

dr. Ferdinand Deželak, univ. dipl. inž. geod., dipl. inž. fiz.
ferdo.dezelak86@gmail.com
Slovensko društvo za akustiko,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



doc. dr. Mateja Dovjak, dipl. san. inž.
mdovjak@fgg.uni-lj.si
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Univerze v Ljubljani,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 543.836

NEGOTOVOST KOT MERILO ZANESLJIVOSTI MERITEV HRUPA V OKOLJU

UNCERTAINTY AS A CRITERION OF RELIABILITY FOR ENVIRONMENTAL NOISE MEASUREMENTS

Povzetek

Negotovost kot merilo zanesljivosti se je uveljavila na vseh področjih, ki temeljijo na meroslovju in spremljanju kakovosti. V Sloveniji je vpeljana v obratovalni monitoring stanja kakovost voda in kakovosti zraka, na področju hrupa v okolju še pridobiva svojo veljavo. Sistematičen pregled raziskav je pokazal, da je proces ocenjevanja negotovosti na področju meritev, modeliranja, analize, ocenjevanja in poročanja o okoljskem hrupu neobhoden za doseg točnosti končnega rezultata in zanesljivosti meritev. Identifikacija vseh virov in prispevkov k negotovosti nam omogoča kvantificiranje celotne negotovosti, smer zniževanja negotovosti in sprejem učinkovitih ukrepov za sanacijo hrupa. Namen članka je s sistematičnim pregledom zakonskih zahtev, priporočil in raziskav preučiti vlogo merilne negotovosti pri ocenjevanju zanesljivosti meritev hrupa v grajenem okolju. V članku bodo predstavljene metode določanje negotovosti s proračunom negotovosti. S pomočjo študije primera bo ovrednoten pomen negotovosti za izboljšanje kakovosti poročil o monitoringu hrupa v okolju. Rezultati imajo veliko uporabno vrednost, saj poudarjajo nujnosti in smiselnost širše uporabe negotovosti v praksi in s tem dvigujejo ozaveščenost strokovnjakov in raziskovalcev.

Ključne besede: merilna negotovost, hrup v okolju, zanesljivost meritev, proračun negotovosti

Summary

Uncertainty as a measure of reliability has become established in all areas of metrology and quality monitoring. In Slovenia, it has been introduced in groundwater and air quality monitoring, but in the field of environmental noise it is still being enforced. A systematic literature review has shown that the estimation of uncertainty in measurements, modelling, analysis, estimation and reporting of environmental noise is necessary to achieve the accuracy of the final result and the reliability of measurements. Identifying all sources and contributors to uncertainty allows us to quantify the overall uncertainty, the direction of reduction and thus effective noise measures. This article aims to examine the role of measurement uncertainty in assessing the reliability of noise measurements in the built environment through a systematic review of regulatory requirements, recommendations and research findings. The article presents methods for identifying uncertainties with uncertainty budget. A case study examines the importance of uncertainty in improving the quality of environmental noise monitoring reports. The results are highly relevant as they emphasize the necessity and importance of the broader use of uncertainty in practice and thus raise the awareness of experts and researchers.

Key words: measurement uncertainty, environmental noise, reliability of measurements, uncertainty budget

1 UVOD

Tehnološki napredek na področju merilnega instrumentarija zmanjšuje merilne napake in negotovost, kar še posebej velja pri uporabi in kalibraciji merilnikov hrupa [Craven, 2007]. Pri ocenjevanju hrupa ne smemo zanemariti vpliva spremenljivih razmer v zunanjem okolju, kot so vremenske razmere in topografija, na katere imamo znatno manjši vpliv. To poveča merilno negotovost in vpliva na interpretacijo dobljenega rezultata. Z namenom zmanjšanja negotovosti je treba analizirati celotno verigo merjenja. Ta vključuje izvor vira hrupa, pot prenosa in sprejemnika, kjer je ključna definicija virov negotovosti in vpliva le-teh na kakovost meritev in s tem na končni rezultat.

Merilna negotovost je parameter, ki označuje raztros vrednosti veličine, ki so na podlagi uporabljenih podatkov pripisane merjencu [Hall, 2020]. V preteklosti sta se rezultata preizkusa in negotovosti obravnavala kot dve neodvisni veličini. Danes se je to pojmovanje spremenilo. Tako na primer že Mednarodni slovar meroslovja – Osnovni in splošni koncepti ter z njimi povezani izrazi (VIM) [SIST-V, 2012] obravnava merilni rezultat kot sestavljeno vrednost iz i) izmerjene veličine in ii) merilne negotovosti. Skladno s Pravilnikom o prvem ocenjevanju in obratovalnem monitoringu za vire hrupa ter o pogojih za njegovo izvajanje [UL RS, 2008] je negotovost ocenjevanja definirana kot "merilo, največkrat kvalitativno, ki izraža stopnjo dvoma ali pomanjkanja gotovosti glede ocene o pravi vrednosti parametra, katerega vrednost se ugotavlja z meritvami ali modelnim izračunom".

Historično gledano, segajo zapisi o merilni negotovosti že v 18. stoletje in so tesno povezani z razvojem statistike in teorije napak. Med prvimi raziskovalci na tem področju je bil Thomas Simpson, ki je odkril, da so pozitivne in negativne napake enako verjetne. Nadalje je preiskoval tudi različne porazdelitve napak in njihove omejitve. Prvi je opisal enakomerno in trikotniško porazdelitev. Malo kasneje je Pierre Simon Laplace vzpostavil eksponentno povezavo med pogostostjo napak in kvadratom njihove velikosti, ki jo je izpopolnil Carl Friedrich Gauss (1777–1855) in jo danes poznamo kot normalno porazdelitev verjetnosti.

Negotovost kot merilo zanesljivosti se je uveljavila na vseh področjih, ki temeljijo na meroslovju in spremljanju kakovosti. Negotovost se je zelo zgodaj in v znatni meri razvila tudi na področju geodetskih meritev, kjer se pogosto obravnava v sklopu izravnalnega računa (hr.: račun izjednačenja) [Čubranić, 1958]. Enako velja tudi za področje gradbeništva; na primer meritve zvočne izolirnosti v gradbeni akustiki, kjer so bili razviti tudi posebni standardi za potrebe uporabe merilne negotovosti ([SIST EN ISO 12999/1, 2020], [SIST EN ISO 12999/2, 2021]). Nujnost analize negotovosti in njeno navajanje je opredeljeno tudi v vodilu GUM 1995 (ang. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement) [JCGM, 2008], ki vključuje serijo dokumentov, s katerimi so določena splošna pravila za vrednotenje in izražanje negotovosti pri meritvah, ki jim je mogoče slediti na različnih ravneh natančnosti in na številnih področjih, vključujoč proizvodnjo in raziskave. V Evropi je GUM 1995 [JCGM, 2008] zahtevan dokument skladno z Direktivo Komisije (EU) 2015/996 o določitvi skupnih metod ocenjevanja hrupa [UL ES, 2015], metodami ocenjevanja hrupa v Evropi [CNOSSOS-EU, 2012] in standardi ([EN ISO, 3095, 2013], [ISO 9613-1, 1993], [SIST ISO 1996-1, 2016],

