

Metrološko ovrednotenje merilnega sistema DEMOS

Anton Nino Bratina Novak, Gaber Begeš

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: an4630@student.uni-lj.si, gaber.beges@fe.uni-lj.si

Povzetek. V članku je predstavljeno metrološko ovrednotenje merilnega sistema DEMOS, ki je bil razvit za spremljanje okoljskih parametrov v notranjih in zunanjih mikrookoljih, predvsem v šolskih učilnicah. Sistem združuje napredne digitalne senzorje in mikrokontroler ESP32 ter omogoča meritve temperature, relativne vlažnosti, hrupa, CO₂, VOC, delcev PM in drugih onesnaževal. V sklopu raziskave je bila izvedena eksperimentalna primerjava temperaturnih in vlažnostnih senzorjev SEN55 in SCD40 v klimatski komori, hkrati sta bili ocenjeni njihova točnost in merilna negotovost. Rezultati kažejo, da SEN55 ponuja bolj stabilne in točne meritve temperature in vlažnosti kot SCD40, pri čemer skupna razširjena negotovost znaša 0,50 °C (SEN55) in 0,62 °C (SCD40) za temperaturo ter 4,0 % r. v. in 7,1 % r. v. za vlažnost. Dodatno je bilo analizirano merjenje hrupa, kjer sistem sicer ne dosega natančnosti profesionalnih fonometrov, vendar omogoča zaznavo relativnih sprememb v spektru govora. DEMOS je tako primerno orodje za spremljanje okoljskih pogojev, kjer sta pomembna prostorska porazdelitev in dolgoročno opazovanje.

Ključne besede: temperatura, vlaga, hrup, merilni sistem, okoljski parametri

Metrological evaluation of the DEMOS measurement system

This paper presents a metrological evaluation of the DEMOS measurement system, designed for monitoring indoor and outdoor environmental conditions, especially in classrooms. DEMOS integrates digital environmental sensors and an ESP32 microcontroller, measuring temperature, humidity, noise, CO₂, VOCs, PM, and other pollutants. Temperature and humidity were evaluated using SEN55 and SCD40 sensors in a climatic chamber, and results show that SEN55 performs better in both stability and accuracy. The expanded uncertainty for temperature is 0.50 °C for SEN55 and 0.62 °C for SCD40, while for humidity it is 4.0 % r.h. and 7.1 % r.h., respectively. Noise measurements revealed that although DEMOS cannot replace class 1 sound level meters, it provides reliable trend detection within the speech frequency range. The system is compact, scalable, and suitable for spatial environmental assessment and long-term monitoring, particularly where relative changes and spatial variability are more relevant than absolute precision.

1 UVOD

Sodobno bivanje in delo v zaprtem prostoru zahtevata temeljito poznavanje vpliva okoljskih parametrov na počutje in zdravje posameznikov. V ta namen smo v Laboratoriju za metrologijo in kakovost na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani razvili sistem DEMOS (Digital Environmental Measurement and Observation System), ki omogoča spremljanje različnih okoljskih parametrov v notranjih in zunanjih mikrookoljih. Sistem je bil prvotno zasnovan za uporabo

v šolskih učilnicah, kjer smo želeli raziskati vplive okoljskih pogojev na počutje učencev in učiteljev. DEMOS združuje tehnologijo digitalnih senzorjev, zmogljiv mikrokontroler ESP32 in komunikacijske protokole, kar omogoča učinkovito zbiranje, prenos in obdelavo podatkov v realnem času.

Merilni sistem DEMOS sestavlja več ločenih merilnih enot – običajno deset notranjih in ena zunanja. Vsaka od enot lahko zajame širok spekter podatkov, ki vključujejo osnovne okoljske parametre, kot so temperatura, relativna vlažnost, koncentracija ogljikovega dioksida (CO₂), raven hrupa, osvetljenost in koncentracija prašnih delcev. Vsi ti parametri so ključnega pomena pri spremljanju kakovosti notranjega okolja, saj neposredno vplivajo na zdravje, udobje in učinkovitost posameznikov v prostoru.

