej schopnosti meradla. V prípade kalibrácie presných integračných zvukomerov je krok rozlíšenia 0,1 dB. Pre $z_{\max}$ rovné polovici rozdielu medzi krajnými hodnotami a pri aplikovaní Diracovho bimodálneho rozdelenia priebehu pravdepodobnosti ($\chi = 1$) je $u_{Bk,o} = 0,05$ dB. Výsledná (zlúčená) neistota kalibrácie meracieho reťazca $u_{Bk} = 0,112$ dB.

4.3 Analýza chýb metód merania

Voľba metódy (postupu) merania závisí od požadovaného účelu merania. Ak je účelom merania zistenie úrovne hluku v definovanom mieste merania, napr. 1 m od technologického zariadenia, 2 m pred fasádou budovy, v strede obytnej miestnosti a pod., ide o meranie výskytu (imisie) úrovne hluku v danom prostredí.

Ak je účelom merania zistenie úrovne expozície osôb vystavených hluku pri vykonávaní pracovných činností za pracovnú zmenu, ide o meranie hlukovej (osobnej) expozície. Pri tomto meraní treba:

- a) zmerať „vzorku“ hlukovej expozície, ktorá charakterizuje osobnú expozíciu počas trvania práce na danom pracovnom mieste (zóne) alebo za pracovnú zmenu,
- b) zistiť (objektívizovať) čas trvania vystavenia (expozície) osôb hluku pri vykonávaní pracovných činností na pracovnom mieste (zóne) a za celú pracovnú zmenu.

Použitá metóda merania predurčuje aj rozsah analýzy (bilancie) zdrojov chýb daného meracieho procesu.

5. Bilancia zdrojov chýb v procese merania imisií hluku

V štandardných postupoch merania imisií hluku v prostredí sú definované základné kritériá, ako opis prostredia a zvukového poľa, výber miesta merania, orientácia hlavnej osi mikrofónu, určujúce veličiny na opis časového a fyzikálneho charakteru hluku, interval merania a pod..

Pri analýze zdrojov chýb pri meraní imisií hluku v prostredí prichádzajú do úvahy zdroje odvodené od:

- a) prevádzkových vlastností zvukomerov,
- b) internej kalibrácie meracieho reťazca,
- c) charakteristických parametrov zvukového poľa,
- d) použitej metódy (postupu) merania:
 - da) **opakované meranie** – zistenie väčšieho počtu údajov určujúcej veličiny v rovnakých podmienkach, napr. pri meraní ustáleného hluku,

- db) **kontinuálne meranie** – meranie určujúcej veličiny za časový interval T , ktorý zodpovedá niekoľkonásobnému opakovaniu technologického (pracovného) cyklu alebo za časový interval, ktorý charakterizuje hlučnosť situáciu a pod.,
- e) pozície umiestnenia mikrofónu v rozmedzí dovolených odchýlok od referenčnej vzdialenosti.

5.1 Určenie kombinovanej štandardnej neistoty pri opakovanom meraní

Za predpokladu štandardných prevádzkových režimov monitorovaného zdroja hluku a vhodných podmienok okolia možno vykonať opakované meranie imisii hluku a získať sériu údajov. Kombinovaná štandardná neistota u_C tohto merania sa určí podľa vzťahu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bu}^2}$$

- kde u_A - smerodajná odchýlka od súboru nekorelovaných údajov,
 u_{Bp} - neistota kalibrácie zvukomera (zlúčená čiastková neistota spôsobená chybami jednotlivých parametrov použitého zvukomera pri meraní),
 u_{Bk} - neistota internej kalibrácie meracieho reťazca akustickým kalibrátorom,
 u_{Bu} - neistota umiestnenia mikrofónu (tolerancia vzdialeností) v meracom bode (súčasť chyby metódy).

Príklad: V tab. č. 3 sa uvádza bilancia zdrojov neistôt opakovaného merania hladín A akustického tlaku ustáleného hluku v zodpovedajúcom frekvenčnom rozsahu a v rozsahu uhla dopadu zvukových vln $\pm 30^\circ$ pri použití meracieho reťazca – presného analyzátora zvuku B & K typ 2260 s meracím mikrofónom B & K typ 4189.