[SIST ISO 1996-2, 2017], [SIST EN ISO/IEC 17025, 2017]). GUM 1995 [JCGM, 2008] se je na področju meritve hrupa uveljavil že v številnih državah, kot so Nemčija, Avstrija, Italija. Dober zgled nam predstavlja tudi raziskava Nacionalnega akreditacijskega telesa v Združenem kraljestvu (ang. National Accreditation Body for the United Kingdom, UKAS) z naslovom Pravila odločanja in izjave o skladnosti [UKAS, 2020]. Ta ima v Združenem kraljestvu podobno vlogo kot v Nemčiji DAkkS (nem. Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH, DAkkS) ali pri nas Slovenska akreditacija. Raziskava poudarja nujnost analize in navajanja negotovosti, ko se izmerjene vrednosti primerjajo z normativni oziroma referenčnimi vrednostmi. Merilna negotovost je v Sloveniji vpeljana na področje obratovalnega monitoringa stanja podzemne vode (Pravilnik o obratovalnem monitoringu stanja podzemne vode [UL RS, 2021]) in kakovosti zraka [Koleša, 2008]. Številni avtorji ([Hannah, 2003], [Liepert, 2017], [Probst, 2005], [Przysucha, 2015], [Randa 2008]) poudarjajo nujnost ocenjevanja negotovosti za področje meritev, modeliranja, analize, ocenjevanja in poročanja okoljskega hrupa. Pojasnjujejo, da je nivo negotovosti pri okoljskem hrupu povezan s številnimi vplivnimi faktorji, ki so v medsebojni povezavi in vključujejo vremenske razmere, značilnosti instrumentarija in usposobljenost ter izkušnje izvajalca meritev. Hannahova s soavtorji [Hannah, 2003] je v priporočniku o negotovosti na področju okoljskega hrupa v Novi Zelandiji primerjala nacionalne standarde z mednarodnimi in podala metodologijo o navajanju negotovosti. Avtorji poudarjajo, da proces ocenjevanja negotovosti ni enosmeren, kljub kompleksnosti pa je dobrodošla že osnovna navedba negotovosti, kar se odraža v boljšem razumevanju in zaupanju v rezultat. Primerjava zakonskih zahtev in priporočil je pokazala, da področje negotovosti z leti pridobiva veljavo, za kar je usklajenost nacionalnih zahtev in priporočil z mednarodnimi standardi neobhodna [Hannah, 2003]. Liepert s soavtorji [Liepert, 2017] je izvedel raziskavo o pomenu negotovosti pri izračunanih ravneh hrupa (prometni, letalski) in vplivu na odnos med izpostavljenostjo in odzivom. Avtorji raziskave poudarjajo, da je negotovost na področju vrednotenja odnosa med izpostavljenostjo in odzivom pogosto spregledana. V okviru projekta NORAH so avtorji določili negotovost izračunanih ravni hrupa za različne vire (promet, letalski hrup), vključujoč pot prenosa in sprejemnika. Negotovost je znašala od 3 do 5 dB v odvisnosti od vira hrupa. Liepert [Liepert, 2017] zaključuje, da je negotovost eden izmed pomembnih faktorjev pri preučevanju odnosa med izpostavljenostjo in odzivom. Probst [Probst, 2005] je v svojem delu z naslovom »Negotovost v napovedih okoljskega hrupa in kartiranju hrupa« predstavljal metodo, kako oceniti negotovost izračunanih ravni hrupa, ki vključuje tako negotovost emisijskih vrednosti kot negotovost na poti širjenja. Avtor prikaže izračun negotovosti za primer karte hrupa za mesto Augsburg. Pri tem poudari, da je določitev negotovosti pri kartiranju izredno kompleksno področje in vključuje številne vplive [Probst, 2005]. Na področju kartiranja je Gomez s soavtorji [Gomez, 2020] izpostavil dilemo o postopku izvedbe validacije. Rezultati kažejo, da je treba vključiti negotovost meritev hrupa, saj omejuje validacijski prag (običajno se šteje za ± 3 dB). Skladno z [Gomez, 2020] je validacijski prag (ang. validation threshold) razlika med merjenimi in predpostavljenimi oziroma napovedanimi vrednostmi. Craven in Kerry [Craven, 2007] sta v okviru nacionalnega programa in sistema akustične metrologije izdelala obsežna navodila za določitev virov negotovosti pri meritvah okoljskega hrupa. Identifikacija vseh virov in prispevkov k negotovosti omogoča ne le kvantifi-

ciranje celotne negotovosti, ampak tudi pokaže poti znižanja negotovosti in s tem zvečanja točnosti končnega rezultata.

Pričujoči članek se osredotoča na pomen vpeljave merilne negotovosti na področje monitoringa okoljskega hrupa, vključujoč meritve zvočne zaščite stavb in akustike v Sloveniji. Pri tem je treba razlikovati med termini, kot so hrup v grajenem okolju, hrup v naravnem in življenjskem okolju in hrup v stavbah. Hrup v grajenem okolju je nadpomenka, ki pomeni hrup v zunanem in notranjem okolju; grajenem okolju, ki nastane s človeškim posegom (graditev), in je namenjeno vsakodnevnim aktivnostim (bivalno in delovno okolje) [Dovjak, 2019]. V preteklosti se je v Sloveniji uporabljala sopomenka hrup v komunalnem okolju (ang. community noise). Terminološka razlika med hrupom v grajenem okolju, hrupom v življenjskem in naravnem okolju ter hrupom v stavbah je v Sloveniji definirana s področnimi pravnimi akti. Skladno z Uredbo o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju [UL RS, 2018] je hrup v okolju (življenjsko, naravno) opredeljen kot hrup, ki ga povzročajo stalne ali občasne emisije hrupa enega ali več virov obremenjevanja okolja s hrupom. Vir so lahko cesta, železniška proga z letnimi prevozi več kot 10 000 vlakov, letališče, heliport ali pristanišče, skladišče, odprto parkirišče, naprava industrijske, obrtne, proizvodne, storitvene in podobne dejavnosti, industrijski kompleks, gradbišče in obrat. Področje zaščite pred hrupom v stavbah je urejeno s Pravilnikom o zaščiti pred hrupom v stavbah in TSG, ki določata zahteve, s katerimi se v stavbah in njihovih delih omeji raven hrupa, s čimer preprečimo ogrožanje zdravja ljudi in ustvarimo ustrezne razmere za njihovo delo, druge dejavnosti in počitek. Poseben poudarek je na ukrepih zmanjšanja vplivov hrupa na varovane prostore stavb, v katerih se ljudje zadržujejo dlje časa (npr. spalnice, igralnice v vrtcih, bolniške sobe ipd.). Hrup v delovnem okolju je dodatno urejen v Pravilniku o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti hrupu pri delu [UL RS, 2006]. Na področju monitoringa so lahko preskuševalni laboratoriji akreditirani za določanje ravni hrupa z meritvami in modelnimi izračuni hrupa v okolju in/ali meritvami na področju zaščite pred hrupom v stavbah.

Za potrebe monitoringa okoljskega hrupa izvajajo pooblaščenici meritve in izračune. Njihove rezultate strnejo v poročilih, v katerih podajo primerjavo kazalcev hrupa z mejnimi vrednostmi. Ti zaključki predstavljajo za večino uporabnikov najpomembnejši in najzanimivejši del poročila, saj morajo biti v njih strnjene najpomembnejše ugotovitve, ali so merodajni kazalci hrupa v dovoljenih mejah ali ne. Pri sprejemu takšne odločitve je zato treba poznati in upoštevati tudi tveganje. Navajanje ugotovitev je lahko celo neverodostojno, če pooblaščenec ne utemelji zanesljivosti. Glavno merilo za takšno zanesljivost je negotovost, katere analiza in podajanje morata biti sestavni del vsakega poročila. Poročanje o merilni negotovosti uporabnikom omogoča oceniti, ali rezultati preizkusa ustrezajo svojemu namenu. Stranke potrebujejo merilno negotovost, da lahko sprejmejo kvalificirano odločitev, npr. o potrebi izvedbe protihrupne sanacije, o povečanju proizvodnje, nabavi novih strojev in naprav, oziroma izvedbi kakršnihkoli sprememb, ki vplivajo na hrup v okolju. Vloga negotovosti v procesu odločanja je neobhodna [Vilela, 2022].