Poleg omenjenih parametrov DEMOS vključuje tudi senzorje za spremljanje koncentracije hlapnih organskih spojin (VOC), dušikovih oksidov (NO_x), ozona (O₃), žveplovega dioksida (SO₂) in ogljikovega monoksida (CO). Za specifične potrebe spremljanja zunanjega okolja so na voljo še dodatni senzorji, kot so piranometer za spremljanje sončnega sevanja, senzorji za zračni tlak in pospeškometri. Tako sistem omogoča obsežne meritve, ki so primerne za raznolike aplikacije, vse od raziskav v urbanih območjih do spremljanja okoljskih parametrov v kmetijstvu in naravnem okolju.

Sistem DEMOS temelji na digitalnih senzorjih, ki imajo že vgrajene analogno-digitalne pretvornike, kar omogoča kompaktno izvedbo sistema brez potrebe po kompleksnih podpornih elementih. Vse naprave so povezane prek mikrokontrolnika ESP32, ki omogoča

Prejet: 18. april, 2025

Odobren: 8. september, 2025



Avtorske pravice: © 2025
Creative Commons Attribution 4.0
International License

digitalno komunikacijo po protokolih I²C in SPI ter brezžično komunikacijo prek tehnologij Wi-Fi in Bluetooth. Tako je zagotovljena hitra in stabilna komunikacija med senzorji in centralno bazo podatkov. Vsaka merilna enota sistema DEMOS je avtonomna, saj omogoča napajanje prek Li-ion akumulatorjev, ki zagotavljajo približno 10 ur neprekinjenega delovanja, alternativno pa se lahko napaja prek priključka USB-C, kar omogoča tako polnjenje kot programsko nadgradnjo sistema. Zbrane podatke vsaka enota shrani na vgrajeno SD-kartico, poleg tega jih v realnem času pošilja na centralni strežnik, kjer se podatki zbirajo v obliki JSON in so takoj dostopni za nadaljnjo obdelavo in analizo.

Glavna prednost sistema DEMOS sta njegova prilagodljivost in skalabilnost. Sistem omogoča meritve na več merilnih točkah istočasno, kar zagotavlja boljše razumevanje mikroklimatskih razmer in njihovo spremenljivost v času in prostoru. Zaradi modularne zasnove je možno enote enostavno zamenjati ali nadgraditi glede na specifične potrebe posameznih raziskovalnih ali aplikativnih projektov.

Kljub številnim prednostim ima sistem tudi določene omejitve. Digitalni senzorji, uporabljeni v sistemu DEMOS, običajno ne dosežejo primerljive točnosti kot specializirane merilne naprave, vendar je njihova natančnost še vedno zadostna za večino aplikacij, kjer je pomembneje zaznati relativne spremembe in korelacije med različnimi parametri kot absolutno vrednost posamezne merjene količine.

V tem članku bomo posebno pozornost namenili ovrednotenju sistema DEMOS z vidika merilne točnosti, s poudarkom na meritvah temperature, relativne vlažnosti in ravni hrupa. Merilni sistem DEMOS je namreč pomembno orodje za podrobnejše raziskovanje vpliva okoljskih pogojev na zdravje in kakovost bivanja, zato je ključnega pomena, da njegovo merilno točnost in ponovljivost ovrednotimo na metrološko ustrezen način. Namen članka je tako predstaviti rezultate ovrednotenja.

2 OVREDNOTENJE MERJENJA TEMPERATURE IN VLAŽE

Temperatura in vlaga sta dve najbolj osnovni veličini za opisovanje okolja. Od njiju so odvisni rezultati preostalih okoljskih senzorjev [1, 2]. Predvsem temperatura pa vpliva tudi na merjenje vlage s senzorji, uporabljenimi v napravi DEMOS [3].