Tab. č. 3 Bilancia zdrojov neistôt pri opakovanom meraní hladín A akustického tlaku a v rozsahu uhla dopadu zvukových vln $\pm 30^\circ$ od referenčného smeru

Zdroj neistoty/podmienky	Označenie neistoty	Hodnota neistoty [dB]			
		25 Hz až 2 kHz	25 Hz až 4 kHz	25 Hz až 8 kHz	25 Hz až 12,5 kHz
Analyzátor zvuku B & K typ 2260 s mikrofónom B & K typ 4189, v uzavretom priestore v poli priamych a odrazených vln, alebo vo voľnom poli;	u_{Bp}	0,677	0,767	0,963	1,236
Kalibrácia – kalibrátor B&K typ 4231	u_{Bk}	0,112	0,112	0,112	0,112
Umiestnenie meracieho mikrofónu ¹⁾	u_{Bu}	0,1	0,1	0,1	0,1
Metóda merania – opakované meranie ²⁾	u_A	0,5	0,5	0,5	0,5
Kombinovaná štandardná neistota	u_C	0,855	0,928	1,095	1,342
Rozšírená neistota	U	1,7	1,9	2,2	2,7

Poznámka:

- ¹⁾ Neistota umiestnenia mikrofónu v meracom bode pri definovaných toleranciách, určená kvalifikovaným odhadom $u_{Bu} = 0,1$ dB.
- ²⁾ Hodnota neistoty u_A sa pre ustálený hluk určí zo série údajov z reálnych meraní.

5.2 Určenie kombinovanej štandardnej neistoty pri kontinuálnom meraní

V prípade, že časový interval kontinuálneho merania T zodpovedá niekoľkonásobnému opakovaniu technologických alebo pracovných cyklov, zaťaženiu stroja a pod., a teda výsledok merania je charakterizovaný jednou hodnotou určujúcej veličiny, potom kombinovaná štandardná neistota u_C sa určí podľa vzťahu:

$$u_C = \sqrt{u_{An}^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bu}^2}$$

kde u_{An} - neistota spôsobená náhodnými vplyvmi v procese jednorázových kontinuálnych meraní,

u_{Bp} - neistota kalibrácie zvukomera (zlúčená čiastková neistota spôsobená chybami jednotlivých parametrov použitého zvukomera pri meraní),

u_{Bk} - neistota internej kalibrácie meracieho reťazca akustickým kalibrátorom,

u_{Bu} - neistota umiestnenia mikrofónu (tolerancia vzdialeností) v meracom bode (súčasť chyby metódy merania).

Príklad: V tab. č. 4 sa uvádza bilancia zdrojov neistôt v zodpovedajúcom frekvenčnom rozsahu pri kontinuálnom meraní hladín A akustického tlaku premenného hluku a v tab. č. 5 zasa bilancia zdrojov neistôt v zodpovedajúcom frekvenčnom rozsahu pri kontinuálnom meraní hladín akustického tlaku v 1/3 oktávových pásmach a v rozsahu uhla dopadu zvukových vln $\pm 30^\circ$ pri meraní s presným analyzátorom zvuku B & K typ 2260 a mikrofónom B & K typ 4189.

Tab. č. 4: Bilancia zdrojov neistôt pri kontinuálnom meraní hladín A akustického tlaku a v rozsahu uhla dopadu zvukových vln $\pm 30^\circ$ od referenčného smeru

Zdroj neistoty/podmienky	Označenie neistoty	Hodnota neistoty [dB]			
		25 Hz až 2 kHz	25 Hz až 4 kHz	25 Hz až 8 kHz	25 Hz až 12,5 kHz
Analyzátor zvuku B & K typ 2260 s mikrofónom B & K typ 4189, v uzavretom priestore v poli priamych a odrazených vln, alebo vo voľnom poli;	u_{Bp}	0,677	0,767	0,963	1,236
Kalibrácia – kalibrátor B&K typ 4231	u_{Bk}	0,112	0,112	0,112	0,112
Umiestnenie meracieho mikrofónu ¹⁾	u_{Bu}	0,1	0,1	0,1	0,1
Náhodné vplyvy ²⁾	u_{An}	0,3	0,3	0,3	0,3
Kombinovaná štandardná neistota	u_C	0,756	0,837	1,019	1,281
Rozšírená neistota	U	1,5	1,7	2,0	2,6

Poznámka:

¹⁾ Neistota umiestnenia mikrofónu v meracom bode pri definovaných toleranciách, určená kvalifikovaným odhadom $u_{Bu} = 0,1$ dB.