Namen članka je s sistematičnim pregledom zakonskih zahtev, priporočil in raziskav preučiti vlogo merilne negotovosti pri ocenjevanju zanesljivosti meritev hrupa v grajenem okolju. V članku bodo predstavljeni: i) izsledki zakonskih zahtev,

priporočil in raziskav v kontekstu obstoječe prakse; ii) metode določanje negotovosti in proračun negotovosti; iii) tipi merilne negotovosti in elementi proračuna negotovosti; iv) kombinirana in razširjena negotovost ter primerjava s specifikacijo; v) odločitveno pravilo in primerjava z zakonsko sprejemljivimi vrednostmi. S pomočjo študije hipotetičnih primerov bomo ovrednotili pomen negotovosti kot faktor izboljšanja kakovosti poročil o monitoringu hrupa v okolju. Rezultati imajo veliko uporabno vrednost k ozaveščanju strokovnjakov in raziskovalcev kot nujnosti in smiselnosti širše uporabe negotovosti v praksi.

2 METODA

Sistematični pregled literature smo opravili v iskalnih bazah podatkov, kot sta Science Direct in Scopus. Iskalni niz besed je bil izdelan v slovenščini in angleščini: »merilna negotovost IN meritve hrupa«, »uncertainty AND noise measurements«. V pregled smo vzeli relevantno literaturo, objavljeno do konca aprila 2022. Relevantne vire literature smo iskali tudi na spletnih naslovih EUR-Lex, Pravno informacijski sistem Republike Slovenije, Ministrstvo za okolje in prostor RS. S pomočjo študije primera bomo ovrednotili pomen negotovosti kot faktor izboljšanja kakovosti poročil o monitoringu hrupa v okolju.

3 REZULTATI

3.1 Izsledki zakonskih zahtev in priporočil na področju negotovosti v kontekstu obstoječe prakse

Merilna negotovost skladno s 13. členom Pravilnika o prvem ocenjevanju in obratovalnem monitoringu za vire hrupa ter o pogojih za njegovo izvajanje [UL RS, 2008] ni del poročila o ocenjevanju hrupa. Vendar pa je pri tem treba upoštevati tudi druge člene tega istega Pravilnika (na primer 7. in 10. člen), ki zahtevajo, da se meritve in ocenjevanje hrupa izvedejo skladno s standardom [SIST ISO 1996-2, 2017] v povezavi s standardom [SIST ISO 1996-1, 2016]. Gre torej za standarda z obvezno uporabo, ki zahtevata, da mora poročilo vsebovati tudi oceno razširjene merilne negotovosti skupaj z izbranim verjetnostnim pokritjem.

Kot je bilo poudarjeno v uvodu, je glavna pozornost pri izvedbi meritev okoljskega hrupa in negotovosti usmerjena zgolj v kalibracijo instrumentarija, drugi izvori negotovosti so pogosto ostali prikriti oziroma so se zanemarili. Z razvojem tehnike so se manjšale napake uporabljenega instrumentarija. Sodobnejši instrumentarij je pričel omogočati nove merilne metode, ki so obremenjene z manjšimi napakami kot tiste, uporabljane v preteklosti. Ne glede na to pa so meritve hrupa še vedno podvržene večjemu številu pomembnih napak, ki so povezane predvsem s spreminjajočimi se vplivi: i) obratovalnih režimov preiskovanih hrupnih virov; ii) meteoroloških razmer, iii) hrupa ozadja, iv) merilne lokacije oziroma njene okolice in podobno. Gre torej za parametre, ki niso pod nadzorom operaterja, ki izvaja meritve, oziroma ni možno njihovega vpliva zmanjšati zgolj z modernejšo merilno tehniko. Zato bi moral operater, ki meritve izvaja, te vplive poznati, jih oceniti in upoštevati, kar zahteva tudi nova verzija standarda [SIST ISO 1996-2, 2017]. Cilj

nove verzije standarda [SIST ISO 1996-2, 2017] je izboljšanje natančnosti rezultatov meritev okoljskega hrupa in zanesljivejša ocena podajanja njihove negotovosti ob upoštevanju vseh pomembnejših vplivnih faktorjev.

Pri tem se moramo v prvi vrst zavedati, da pri monitoringu hrupa izmerjenih parametrov večinoma ne moremo neposredno primerjati z normativi (kar je zanimivo za uporabnike poročil), temveč jih moramo predhodno ustrezno transformirati in upoštevati še dodatne popravke, da dobimo ocenjene ravni oziroma merodajne kazalce hrupa. Ne nazadnje so takšni postopki uveljavljeni tudi v številnih drugih strokah, ne samo pri monitoringu hrupa. Pri tem velja opozoriti tudi na to, da nekateri strokovnjaki izpostavljajo kot ključni problem opredelitev merjene veličine/lastnosti, ki naj bi bila akreditirana. Slednje lahko rezultira v vprašanju, ali je trenutni postopek akreditacije zadosten, saj zagotavlja zgolj kakovost nad pravilnim vzorčenjem, medtem ko večine uporabnikov poročil temu ne posvečajo dovolj pozornosti. Končne uporabnike (zavezance, izpostavljene stanovalce, inšpekcijske službe in druge) zanimajo predvsem merodajni kazalci (*L_{dan}*, *L_{več}*, *L_{noč}*, *L_{dvn}*, *L₁*) in njihova zanesljivost, primerjava z mejnimi vrednostmi ter zaključki, čemur pa akreditacija, vezana na monitoring hrupa, trenutno ne pokriva v zadostni meri. Dejanska kakovost poročil se lahko odraža predvsem v luči podajanja teh najpomembnejših kazalcev in njihove zanesljivosti in ne zgolj na enem izmed vhodnih podatkov za njihovo določitev.

Akreditirani laboratorij mora obvladovati vse dejavnike, ki vplivajo na rezultat preizkušnja, in ovrednotiti negotovost rezultata. Kazalec hrupa je torej lahko obravnavan kot rezultat preizkušanja, če laboratorij lahko ovrednoti prispevke vseh vhodnih podatkov in predpostavk k negotovosti njegove določitve. Zato morajo pooblaščenec vložiti veliko truda, da vse te prispevke in njihovo negotovost pravilno in sledljivo vrednotijo skladno s standardom [SIST ISO 1996-2, 2017]. Iz tega sledi, da bodo morali tudi pooblaščenec spremljati in analizirati vse vhodne podatke, potrebne za določitev merodajnih kazalcev hrupa, vključno z njihovo negotovostjo. Vhodne podatke predstavlja jo vsi prispevki, ki vplivajo na merodajne kazalce hrupa in jih mora pooblaščenec upoštevati pri njihovi določitvi.

Sistematično lahko pomembnejše vplive razdelimo v tri skupine:

- emisijske (število izvorov, režim obratovanja, vpliv posluževalca, meteorološke razmere v smislu vpliva na obratovanje strojev in naprav),
- transmijske (vremenske razmere v smislu vpliva na širjenje hrupa, vpliv tal, topografije),
- imisijske (hrup ozadja, vpliv odbojev od fasad in drugih reflektirajočih površin, vpliv izvajalca meritev, vpliv merilnega instrumentarija, itd.). Pri tem ni nujno, da pooblaščenec pri ocenjevanju upošteva prav vse vplivne faktorje, še zlasti ne manj pomembne. Vendar pa mora biti v poročilu jasno sledljivo, katere vplivne faktorje je upošteval kot vhodne podatke in kakšni so njihovi prispevki h kazalcem hrupa in njihovi negotovosti. Menimo, da bi v tem primeru akreditacija imela pomembnejši del nadzora nad pravilnostjo in kakovostjo poročil o obratovalnem monitoringu hrupa.