2.1 Izbira senzorja

Glede na standarde Ameriškega združenja inženirjev za ogrevanje je predvidena točnost merjenja temperature v prostoru 0,6 °C [4]. Za merjenje relativne vlage v prostoru pa je predviden interval merilne točnosti med 2 % in 4 % relativne vlage.

Ker so temperaturni senzorji in senzorji relativne vlage običajno vkomponirani v t. i. senzorska vozlišča za merjenje preostalih okoljskih parametrov, namenski senzor samo za temperaturo ali vlago v sistem DEMOS

ni vključen. Merjenje temperature in vlage je tako izvedeno s senzorskima sklopoma *SEN55* in *SCD40* ponudnika *Sensirion*. Opremljena sta tudi s senzorji za merjenje prašnih delcev (PM), hlapljivih organskih spojin (VOC) in nekaterih plinov (*SEN55*) ter ogljikovega dioksida (CO₂) v napravi *SCD40*.

2.2 Metrološko ovrednotenje senzorja temperature in vlage

Naprave sistema DEMOS smo glede temperature in vlage metrološko ovrednotili v klimatski komori *Vötsch VC 7100*. V klimatski komori so bile naprave DEMOS glede na višino komore postavljene na podporno mrežo približno v sredini. Pri postavitvi smo želeli pridobiti čim večjo medsebojno razdaljo naprav ter s tem zmanjšati medsebojni vpliv ter potencialno akumuliranje toplote zaradi lastnega segrevanja naprav. Postavitev prikazuje slika 1.

2.3 Ovrednotenje temperature

Temperaturno smo ovrednotili sistem v 7 točkah znotraj pričakovanega področja uporabe, in sicer od 5 °C do 35 °C s korakom 5 °C. Kot referenco smo uporabili termometer *Elpro 395070316* s prikazovalnikom *Omega DP95*. Termometer je bil umerjen kot indikacijski termometer, torej skupaj s prikazovalnikom. Korekcija v tem temperaturnem območju je 0,03 °C, merilna negotovost pa 0,02 °C.

Pri ovrednotenju senzorjev smo pričakovali, da bo treba izvesti korekcijo vsakega posameznega senzorja. Druga dva parametra, ki imata pomembno vlogo pri ovrednotenju senzorjev pa sta standardna deviacija v posamezni točki ter standardna deviacija napake senzorja med merilnimi točkami. Iz prvega dobimo informacijo o stabilnosti senzorja v merjeni točki, iz drugega pa lahko ocenimo, kako konstantno pristranskost lahko pričakujemo.



Slika 1: Postavitev sistema DEMOS v klimatsko komoro *Vötsch VC 7100*.

V tabeli 1 so predstavljeni rezultati ovrednotenja temperaturnih meritev za senzor *SEN55* in *SCD40* za vsako napravo merilnega sistema DEMOS. V tabeli 1 pomenijo *e* – napaka meritve, *s* –

standardni odklon meritev, s_d – standardni odklon napak med merilnimi točkami.

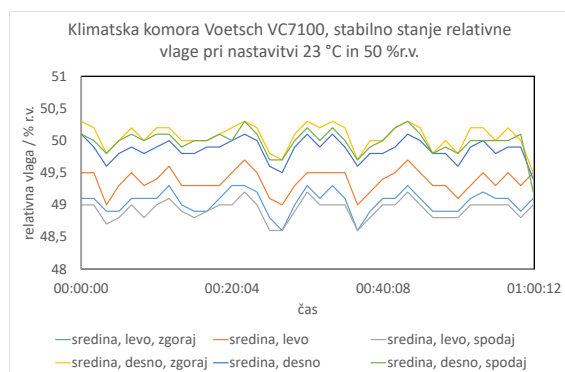
Tabela 1: Rezultati ovrednotenja senzorja SEN55 in SCD40.