²⁾ Neistota náhodných vplyvov pri kontinuálnom meraní určená kvalifikovaným odhadom $u_{An} = 0,3$ dB.

Tab. č. 5: Bilancia zdrojov neistôt pri kontinuálnom meraní hladín akustického tlaku v 1/3 oktávových pásmach a v rozsahu uhla dopadu zvukových vln $\pm 30^\circ$ od referenčného smeru

Zdroj neistoty/podmienky	Označenie neistoty	Hodnota neistoty [dB]				
		20 Hz až 31,5 Hz	>31,5 kHz až 2 kHz	>2 kHz až 4 kHz	> 4 kHz až 8 kHz	> 8 kHz až 12,5kHz
Presný analyzátor zvuku B & K typ 2260 s mikrofónom B & K typ 4189, v uzavretom priestore v poli priamych a odrazených vln, alebo vo voľnom poli;	u_{Bp}	0,677	0,657	0,749	0,963	1,265
Vstavané 1/3 oktávové filtre	$u_{Bp,f}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kalibrácia – kalibrátor B&K 4231	u_{Bk}	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112
Umiestnenie meracieho mikrofónu ¹⁾	u_{Bu}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Náhodné vplyvy ²⁾	u_{An}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Kombinovaná štandardná neistota	u_C	0,782	0,764	0,845	1,039	1,324
Rozšírená neistota	U	1,6	1,5	1,7	2,1	2,6

Poznámka:

- ¹⁾ Neistota umiestnenia mikrofónu v meracom bode pri definovaných toleranciách, určená kvalifikovaným odhadom $u_{Bu} = 0,1$ dB.
- ²⁾ Neistota náhodných vplyvov pri kontinuálnom meraní určená kvalifikovaným odhadom $u_{An} = 0,3$ dB.

6. Bilancia zdrojov chýb v procese merania hlukovej expozície

Pri analýze zdrojov chýb merania hlukovej expozície osôb vystavených v priebehu pracovnej zmeny nadmernému hluku prichádzajú do úvahy zdroje chýb odvodené od:

- prevádzkových vlastností použitých zvukomerov
- internej kalibrácie meracieho reťazca,
- použitej metódy (spôsobu) merania expozície,
- náhodných vplyvov v procese kontinuálneho merania.

V štandardných pracovných postupoch merania hlukovej expozície sú definované základné kritériá, ako opis prostredia a zvukového poľa, opis výrobného a pracovného procesu, spôsob zisťovania trvania pôsobenia (expozície) hluku, umiestnenie mikrofónu, trvanie merania „vzorky“ expozície, výpočet normalizovaných určujúcich veličín a pod.

6.1 Určenie neistoty metódy merania

Neistota metódy merania expozície osôb vystavených pôsobeniu hluku pri práci je odvodená od:

- rozsahu prieskumu pracoviska a charakteru práce monitorovaných osôb v priebehu pracovnej zmeny, podľa ktorého sa posudzuje hodnovernosť údajov o trvaní pôsobenia hluku T_e za pracovnú zmenu,
- dĺžky časového intervalu (trvania) merania T , ktorá úzko súvisí s časovým charakterom pôsobiaceho hluku. Ak má pôsobiaci hluk premenný charakter alebo obsahuje impulzové

zložku, závisí dĺžka intervalu merania od štatistickej dynamiky pôsobiaceho hluku ($L_{A10} - L_{A90}$).

Časová náročnosť prípravy a samotného merania „vzoriek“ hlukovej expozície osôb viedla k rozdeleniu merania expozície na tri druhy metód [4]: podrobnú, bežnú a orientačnú. Je vhodné stanoviť pre jednotlivé metódy interval odchýlok $z_{\max}$ od skutočnej hodnoty expozície, ktorej prekročenie je málo pravdepodobné. S voľbou danej metódy merania úzko súvisí rozsah prieskumu charakteru práce monitorovaných osôb a dĺžka intervalu merania „vzorky“ expozície.

V tab. č.6 sa na základe experimentálnych prác [5] uvádza neistota metódy merania u_{Bm} pre zvolený interval odchýlok $\pm 0,5$; $\pm 1,0$ a $\pm 1,5$ dB od pravej hodnoty hlukovej expozície za $T_0 = 8$ h a rovnomernom rozdelení priebehu pravdepodobnosti.