Več predpisov obvezuje pooblaščenca k analizam vhodnih podatkov in podajanju njihove negotovosti. Znano je, da

potrebuje vsak pooblaščenec za pridobitev pooblastila za izvajanje prvih meritev in obratovalnega monitoringa hrupa akreditacijo. Splošne zahteve, ki jih morajo izpolnjevati akreditirani preizkusni in kalibracijski laboratoriji, so opisane v [SIST EN ISO/IEC 17025, 2017]. Ta mednarodni standard je podlaga za mednarodno akreditacijo laboratorija. Dodatno so pomembne še smernice za namene akreditacije, na primer Mednarodnega združenja za akreditacijo laboratorijev (ang. International Laboratory Accreditation Cooperation, ILAC). ILAC [ILAC, 2022] je globalno združenje za akreditacijo laboratorijev, kontrolnih organov, izvajalcev preizkusov strokovne usposobljenosti in proizvajalcev referenčnih materialov, katerega članstvo sestavljajo akreditacijski organi in organizacije deležnikov po vsem svetu. Je predstavniška organizacija, ki se vključuje v: i) razvoj akreditacijskih praks in postopkov, ii) promocijo akreditacije kot orodja za spodbujanje trgovine, iii) podporo zagotavljanju lokalnih in nacionalnih storitev, iv) pomoč pri razvoju akreditacijskih sistemov, v) priznavanje kompetentnih preizkuševalnih (tudi medicinskih) in kalibracijskih laboratorijev, kontrolnih organov, izvajalcev preizkusov strokovne usposobljenosti in proizvajalcev referenčnih materialov po vsem svetu.

Z upravljanjem mednarodnega dogovora o medsebojnem priznavanju med akreditacijskimi organi (AO) – Dogovora ILAC – ILAC pospešuje trgovino in nudi podporo regulatorjem. S tem dogovorom so podatki in rezultati preizkusov, ki jih izdajo laboratoriji in kontrolni organi s skupnim imenom organi za ugotavljanje skladnosti (OUS), akreditirani pri akreditacijskih organih, članih ILAC, globalno sprejeti. S tem so zmanjšane tehnične ovire pri trgovanju, npr. ponovno preizkušanje izdelkov z vsakim njihovim vstopom v novo gospodarstvo, v podporo uresničevanju cilja proste trgovine: "enkrat akreditirano, sprejeto povsod". Poleg tega akreditacija z zagotavljanjem, da so akreditirani OUS kompetentni za izvajanje dela, ki ga v svojem obsegu akreditacije opravljajo, zmanjša tveganje podjetij in njihovih strank. Nadaljnje rezultate akreditiranih organov v javno korist na široko uporabljajo regulatorji pri zagotavljanju storitev, ki promovirajo neonesnaženo okolje. Od akreditacijskih organov, ki so člani združenja ILAC, in od OUS, ki jih ti akreditirajo, se zahteva, da delujejo v skladu z ustreznimi mednarodnimi standardi in z veljavnimi navodili ILAC za dosledno izvajanje teh standardov. Akreditacijski organi, podpisniki Dogovora ILAC, so pred podpisom dogovora podvrženi zunanji evalvaciji (ang. peer evaluation), ki jo opravijo uradno ustanovljeni in priznani organi regionalnega sodelovanja z uporabo pravil in postopkov ILAC [ILAC, 2022].

V letu 2017 je Odbor za akreditacijo sprejel dokument OA15 – Smernice za poročanje na področju hrupa v okolju [SA, 2017]. Še pomembnejše v tej smeri pa so še novejša smernice OA10 – Smernice za poročanje na področju hrupa v okolju [SA, 2021], ki so namenjene pomoči akreditiranim pooblaščenem pri obdelavi negotovosti. V skladu z zahtevami za poročanje in sklicevanje na akreditacijo je treba zagotoviti nedvoumno in transparentno ločevanje akreditiranih in neakreditiranih dejavnosti. Prepoznano je bilo, da za to laboratoriji uporabljajo različne rešitve ter se vsebine in njihova struktura lahko razlikujejo do mere, ki otežuje preglednost za uporabnike. Zato je delovna skupina pri Odboru za akreditacijo, v katero so bili vključeni predstavniki akreditiranih organov, njihovih uporabnikov (med temi so bili tudi predstavniki za področje

pristojnih državnih organov) ter ocenjevalcev SA, pripravila Smernice za poročanje na področju hrupa v okolju OA15 [SA, 2017], da bi pripomogla k enotnejšemu razumevanju zahtev in njihovih interpretacij ter k večji enotnosti in preglednosti poročil. V preteklem letu pa je Slovenska akreditacija izdala tudi smernice za merilno negotovost pri preskušanju OA10 [SA, 2021]. Namen tega dokumenta je zagotoviti smernice in ustrezno literaturo za vrednotenje merilne negotovosti ter poročanje o njej v poročilih o preskusu. Naši predpisi (3. člen Pravilnika [UL RS, 2008]) opisujejo negotovost ocenjevanja kot "merilo, največkrat kvalitativno, ki izraža stopnjo dvoma ali pomanjkanja gotovosti glede ocene o pravi vrednosti parametra, katerega vrednost se ugotavlja z meritvami ali modelnim izračunom". Znano je, da morajo pooblaščenici že za pridobitev pooblastila ministrstva za izvajanje obratovalnega monitoringa imeti dokumentacijo o metodi za ugotavljanje merilne negotovosti ocenjevanja hrupa z meritvami hrupa oziroma dokumentacijo o metodi za ugotavljanje negotovosti ocenjevanja hrupa z modelnim izračunom na podlagi računskih metod. Ta zahteva je v veljavi že od sprejetja Pravilnika [UL RS, 2008], torej že več kot 13 let. Ugotavljanje in navajanje merilne negotovosti pa je postalo nujna praksa s sprejemom več obvezujočih standardov, sprejetih v letu 2017, in sicer [SIST EN ISO/IEC 17025, 2017] ter [SIST ISO 1996-2, 2017], deloma pa tudi ter [SIST ISO 1996-1, 2016], ki je stopil v veljavo leto pred tem. Standarda [SIST EN ISO/IEC 17025, 2017] in [SIST ISO 1996/2, 2017] za podrobnosti v zvezi z negotovostjo se sklicujeta na:

- ISO/IEC Vodilo 98-3, Merilna negotovost – 3. del: Vodilo za izražanje merilne negotovosti (GUM:1995) [ISO/IEC Vodilo 98-3, 2008]
- ISO/IEC Vodilo 98-4, Merilna negotovost – 4. del: Vloga merilne negotovosti pri ugotavljanju skladnosti [ISO/IEC Vodilo 98-4, 2012]

V praksi se sicer lahko zgodi, da naročnik od laboratorija svojevoljno zahteva, naj sprejme odločitev o skladnosti in hkrati »ignorira negotovost«. Po drugi strani to ni sprejemljivo, saj [SIST EN ISO/IEC 17025, 2017] tega ne dovoljuje, temveč zahteva, da je treba pri sprejemanju odločitev o skladnosti upoštevati negotovost. Morebitna takšna zahteva naročnika tudi v strokovnem smislu ni ustrezna. Statistično gledano, v primeru takšnega ignoriranja ni možno ugotoviti niti pravilne porazdelitvene funkcije niti drugih statističnih parametrov za merjeno vrednost, če bi se držali morebitne zahteve, naj se ne upoštevajo merilne negotovosti. Takšna odločitev bi tako bila v najblažjem primeru tehnično neveljavna zaradi nedoločljivega tveganja in nezmožnosti meroslovne sledljivosti. Upoštevanje merilne negotovosti in njene določitve pa po drugi strani omogoča sledljivost (vključno s poznavanjem ustrezne porazdelitvene funkcije in pomembnejših statističnih momentov), iz rezultatov odločanja pa je na tej osnovi možna tudi opredelitev tveganja.