Nap.	SEN55			SCD40		
	e	s	s_d	e	s	s_d
1	-0,48	0,01	0,15	3,84	0,06	0,14
2	-0,47	~	~	3,25	~	~
3	-0,51	0,01	0,05	3,16	0,14	0,27
4	-0,43	0,01	0,23	3,23	0,06	0,19
5	-1,15	0,01	0,31	2,49	0,09	0,07
6	-0,46	0,01	0,24	2,93	0,04	0,38
7	0,02	0,01	0,17	3,66	0,05	0,24
8	-0,12	0,01	0,23	3,43	0,05	0,14
9	-0,26	0,02	0,09	3,60	0,05	0,25
10	-0,57	0,02	0,26	3,25	0,06	0,30
11	-0,40	0,07	0,16	3,18	0,05	0,37

2.3.1 Komentar rezultatov

Iz rezultatov sledi, da imajo senzorji *SEN55* stabilnejše meritve od senzorjev *SCD40*, saj so standardne deviacije v povprečju za polovico manjše. Pri odklonu napak med merilnimi točkami je razlika manj opazna, vseeno pa senzor *SEN55* kaže boljše rezultate. Izstopa prav tako, da je standardni odklon meritev tudi do 10-krat manjši od standardnega odklona napak med merilnimi točkami. Ta del k merilni negotovosti tako prispeva bistveno več. Preračunana skupna negotovost senzorjev *SEN55* znaša 0,25 °C, za senzorje *SCD40* pa 0,31 °C. Kar v razširjeni negotovosti s faktorjem zaupanja 95 % pomeni 0,50 °C za *SEN55* in 0,62 °C za *SCD40*.

Iz tega sledi, da se senzorja približata pričakovani točnosti senzorjev temperature za potrebe okoljskega monitoringa v zaprtih prostorih, pri čemer je senzor *SEN55* tudi pri razširjeni negotovosti za 0,1 °C boljši od ciljnih točnosti. Sistem DEMOS je tako ustrezno orodje za merjenje temperature glede na namen uporabe.



Slika 2: Primer meritve homogenosti vlage v komori *Vötsch*.

2.4 Ovrednotenje vlage

Vlago smo ovrednotili pri 23 °C v 4 točkah, in sicer pri relativni vlagi 45 %, 55 %, 60 % in 70 %. Kot referenco smo uporabili merilno sondo AHLBORN FHA646-1 s prikazovalnikom AHLNORN Term 6280, ki je bila umerjena kot indikacijski inštrument (sonda skupaj s prikazovalnikom). Merilna negotovost merilnika znaša 1,7 %.

Ovrednotenje vlage je prav tako kot ovrednotenje temperature izvedeno na primerjalni način, pri čemer je treba upoštevati, da lahko uporabljena komora *Vötsch VC 7100* vzdrži raven vlage znotraj ± 1 % r. v. Slika 2 prikazuje meritve vlage v komori *Vötsch VC 7100*. Zelena črta predstavlja referenco, modra črta vrednosti senzorja *SEN55* ter oranžna črta vrednosti senzorja *SCD40*.

V tabeli 2 so predstavljeni rezultati meritev vlage s senzorjem *SEN55* in *SCD40* za vsako napravo merilnega sistema. V tabeli 2 pomenijo e – napaka meritve, s – standardni odklon meritev, s_d – standardni odklon napak med merilnimi točkami.

Tabela 2: Rezultati meritev za senzor *SEN55* in *SCD40* za vsako napravo.

Nap.	SEN55			SCD40		
	e	s	s_d	e	s	s_d
1	3,20	0,22	0,91	-10,64	0,14	2,18
2	3,87	0,22	0,95	-9,29	0,12	2,04
3	5,15	0,22	0,96	-8,14	0,11	1,85
4	4,71	0,21	1,02	-8,22	0,14	1,68
5	4,86	0,22	0,83	-7,47	0,13	1,63
6	3,15	0,22	1,02	-10,42	0,12	2,16
7	1,36	0,20	1,13	-10,32	0,12	1,98
8	2,66	0,20	1,28	-11,61	0,12	2,36
9	4,41	0,22	1,14	-10,76	0,12	2,35
10	2,73	0,20	1,31	-10,99	0,12	2,22
11	3,48	0,22	0,97	-11,25	0,14	2,10