Ak sú monitorované osoby vystavené na pracovnom mieste (zóne) premennému hluku alebo premennému hluku s impulzovou zložkou prevažnú časť pracovnej zmeny ($T_e > 6,5$ h), minimálny časový interval merania „vzorky“ expozície závisí od zvolenej metódy merania expozície a štatistickej dynamiky ($L_{A10} - L_{A90}$) pôsobiaceho hluku.

Tab. č. 6: Neistota metódy merania a minimálny časový interval merania pri vystavení osôb hluku za prevažnú časť pracovnej zmeny

Metóda merania expozície	Odchýlka $ z_{\max} $ [dB]	Koeficient χ [-]	Neistota metódy u_{Bm} [dB]	Minimálny interval merania T [min.]
Podrobná	0,5	1,73	0,29	$40 \times 1,3 [(L_{10} - L_{90}) / 2,6]$
Bežná	1,0		0,58	$24 \times 1,3 [(L_{10} - L_{90}) / 2,6]$
Orientačná	1,5		0,87	$18 \times 1,3 [(L_{10} - L_{90}) / 2,6]$

6.2 Určenie kombinovanej štandardnej neistoty

Kombinovaná štandardná neistota u_C merania hlukovej expozície monitorovaných osôb sa určí podľa vzťahu:

$$u_C = \sqrt{u_{An}^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bm}^2 + u_{Bu}^2}$$

kde u_{An} - neistota spôsobená náhodnými vplyvmi v procese jednorázových kontinuálnych meraní,

u_{Bp} - neistota kalibrácie zvukomera (zlúčená čiastková neistota spôsobená chybami jednotlivých parametrov použitého zvukomera pri meraní),

u_{Bk} - neistota internej kalibrácie meracieho reťazca akustickým kalibrátorom,

u_{Bm} - neistota použitej metódy merania,

u_{Bu} - neistota umiestnenia mikrofónu (tolerancia vzdialeností) v meracom bode (súčasť chyby metódy merania).

Príklad: V tab. č. 7 sa uvádza bilancia zdrojov neistôt na určenie kombinovanej neistoty výsledkov bežnej metódy merania hlukovej expozície pri použití presného modulárneho analyzátoru zvuku B & K typ 2260 s meracím mikrofónom B & K typ 4189.

Tab. č. 7: Bilancia zdrojov neistôt pri **bežnej** metóde merania hlukovej expozície

Zdroj neistoty/podmienky	Označenie neistoty	Hodnota neistoty [dB]			
		25 Hz až 2 kHz	25 Hz až 4 kHz	25 Hz až 8 kHz	25 Hz až 12,5 kHz
Presný analyzátor zvuku B & K typ 2260 s mikrofónom B & K typ 4189 s orientáciou hlavnej osi mikrofónu v smere pohľadu monitorovanej osoby	u_{Bp}	0,677	0,767	0,963	1,236
Kalibrácia – kalibrátor B&K typ 4231	u_{Bk}	0,112	0,112	0,112	0,112
Metóda merania – bežná	u_{Bm}	0,58	0,58	0,58	0,58
Umiestnenie meracieho mikrofónu ¹⁾	u_{Bu}	0,1	0,1	0,1	0,1
Náhodné vplyvy ²⁾	u_{An}	0,3	0,3	0,3	0,3
Kombinovaná štandardná neistota	u_C	0,953	1,018	1,173	1,106
Rozšírená neistota	U	1,9	2,0	2,3	2,8

Poznámka:

- ¹⁾ Neistota ovplyvnenia zvukového poľa prítomnosťou osoby ako i tolerance umiestnenia mikrofónu v meracom mieste určená kvalifikovaným odhadom $u_{Bu} = 0,15$ dB.
- ²⁾ Neistota náhodných vplyvov pri kontinuálnom meraní určená kvalifikovaným odhadom $u_{An} = 0,3$ dB.