V naslednjih šestih točkah so našteje osnovne zahteve standarda [SIST EN ISO/IEC 17025, 2017] v zvezi z merilno negotovostjo:

1. Laboratoriji morajo določiti prispevke k merilni negotovosti. Pri ovrednotenju merilne negotovosti je treba z ustreznimi analiznimi metodami upoštevati vse pomembnejše prispevke, vključno s tistimi, ki izhajajo iz vzorčenja.

2. Laboratorij, ki izvaja preizkušanje, mora ovrednotiti merilno negotovost. Kadar preizkusna metoda onemogoča natančno ovrednotenje merilne negotovosti, je treba oceno merilne negotovosti izdelati na podlagi razumevanja teoretičnih načel ali praktičnih izkušenj z izvajanjem metode.

3. Poročila o preizkusu morajo, kadar je to potrebno za razlago rezultatov preizkusa, vsebovati merilno negotovost, podano v isti merski enoti, kot je podana merjena veličina glede na merjenec (npr. v decibelih, odstotkih), in sicer:

- kadar je to pomembno za veljavnost ali uporabo rezultatov preizkusa,
- kadar to zahtevajo navodila naročnika ali (kot že opisano, naročnik ne more tega razumeti napačno in zahtevati ignoriranja merilne negotovosti), v kolikor želi hkrati dobiti primerjave preizkusov z normativi,
- kadar merilna negotovost vpliva na skladnost obratovanja naprave glede na predpisano mejno vrednostjo.

V našem primeru je zadnja zahteva praktično pravilo, saj je končni cilj poročila zaključek, ali so kazalci hrupa v dovoljenih mejah ali ne.

4. Kadar je podana izjava o skladnosti s specifikacijo ali standardom, mora laboratorij dokumentirati uporabljeno pravilo odločanja ob upoštevanju ravni tveganja (kot so npr. napačne odobritve in napačne zavrnitve ter statistične domneve), povezanega z uporabljenim pravilom odločanja, in uporabiti to pravilo odločanja.

5. Merilna oprema mora biti kalibrirana:

- če merilna točnost oziroma merilna negotovost vpliva na veljavnost rezultatov v poročilu in/ali
- če se kalibracija opreme zahteva zaradi zagotavljanja meroslovne sledljivosti rezultatov v poročilu.

6. Meroslovna sledljivost se vzpostavi ob upoštevanju in nato z zagotavljanjem, da je za vsak korak v verigi sledljivosti ovrednotena merilna negotovost v skladu z dogovorjenimi metodami ter da se vsak korak verige izvede v skladu z ustreznimi metodami, z merilnimi rezultati in s pripadajočimi, zapisanimi merilnimi negotovostmi.

Iz navedenega sledi, da bi se morali pooblaščenici v primeru ignoriranja obdelave in navajanja negotovosti v poročilih odpovedati akreditaciji, ki zahteva, da se delovni postopki izvajajo po standardu [SIST EN ISO/IEC 17025, 2017]. Hkrati bi morali prenehati podajati zaključke, ali je hrup v okolju v dovoljenih mejah ali ne. Dovoljeno bi bilo zgolj navajanje neposredno vzorčevalnih podatkov o neposredno izmerjenih ravneh hrupa, kar pa najverjetneje ne bi bilo več zanimivo niti za naročnike niti za prizadete stanovalce niti za inšpekcijske in druge organe.

Seveda pa bi morebitno ignoriranje negotovosti oziroma iskanje raznih zakonskih lukenj potegnilo za seboj tudi vprašanje potrebe po doslednosti na drugih področjih, ki so neposredno vezana na negotovost. Na primer, ali je potem še sploh treba izpolnjevati zahteve po instrumentariju, potrebe po njihovi kalibraciji, izvajanju meritev vetra ter drugih meteoroloških in pomožnih parametrov.

3.2 Določanje negotovosti in proračun negotovosti

Za določitev negotovosti obstaja več metod. Skladno s standardom [SIST ISO 1996-2, 2017] dajemo prednost modelni metodi – zasnovani na GUM 1995 [JCGM, 2008]. Pri modelni metodi identificiramo in kvantificiramo vse pomembnejše izvore negotovosti, opravimo ustrezne analize, na njihovi osnovi pa napravimo proračun negotovosti. Pri tem moramo upoštevati nekatere pomembne momente vhodnih količin. Za vsako izmed vhodnih veličin je namreč značilna:

- določena verjetnostna porazdelitev (normalna, pravokotniška, trikotna, Studentova itd.),
- določena srednja vrednost, ki predstavlja najboljšo oceno za vrednost vhodne količine,
- standardni odklon – merilo za razpršenost teh vrednosti.

3.3 Zakon o prenosu napak

V nadaljevanju navajamo specifičen primer meritve ravni hrupa, kjer je preiskovana raven hrupa L oziroma kazalec odvisen od večjega števila drugih količin x_j ($j=1...n$), lahko zapišemo njihovo funkcijsko povezavo kot

$$L = f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n). \quad (1)$$

Vsaka izmed teh veličin je obremenjena z določeno napako, ki jo statistično prikažemo v obliki standardne negotovosti u_j . Če so vse te količine medsebojno neodvisne, dobimo izraz za njihovo kombinirano standardno negotovost v obliki, ki se v praksi pogosto uporablja

$$u(L) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_j u_j)^2}, \quad (2)$$

kjer je c_j občutljivostni koeficient:

$$c_j = \frac{\partial f}{\partial x_j}. \quad (3)$$

Prispevki h kombinirani standardni negotovosti u , so torej odvisni od standardne negotovosti vsake vhodne količine in pripadajočega koeficienta občutljivosti c_j . Za vsako izmed vhodnih količin je značilna določena verjetnostna porazdelitev (normalna, pravokotniška, trikotna, Studentova itd.) ter določena srednja vrednost, ki predstavlja najboljšo oceno za vrednost vhodne količine, medtem ko je standardni odklon merilo za razpršenost teh vrednosti. Koeficienti občutljivosti so mera za vpliv sprememb vrednosti posameznih vhodnih količin na raven hrupa ali drugo preiskovano akustično količino. Matematično so to parcialni odvodi funkcije za izračunavanje vpliva določenih vhodnih količin na raven izpostavljenosti hrupu ali na druge akustične količine. Prispevki posameznih vhodnih količin so produkti standardnih negotovosti in pripadajočih koeficientov občutljivosti. Kombinirana standardna negotovost u se tako dobi po drugi enačbi iz posameznih prispevkov negotovosti, $c_j u_j$.

Sprejeta oblika izražanja merilne negotovosti, ki je na splošno povezana z vsemi standardiziranimi merilnimi metodami, je podrobneje opisana v dokumentu GUM 1995 [JCGM, 2008]. Ta oblika vsebuje tudi negotovost izračunov, v katerem so zajeti in kvantificirani vsi pomembni viri merilne negotovosti, iz katerih je mogoče dobiti kombinirano merilno negotovost.