2.4.1 Komentar rezultatov

Pri vlagi, kot navedeno že zgoraj, stabilnost komore vpliva na analizo. Izkaže se namreč, da je standardni odklon meritev senzorjev *SCD40* nižji od senzorjev *SEN55*, kar je ravno obratno kot pri temperaturi. To je povezano s stabilnostjo komore. Senzor *SCD40* ima počasnejši odziv, zato so njegove meritve pri nihajoči vlagi bolj stabilne. Pri meritvah vlage pa vseeno bolj izstopi razlika standardnih odklonov napake med merilnimi točkami. Izkaže se namreč, da imajo senzorji *SCD40* približno še enkrat višjo standardno deviacijo na tem področju.

Skupna negotovost senzorjev *SEN55* je 2,0 % r. v., za senzor *SCD40* pa 3,6 % r. v. To v razširjeni negotovosti s faktorjem zaupanja 95 % pomeni 4,0 % r. v. za senzor *SEN55* in 7,1 % r. v. za senzor *SDC40*.

S slednjimi negotovostmi sta senzorja znotraj želenih meja točnosti, vendar pa ob upoštevanju razširjene negotovosti senzor *SCD40* ne ustreza želenemu razredu točnosti. Kljub temu je sistem DEMOS za merjenje vlage v zaprtem prostoru ustrezen, saj so vse naprave opremljene tudi z merilnikom *SEN55*.

3 OVREDNOTENJE MERJENJA HRUPA

3.1 Uporabljen senzor

Senzor hrupa, umeščen v naprave DEMOS, je zgrajen iz elektret kondenzatorskega mikrofona (ECM) prek koaksialnega kabla, povezanega na avdio ploščico Teensy s 4.0 mikrokrmilnikom Teensy. Merilnik hrupa je v napravo nameščen, kot prikazuje slika 3. Avdio ploščica z mikrokrmilnikom je fiksno pritrjena na ohišje celotne naprave, mikrofona pa je vstavljen v odprtino na ohišju tako, da je membrana usmerjena v opazovani prostor. Slednja rešitev je cenovno ugodna in zaradi velikosti omogoča enostavno integracijo v dotični merilni sistem.



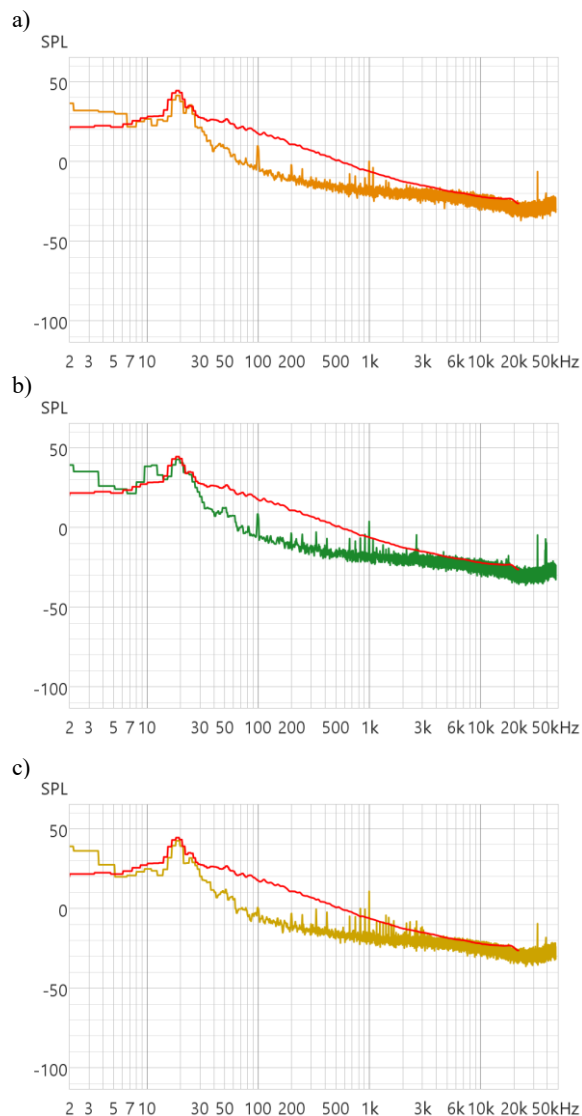
Slika 3: Umestitev merilnika hrupa v napravo DEMOS.