7. Posúdenie súladu výsledkov meraní so špecifikáciou

Rozsah poskytovaných informácií pri predkladaní výsledkov merania a ich neistôt má vychádzať z požiadaviek zákazníka alebo špecifikácie. Metódy použité na výpočet výsledku a jeho neistoty sa majú uvádzať v protokole (zázname) o meraní [6] a majú obsahovať:

- ❑ dostatočnú dokumentáciu krokov a výpočtov pri analýze údajov (výsledkov), umožňujúcu v prípade potreby zopakovanie výpočtov,
- ❑ všetky korekcie použité pri analýze údajov,
- ❑ dostatok podkladov preukazujúcich spôsob výpočtu neistoty.

V prípade, že zákazník požaduje posúdenie súladu so špecifikáciou (limitnou hodnotou veličiny) potom pri zohľadnení hodnoty rozšírenej neistoty merania nastáva niekoľko možností:

Prípad 1: Nameraná (vypočítaná) hodnota veličiny zväčšená o hodnotu rozšírenej neistoty je menšia alebo sa rovná limitnej hodnote veličiny: $(L_{nam} + U) \leq L_{prip.}$

Prípad 2: Nameraná (vypočítaná) hodnota veličiny zmenšená o hodnotu rozšírenej neistoty je menšia alebo sa rovná limitnej hodnote, ale súčasne táto hodnota zväčšená o hodnotu neistoty je väčšia ako limitná hodnota veličiny:

$$(L_{nam} - U) \leq L_{prip.} < (L_{nam} + U)$$

Prípad 3: Nameraná (vypočítaná) hodnota veličiny zmenšená o hodnotu rozšírenej neistoty je väčšia ako limitná hodnota veličiny: $(L_{nam} - U) > L_{prip.}$

Výrok o súlade/nesúlade výsledkov merania so špecifikáciou znie podľa [6] a [7] pre uvedené prípady takto:

- Prípád 1: Výsledok merania je v súlade so špecifikáciou, limitná hodnota je preukázateľne dodržaná.
- Prípád 2: Limitná hodnota leží v intervale neistoty, tzn., že z výsledku merania nemožno urobiť záver. V prípade možnosti merania s menšou neistotou sa odporúča meranie zopakovať.
- Prípád 3: Výsledok merania nie je v súlade so špecifikáciou, limitná hodnota sa preukázateľne prekročila.

V prípade, že súlad so špecifikáciou vychádza zo zákonného predpisu, potom je akreditované laboratórium povinné brať do úvahy hodnotu neistoty pri upozornení na súlad/nesúlad so špecifikáciou. V nariadení vlády SR č. 40/2002 Z.z. o ochrane zdravia pred hlukom a vibráciami sa v § 3 ods. 2 uvádza:

- ❑ Výsledky merania sa doplnia údajom o neistote merania určeným v súlade s metrologickou praxou.
- ❑ Najvyššia prípustná hodnota nie je prekročená, ak nameraná alebo posudzovaná hodnota veličiny zväčšená o kladnú hodnotu neistoty je menšia alebo sa rovná najvyššie prípustnej hodnote.

Na základe tohto výroku sa pri posudzovaní a oznamovaní výsledkov merania postupuje tak, že výsledok merania sa vždy zvyšuje o hodnotu rozšírenej neistoty merania, čo znamená, že tzv. riziko z neistoty sa prideliť len jednej strane (na stranu prevádzkovateľa zdroja hluku). Význam a nadväznosť tohto postupu na rozsah zdravotnej prevencie zameranej na ochranu zdravia ľudí pred hlukom nie je predmetom tohto článku.

8. Literatúra

- [1] Guide to the Expressoin of Uncertainty in Measurement, Revidované vydanie, 1995
- [2] TPM 0051-93: Stanovenie neistôt pri meraniach, 1. a 2. diel, SMÚ Bratislava 1993
- [3] Richter K.: Postup určenia neistoty hluku. Kalibračné združenie – postup č. 16/1:1997
- [4] Vestník MZ SSR, metodické opatrenia: Smernice č. 1, ktorými sa určuje spôsob merania a hodnotenia hluku a ultrazvuku v pracovnom prostredí, jún 1977
- [5] Drahoš M.: Presnosť jednorazového dlhodobého merania hluku pomocou integračných zvukomerov, AHEM Praha 1983
- [6] MSA – L/04: 2002 Návod na posudzovanie a oznámenie súladu so špecifikáciou, SNAS Bratislava 2002
- [7] Vestník MZ ČR, čiastka 1. Metodické opatrenia. Január 2002

Text tohto článku bol uverejnený v časopise Metrológia a skúšobníctvo č. 4/2004