3.4 Tipi merilne negotovosti in elementi proračuna negotovosti

Merilno negotovost sestavljata dva tipa: tip A, ki je vrednoten s statističnimi metodami na seriji ponovitvenih meritev, in tip B, vrednoten z nestatističnimi metodami. Pri implementaciji merilne negotovosti v delovne postopke pooblaščenec ter njeni uporabi obstaja določen prioriteten red, ki bi ga morali spoštovati. Na vrhu tega prioritetnega reda je določanje negotovosti po modelni metodi, pri kateri moramo identificirati in količinsko opredeliti vse pomembnejše vplivne faktorje oziroma izvore negotovosti. Poleg teh vplivnih faktorjev moramo oceniti njihovo velikost ter občutljivostne koeficiente. Z drugimi besedami, napraviti moramo proračun negotovosti, ki je osnova za nadaljnje odločitve. Splošna shema poteka postopka za določitev proračuna negotovosti je naslednja:

- vzpostaviti moramo model oziroma funkcijske povezave med izmerjenimi in iskanimi količinami,
- ugotoviti vseh pomembnejše vire negotovosti,
- izračunati standardne negotovosti za vsako komponento: za izmerjene po tipu A (u_A) (meritve ponovimo na primer 3- do 5-krat) in po tipu B (u_B) za druge komponente,
- določiti koeficiente občutljivosti,
- izračunati kombinirane negotovosti,
- izračunati razširjene negotovosti ob upoštevanju faktorja pokritja.

Negotovost ocene posamezne vhodne (vplivne) količine imenujemo standardna negotovost σ_j .

Koeficienti občutljivosti c_j opisujejo, kako na vrednosti ravni preiskovane akustične količine vplivajo spremembe vrednosti posameznih vhodnih količin.

Prispevki posameznih vhodnih količin po GUM na kombinirano negotovost se podajo z vsoto kvadratov produktov standardnih negotovosti in njim pripadajočim koeficientov občutljivosti:

$$u(L) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_j \sigma_j)^2}. \quad (4)$$

Kombinirana negotovost – splošno

$$u(L) = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \dots + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots}. \quad (5)$$

Razširjena negotovost $U=ku(L)$ Za norm. porazdelitev in 95 % zaupanje, $k=2$

$$U(L)_{normal,95\%} = 2u(L_r). \quad (6)$$

Razširjena negotovost nam glede na kombinirano tako ne ponuja nobene nove informacije, izkaže pa se za priročno merilo pri primerjavi merodajnih kazalcev z normativnimi vrednostmi.

Proračun negotovosti bi torej moral postati sestavni del vsakega izdanega poročila. Zagotoviti mora sledljivost do informacij, katere vire napak oziroma negotovosti je posamezni pooblaščenec sploh upošteval ter v kolikšni meri. Osnovni primer proračuna negotovosti je tudi sestavni del SIST ISO 1996-2 [SIST ISO 1996-2, 2017] standarda in je prikazan spodaj (preglednica 1). Pri tem se pričakuje, da ga bo vsak pooblaščenec dopolnil glede na lastne potrebe in naloge, ki jih izvaja.

Količina	Ocena	Standardna negotovost	Občutljivostni koeficient
$L' + \delta_{slm}$	L'	$u(L') (0,5 \text{ dB})$	$\frac{1}{1 - 10^{-0,1(L' - L_{res})}}$
δ_{vir}	0	u_{vir}	1
δ_{met}	0	u_{met}	1
δ_{lok}	0,0 – 6,0	u_{lok}	1
$L_{res} + \delta_{res}$	L_{res}	u_{res}	$\frac{10^{-0,1(L' - L_{res})}}{1 - 10^{-0,1(L' - L_{res})}}$

Preglednica 1. Osnovni primer proračuna negotovosti (prilagojeno po [SIST ISO 1996-2, 2017]).

L' - celotna izmerjena raven hrupa, ki vključuje tudi hrup ozadja, izražena v dB; δ_{slm} - vhodna količina, vezana na negotovost zaradi odstopanja v merilni verigi (merilnik hrupa in druga merilna oprema), izražena v dB; δ_{vir} - vhodna količina, vezana na negotovost zaradi odstopanja od pričakovanih obratovalnih razmer hrupnega vira, izražena v dB; δ_{met} - vhodna količina, vezana na negotovost zaradi odstopanja od predpostavljenih meteoroloških razmer, izražena v dB; δ_{lok} - vhodna količina, vezana na negotovost zaradi izbire merilne lokacije, izražena v dB; L_{res} - hrup ozadja, izražen v dB; δ_{res} - vhodna količina, vezana na negotovost zaradi hrupa ozadja, izražena v dB; $u(L') (0,5 \text{ dB})$ - standardna negotovost celotne izmerjene ravni hrupa; u_{vir} - standardna negotovost zaradi vpliva obratovanja vira hrupa; u_{met} - standardna negotovost zaradi vpliva meteoroloških razmer; u_{lok} - standardna negotovost zaradi vpliva merilne lokacije; u_{res} - standardna negotovost zaradi vpliva hrupa ozadja.

3.5 Kombinirana in razširjena negotovost in primerjava s specifikacijo

Kot že omenjeno, poznamo dva tipa merilne negotovosti: tip A in tip B. Skupno oziroma kombinirano negotovost dane meritve dobimo s kombinacijo kvadratov posameznih negotovosti obeh tipov

$$U_{SKH} = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + \dots} \quad (7)$$

Razširjeno merilno negotovost meritev ravni hrupa in drugih akustičnih količin v praksi največkrat povezujemo s tako imenovano verjetnostjo pokritja 95 %. Kot je opredeljeno v publikaciji GUM, naj bi se v primeru normalne porazdelitve za sprejemljivega štel dvakratni kombinirani standardni odklon od določene vrednosti, razen če so na voljo posebne izkušnje in znanja. Razširjena merilna negotovost je namreč odvisna od stopnje zaupanja, ki jo želimo doseči. Razširjena negotovost U je podana s produktom $U = ku$, kjer je k faktor pokritosti, ki je odvisen od intervala zaupanja. Za normalno porazdelitev izmerjenih ali modeliranih vrednosti lahko s 95-% zaupanjem trdimo, da leži dejanska vrednost v intervalu $(L-U)$ do $(L+U)$; pri tem je lahko L raven hrupa ali druga preiskovana akustična količina. To ustreza faktorju pokritja $k = 1.96$, kar zaokrožimo na vrednost 2 (faktor pokritja $k = 2$).

Če pa je namen določanja vrednosti določene akustične količine (na primer raven hrupa) primerjava rezultatov z mejno

vrednostjo (ki naj ne bi bila presežena, lahko pa je nižja od nje), se izkaže bolj primerna uporaba enostranskega faktorja pokritja oziroma za enostransko normalno porazdelitev. V tem primeru je pri normalni porazdelitvi za faktor pokritja vrednost $k = 1.6$, kar ustreza 95-% stopnji zaupanja. To pomeni, da je 95-% vrednosti manjših od zgornjo mejo $L+U$ in s tem sprejemljivo za nasprotno stranko.

Razširjena negotovost enoštevilske vrednosti L_r (ocenjena raven oz. kazalec hrupa) s faktorjem pokritja $k = 2$ in 95-% intervalom pokritja se tako določi kot produkt:

$$U(L_r) = ku(L_r). \quad (8)$$

3.5.1 Odločitveno pravilo

Pri pisanju poročil o obratovalnem monitoringu hrupa je običajno treba sprejeti določene odločitve, pri tem pa upoštevati odločitveno pravilo (ang. decision rule). Odločitveno pravilo opisuje, kako bo merilna negotovost upoštevana pri primerjavi izmerjenih oziroma izračunanih kazalcev hrupa ter normativnih vrednosti. Gre torej za odločitve, ali so kazalci hrupa v dovoljenih mejah ali pa jo presegajo in s kakšno zanesljivostjo lahko kaj takšnega sploh zatrjujemo. Kot že omenjeno, pri tem običajno vzamemo kot adekvatno merilo razširjeno merilno negotovost U in stopnjo zaupanja približno 95 % (faktor kritja $k = 2$). Le v izjemnih primerih se izbere višja stopnja zaupanja, npr. 99 % (faktor pokritosti $k = 3$).