Kot referenca je bil uporabljen fonometer razreda 1 tip B&K 2230 z mikrofonom tip 4155. Fonometer je bil kalibriran z akustičnim kalibratorjem B&K tipa 4231. Za predvajanje in zajem testnih akustičnih signalov sta bila uporabljena zvočna kartica E-MU 0404 USB in zvočnik Genelec 8040A.

3.2 Narava akustičnih meritev

Na meritev glasnosti vpliva več dejavnikov, od okoljskih (temperatura, vlaga, zračni tlak) do prostorskih in tehnoloških. V slednje sodijo akustične lastnosti merjenega prostora, to so odmevi in absorpcija, tehnološki pa so lastni šum mikrofona, frekvenčni odziv ter hrup vezij in kvantizacija [5, 6, 7]. Slika 4 prikazuje generirani hrup in lastni šum merilne naprave DEMOS na razdalji 25 cm. Rdeča črta ponazarja lastni šum mikrofona sistema Teensy. Opazovanje hrupa smo

izvedli na tri načine. Slika 4a prikazuje šum, merjen stran od senzorja, slika 4b v smeri proti senzorju in slika 4c s spodnje strani. Rezultati kažejo, da bistvenih razlik glede na usmerjenost opazovanja ni.



Slika 4: Hrup, ki ga proizvaja merilni sistem DEMOS.

Za celotno metrološko ovrednotenje je bila iz sistema DEMOS uporabljena samo ena naprava. Pri meritvi generiranja lastnega hrupa naprave pa so izvedene meritve dveh naprav DEMOS za oceno primerljivosti, saj sem predvideval, da se slednja meritev lahko najbolj razlikuje zaradi akustičnih lastnosti ne popolnoma enakega ohišja.

3.3 Hrup, ki ga proizvaja sistem DEMOS

DEMOS je opremljen z vrsto senzorjev, med drugim s senzorjem prašnih delcev (PM), ki za svoje delovanje potrebuje ventilator. Sistem DEMOS za delovanje potrebuje tudi računalnik in Wi-Fi usmerjevalnik.

Predvsem računalnik, ki je opremljen z ventilatorjem, ravno tako proizvaja hrup.

Hrup, ki ga proizvaja sistem, je bil merjen na razdalji 25 cm od aktivne naprave. Merilni mikrofoni so ves čas ostali pri miru, razen pri meritvi s spodnje strani. Za preostale meritve je bila spremenjena orientacija naprave DEMOS. Rezultate prikazuje slika 4, in sicer v primerjavi z lastnim šumom mikrofona.

3.4 Lastni šum merilnika

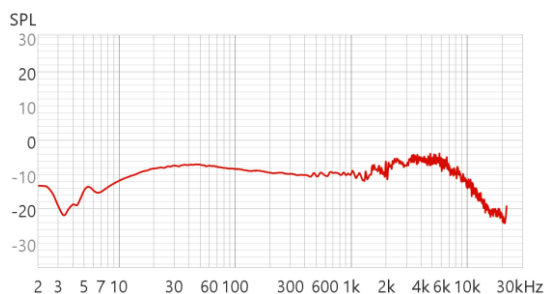
Lastni šum merilnika je meritev, zajeta v dveh delih. V prvem delu je določena referenčna raven, za kar je uporabljen zunanji akustični signal znane vrednosti. V tem primeru je bil uporabljen signal 1 kHz, pri SPL 85 dB, merjenih z referenčnim merilnikom. Ta signal zajamemo z merjenim inštrumentom – Teensy (slika 4), nato s sistemom zajemamo 'tišino'. Zajeti signal je najboljši približek lastnega šuma, ki ga lahko zajamemo. Rezultati so prikazani v tabeli 3. V prvi koloni je frekvenčno uteževanje Z, A, C. V drugi koloni pa so predstavljene izmerjene vrednosti, na katere najbolj vpliva hrup ventilatorja senzorja prašnih delcev. Na osnovi rezultatov lahko zaključimo, da je prispevek lastnega šuma DEMOS merilnega sistema 30 dB(A) na razdalji 25 cm, kar je tipično za cenejše fonometre.