3.6 Primeri vrednotenja ob upoštevanju merilne negotovosti

Eden najpomembnejših ciljev monitoringa hrupa je primerjava ocenjenih ravni hrupa z normativi. V prvi vrsti je namreč treba preveriti odstopanje (na primer ocenjene ravni za posamezno obdobje L_r), določeno z navedeno metodo, od zakonsko sprejemljive vrednosti $L_r \text{ lim}$. Za obojestranski interval velja z upoštevanjem negotovosti $U(L_r)$:

$L_r + U(L_r) \leq L_r \text{ lim}$, maksimalna dovoljena vrednost ni presežena;
 $L_r - U(L_r) > L_r \text{ lim}$, je maksimalna dovoljena vrednost presežena;
 $L_r - U(L_r) \leq L_r \text{ lim} \leq L_r + U(L_r)$, zanesljiv zaključek ni možen in je meritve treba ponavljati še naprej.

$L_r \text{ lim}$ se nanaša na mejno oziroma normativno raven hrupa, predpisano za dane emisije hrupa, okolje in obdobje.

1. primer odločitve – skladnost

$L_r + U(L_r) \leq L_r \text{ lim}$, maksimalna dovoljena vrednost ni presežena.

Če rezultat meritve, povečan za razširjeno negotovost s 95-odstotno verjetnostjo pokritja ne presega meje normativov, lahko to obravnavamo kot skladnost s specifikacijo. Rezultat meritve je v tem primeru znotraj (ali pod) mejo specifikacije, če se upošteva merilna negotovost.

2. primer odločitve – neskladnost

$L_r - U(L_r) > L_r \text{ lim}$, je maksimalna dovoljena vrednost presežena. V tem primeru gre za neskladnost, torej če rezultat meritve, zmanjšan za razširjeno negotovost, preseže mejo specifikacije, se lahko s 95-odstotno verjetnostjo pokritja navede neskladnost s specifikacijo.

3. primer – ni možno podati odločitve

$L_r - U(L_r) \leq L_r \leq L_r + U(L_r)$, zanesljiv zaključek ni možen in je meritve treba ponavljati še naprej. Če rezultat meritve plus/minus razširjena negotovost leži znotraj tega intervala, ni možno navesti skladnosti ali neskladnosti. Rezultat meritve in razširjena negotovost s 95-odstotno verjetnostjo pokritja je treba v tem primeru obravnavati skupaj z izjavo, da ni možno zatrjevati niti skladnosti niti neskladnosti. O skladnosti z normativi torej ne moremo poročati, če je tveganje napačnega rezultata večje kot 5 %.

To pomeni, da končna odločitev, ali je hrup v danem okolju in obdobju v dovoljenih mejah večkrat, ne more biti enolično določena. To še zlasti velja v primerih, ko so ocenjene ravni hrupa zelo blizu mejnim. Takrat je meritve načeloma treba ponavljati toliko časa, da s sprejemljivo zanesljivostjo lahko podamo pozitiven ali negativen odgovor, v nasprotnem primeru lahko to zatrjujemo le z določeno verjetnostjo. Na ta dejstva je treba opozoriti tudi inšpektorje oziroma druge pristojne organe.

3.7 Negotovost kot faktor izboljšanja kakovosti poročil o monitoringu hrupa v okolju

Kot je bilo predstavljeno v predhodnih poglavjih, je negotovost ključen faktor izboljšanja kakovosti monitoringu hrupa v okolju, prav tako pa ima dodano vrednost na vseh področjih meroslovja in kakovosti. Pri ocenjevanju negotovosti je pomembno, da izvajalec upošteva celotno verigo merjenja in sledi točnemu redosledu aktivnosti, ki so predstavljene v spodnji sliki 1.

1. Definiraj vse vire negotovosti: vir, pot širjenja, sprejemnik.
2. Določi prispevek posameznega vira k negotovosti: izračunaj iz ponavljajočih meritev; ocena na osnovi izkušenj ali rabo grafičnih prikazov iz literature.
3. Pretvori negotovost v dB.
4. Izračunaj standardno negotovost za vsak vir posebej: $u_1, u_2, u_3, \dots$ Standardna negotovost za normalni distribucijo je: $u = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (9)$ kjer je s ocenjena standardna deviacija za n vzorcev. Standardna negotovost za vsako pravokotno porazdelitev je: $u = \frac{x}{\sqrt{3}}. \quad (10)$ za x negotovost.
5. Izračunaj kombinirano negotovost u_c . splošno $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots}. \quad (11)$

Slika 1. Shematski prikaz korakov izračuna kombinirane negotovosti (prilagojeno po [Hannah, 2003]).

Kot številčni primer podajamo izračun negotovosti za primer meritev cestnoprometnega hrupa. Merilnik ravni zvočnega tlaka prvega razreda ima standardno negotovost okrog ± 0.5 dB. Negotovost emisije hrupa posameznih vozil lahko ocenimo s štetjem vozil po enačbi $u_{vir} = C/\sqrt{n}$. Na primer pri $n=100$ vozilih z mešanim prometom $C=10$, ocenimo u_{vir} na ± 1 dB. Negotovost smo ocenili v pogojih ugodnih meteoroloških razmer za razširjanje hrupa in znaša $u_{met} = \pm 2$ dB. Negotovost zaradi vpliva odbojev v bližini reflektirajočih površin na mikrofona s popravkom 3 dB ocenimo na ± 1 dB. Raven hrupa ozadja (52 dB) je bila za 8 dB nižja od celotne merjene ravni, merilna negotovost hrupa ozadja je znašala ± 2 dB, njen vpliv je torej znašal ± 0.38 dB, vpliv na celokupno raven pa 0,59 dB. Iz teh vhodnih podatkov izračunamo kombinirano negotovost na 2,54 dB oziroma razširjeno negotovost s 95-% pokritjem na 4,98 dB. Podrobnosti so v preglednici 2.

Količina	Ocena	Standardna negotovost u_j (dB)	Občutljivostni koeficient c_j	Prispevek k negotovosti $c_j u_j$ (dB)
L'	60 dB	0.5	$\frac{1}{1 - 10^{-0,1(L' - L_{res})}}$	0,59
δ_{vir}	100 vozil	$\frac{10}{\sqrt{100}} = 1$	1	1
δ_{met}	Ugodni pogoji	2	1	2
δ_{lok}	3 dB	1	1	1
δ_{res}	$L_{res} = 52$ dB	2	$\frac{10^{-0,1(L' - L_{res})}}{1 - 10^{-0,1(L' - L_{res})}}$	0,38
$u(L) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_j u_j)^2}$				2,54
Razširjena negotovost s 95-% verjetn. pokritjem				4,98

Preglednica 2. Proračun negotovosti za primer meritev cestnoprometnega hrupa.

Z doslednim upoštevanjem negotovosti pri izdelavi poročil o meritvah okoljskega hrupa bomo lahko dobili neko novo dimenzijo vrednosti na tržišču. Doslej so pri izbiri pooblaščenca številni, če ne celo večina zavezancev špekulativno izbirali tiste z najnižjo ceno. Z upoštevanjem negotovosti se tukaj lahko naredi nekaj več reda. V ta namen je možno vpeljati določene bonuse in maluse glede na kvaliteto oziroma negotovost, ki jo posamezni pooblaščenec oziroma njegovo poročilo lahko zagotovi. Zgolj za primer:

- negotovosti nad ± 10 dB bi predstavljale slabša poročila, za katera bi se zahteval pogostejši monitoring, na primer enkrat do dvakrat letno. Zato bi imela takšna poročila zelo nizko vrednost, verjetno tudi na tržišču.

– negotovosti med ± 3 do ± 5 dB bi predstavljale srednje kvaliteta poročila, za katera bi lahko veljal dosednji monitoring, vsako tretje leto. Oprostitev zavezanca od nadaljnega izvajanja monitoringa bi se izdajala le v primeru visokokvalitetnih poročil z nedvomno potrditvijo zelo nizkih ravni hrupa in z negotovostjo pod ± 2 dB. Seveda bi imela takšna kvalitetna poročila temu ustrezno visoko vrednost.