Tabela 3: Vrednosti lastnega šuma z različnimi otežitvami.

Frekvenčno uteževanje	Vrednost RMS
Z (območje 22 Hz do 22 kHz)	42,4 dB
A	26,4 dB (A)
C	43,5 dB (C)

3.5 Frekvenčna karakteristika naprave DEMOS

Frekvenčna karakteristika je pridobljena s primerjavo zajema frekvenčnega preleta referenčnega mikrofona in merjene naprave. To je prikazano na sliki 5.



Slika 5: Frekvenčna karakteristika sistema Teensy.

V območju med 20 Hz in 1 kHz je nelinearnost karakteristike pod 4 dB. V območju nad 1 kHz prihaja do lastnih resonanc zaradi načina pritrditve mikrofona v ohišje, pri frekvencah nad 6 kHz pa sistem duši zvok za

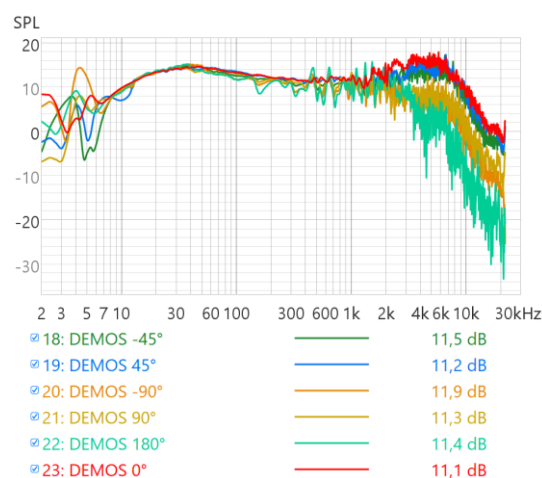
20 dB/dek (zaradi mikrofona). Tudi pri nizkih frekvencah je signal zaduščen. Zaradi hrupa v gluhi sobi pri nizkih frekvencah (< 30 Hz) so preostali artefakti pri nizkih frekvencah posledica naključnih pojavov.

Nelinearnost frekvenčnega odziva je odvisna tudi od postavitve oziroma orientacije sistema DEMOS. To se vidi na sliki 6. Bolj je sistem usmerjen stran od vira zvoka, močnejše se opazi vpliv resonanc in antiresonanc pri višjih frekvencah. Ko je sistem obrnjen za 180°, je izrazita tudi motnja v obliki stopnice pri frekvencah od 4 do 7 kHz.

Poleg popačitve frekvenčne karakteristike je opazno zmanjšanje občutljivosti glede na orientacijo. Slednja se v območju od 8 Hz do 1 kHz giba znotraj 5 dB, pri višjih frekvencah pa se razlikuje tudi za več kot 20 dB.

3.6 Komentar

Izkaže se, da je merilni sistem DEMOS bistveno slabši od profesionalnih merilnih inštrumentov za merjenje hrupa, a ima glede na namen uporabe vseeno nekaj dobrih lastnosti. Najbolj izstopa nizek lastni šum mikrofona, ki bi po standardu IEC 61672 napravo DEMOS umestil v merilnik *class 2*. Slabost pa je zagotovo ozko frekvenčno področje, kjer lahko pričakujemo približno raven odziv; ta je zgolj od 20 Hz do nekje 2 kHz. V praksi to pomeni, da velikega dela hrupa ne zajame primerljivo glede na druge glasove. Poki, ropot, bobnenje in piskanje imajo veliko komponent bodisi pri nizkih bodisi pri visokih frekvencah, ki so s tem sistemom slabo pokrite. Dobro pa zazna hrup v spektru govora. Tudi dinamično območje amplitude je majhno, morda za potrebe celo nekoliko premajhno, saj mikrofoni nelinearno popači signale nad 90 dB (SPL). Merilnik pa je takim vrednostim vseeno lahko izpostavljen; pri meritvah med študijskim procesom je sistem namreč že zaznal vrednosti nad 80 dB. Pri tem je treba upoštevati, da je slednji vrh zgolj povprečje hrupa v 10 sekundah.