Pri tem pa so možni tudi drugi bonusi in malusi. Na ta način bi lahko tudi trg nekoliko uredil to področje, saj bi postala tudi kvaliteta oziroma natančnost opravljenih meritev ravni hrupa pomembno merilo pri izboru boljšega pooblaščenca, in ne samo cena.

4 SKLEP

Negotovost kot merilo zanesljivosti se je uveljavila na vseh področjih, ki temeljijo na meroslovju in spremljanju kakovosti. V znatni meri se je razvila tudi na področju geodetskih meritev in meritev zvočne izolirnosti v gradbeni akustiki.

Nujnost analize negotovosti in njeno navajanje je na področju monitoringa okoljskega hrupa zahtevano v mednarodnih pravnih aktih, ki so delno že implementirani v nacionalni pravni red. Področje negotovosti z leti pridobiva veljavo, za kar je usklajenost nacionalnih zahtev in priporočil z mednarodnimi standardi neobhodna.

Nivo negotovosti na okoljskem hrupu je povezan s številnimi vplivnimi faktorji, ki so v medsebojni povezavi in vključujejo vremenske razmere, značilnosti instrumentarija, usposobljenost ter izkušnje izvajalca meritev.

Proračun negotovosti bi torej moral postati sestavni del vsakega izdanega poročila, v katerem je merilna negotovost pomemben faktor izboljšanja kakovosti poročil in s tem učinkovitega ukrepanja.

Rezultati imajo veliko uporabno vrednost k ozaveščanju strokovnjakov in raziskovalcev kot nujnosti in smiselnosti širše uporabe negotovosti v praksi.

5 ZAHVALA

Raziskovalni projekt (naslov projekta: Izdelava metodologije programa preizkušanja za preverjanje kakovosti obratovalnega monitoringa hrupa in izdelava strokovnih podlag za analiziranje poročil o izvajanju obratovalnega monitoringa hrupa; pogodba št. 2551-21-100408, aneks z dne 16. 12. 2021, 10. 3. 2021-30. 4. 2022), naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje. Raziskovalni program št. P2-0158 (Gradbene konstrukcije in gradbena fizika) je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

6 LITERATURA

CNOSSOS-EU, Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, Anfosso-Lédée, F., Paviotti, M.,

Kephalopoulos, S., Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU): to be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC, Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2788/32029>, 2012.

Craven, N. J., Kerry, G., A good practice guide on the sources and magnitude of uncertainty arising in the practical measurement of environmental noise, University of Salford, Waddington, DC, 2007.

Čubranić, N., Račun izjednačenja, učbenik, Tehnička knjiga Zagreb, 1958.

Dovjak, M., Kušec, A., Creating healthy and sustainable buildings: an assessment of health risk factors, Springer Open, Cham, 2019.

EN ISO, EN ISO 3095:2013, Acoustics. Railway applications. Measurement of noise emitted by rail bound vehicles, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2013.

Gomez, D. M. M., Jaramillo, A. M., Villegas, J. O., Analysis of the measurement uncertainty and its effects on noise mapping validations, Journal of Environmental Management, 266(15):110606, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110606>, 2020.

Hall, B. D., White, D. R. An introduction into measurement uncertainty, Digital Publisher: Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Digital metrology Lab: David Rodney White's Lab, New Zealand, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3872590>, 2020.

Hannah, L., Page, W., McLare, S., An introductory guide to uncertainty in acoustic measurements, New Zealand Acoustics, 30, 3, 6-25, 2003.

ILAC, About ILAC, International Organisation for Accreditation Bodies, <https://ilac.org/>, 2022.

ISO/IEC, ISO/IEC Vodilo 98-3:2008, Merilna negotovost – 3. del: Vodilo za izražanje merilne negotovosti (GUM:1995), International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2008.

ISO/IEC, ISO/IEC Vodilo 98-4:2012. Merilna negotovost – 4. del: Vloga merilne negotovosti pri ugotavljanju skladnosti, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2012.

ISO, ISO 9613-1:1993, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 1993.

ISO, ISO 389-1:2017, Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 1: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and supra-aural earphones, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2017.

JCGM, JCGM 100:2008 GUM 1995, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measure-

ment, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), International Standard ISO/IEC Guide 98:1995, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2008.

Koleša, T., Izračun merilne negotovosti za meritve kakovosti zraka, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za hidrologijo in stanje okolja, 2008.

Liepert, M., Mühlbacher, M., Möhler, U., Thomann, G., Schreckenberger D., Uncertainty of calculated noise levels and its influence on exposure response-relationship in the NORAH-project, 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem, 18 – 22 June 2017, Zurich, Switzerland, 2017.

Probst, W., Uncertainties in the prediction of environmental noise and in noise mapping, *Acoustics and Technuicks*, 24-39, 2005.

Randa, J., Uncertainty Analysis for Noise-Parameter Measurements, Conference on Precision Electromagnetic Measurements, June 8-13, Broomfield, CO, <https://doi.org/10.6028/nist.tn.1530>, 2008.

SA, OA15 – Smernice za poročanje na področju hrupa v okolju. Slovenska akreditacija, Ljubljana, Slovenija, 2017.

SA, OA10 - Smernice ILAC-G17:01/2021 za merilno negotovost pri preskušanju, Slovenska akreditacija, Ljubljana, Slovenija, 2021.

SIST EN ISO/IEC, SIST EN ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2017.

SIST EN ISO, SIST EN ISO 12999-1:2020 - Acoustics - Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics - Part 1: Sound insulation (ISO 12999-1:2020), Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2020.

SIST EN ISO, SIST EN ISO 12999-2:2021, Acoustics - Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics - Part 2: Sound absorption (ISO 12999-2:2021), Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2021.

SIST ISO, SIST ISO 1996-1:2016, Akustika - Opis, merjenje in ocena hrupa v okolju - 1. del: Osnovne veličine in ocenjevalni postopki, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2016.

SIST ISO, SIST ISO 1996-2:2017, Akustika - Opis, merjenje in ocena hrupa v okolju - 2. del: Določanje ravni hrupa v okolju, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2017.

SIST-V, SIST-V ISO/IEC Vodilo 99: 2012, Mednarodni slovar meroslovja – Osnovni in splošni koncepti ter z njimi povezani izrazi (VIM), Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, Slovenija, 2012.

UKAS, LAB 48 Edition 3 June 2020 Decision Rules and Statements of Conformity, United Kingdom Accreditation Service, https://www.ukas.com/wp-content/uploads/schedule_uploads/759162/LAB-48-Decision-Rules-and-Statements-of-Conformity.pdf, 2020.

UL ES, Direktiva Komisije (EU) 2015/996 z dne 19. maja 2015 o določitvi skupnih metod ocenjevanja hrupa v skladu z Direktivo 2002/49/ES Evropskega parlamenta in Sveta, 2015.

UL RS, Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti hrupu pri delu, Uradni list RS, št. 17/06 s spr., 2006.

UL RS, Pravilnik o prvem ocenjevanju in obratovalnem monitoringu za vire hrupa ter o pogojih za njegovo izvajanje, Uradni list RS, št. 105/08, 2008.

UL RS, Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju, Uradni list RS, št. 43/18 s spr., 2018.

UL RS, Pravilnik o obratovalnem monitoringu stanja podzemne vode, Uradni list RS, št. 13/21 s spr., 2021.

Vilela, M. J., Oluyemi, G. F., Decision-Making: Concepts, Principles, and Uncertainty. In: Value of Information and Flexibility. Petroleum Engineering. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-86989-2_1, 2022.