Slika 6: Frekvenčna karakteristika sistema Teensy. Kot 0° predstavlja usmerjenost mikrofona neposredno proti zvočniku, preostali koti sledijo pravilom azimuta.

Merilnik se dobro vključuje v sistem DEMOS, kar omogoča kompaktno rešitev, a ima pomanjkljivosti z vidika lastnega povzročanja hrupa. Izkaže se, da je, merjeno na razdalji 25 cm od ohišja, večina komponent hrupa, ki ga proizvaja sistem, nižjih od praga lastnega šuma naprave. Glede na to lahko zaključimo predvsem, da naprava verjetno ne zazna hrupa, ki ga proizvaja sosednja naprava. Vseeno pa slednji vidik še zdaleč ni zanemarljiv, saj je skupni prispevek lastnega šuma, ki ga meri naprava, kar 48 dB (RMS). Prazne učilnice morajo po ameriškem standardu ANSI dosegati vrednosti SPL, nižje od 35 dBA [7]. Pri sistemu DEMOS pa lahko torej zaznamo amplitude, ki so trikrat višje od dovoljenih.

4 ZAKLJUČEK

Metrološka analiza merilnega sistema DEMOS je pokazala, da ta kljub uporabi cenovno dostopnih senzorjev omogoča dovolj natančne meritve za spremljanje okoljskih pogojev v zaprtih prostorih. Senzor SEN55 se je tako pri meritvah temperature kot relativne vlažnosti izkazal kot stabilnejši in natančnejši v primerjavi s SCD40. Pri meritvah hrupa sistem sicer ne dosega zahtev profesionalnih fonometrov, a omogoča zaznavanje trendov in razlik v spektru človeškega govora. Skupna ocena kaže, da je DEMOS primerno orodje za uporabo v raziskavah notranje klime, kjer je ključna dolgoročna primerjalna analiza na več lokacijah hkrati. Poleg tega je sistem zaradi modularnosti, brezžične komunikacije in avtonomnega delovanja še zlasti uporaben za pedagoške, raziskovalne in aplikativne namene, predvsem v izobraževalnem okolju.

ZAHVALA

Razvita in ovrednotena naprava je del projekta, ki ga sofinancirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport, ter Evropska Unija – NextGenerationEU.

REFERENCES

- [1] Mei Han, Wei Peng, Ghadikolaei Meisam Ahmadi, Gali Nirmal Kumar, Wang Ya, Ning Zhi, "Impact and Optimization of Calibration Conditions for Air Quality Sensors in the Long-term Field Monitoring", *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, v pregledu, 2024. Dostopno na: <https://amt.copernicus.org/preprints/amt-2024-130/> (9.4.2025)
- [2] Geršak G., Bojkovski J., Batagelj V., Hudoklin D., Begeš G., Pušnik I., Drnovšek J., "On-Site Environmental Conditions—Do They Really Affect the Measuring Accuracy?", *Journal of Testing and Evaluation*, 36(6), str. 554–558, 2008. Dostopno na: <https://doi.org/10.1520/JTE101866> (9.4.2025)
- [3] Sensirion AG, "SCD4x Data Sheet", *Sensirion AG*, v1.6, str. 1–30, 2024. Dostopno na: https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/66E05452/C_D_DS_SCD4x_Datasheet_D1.pdf (9.4.2025)
- [4] C. Giraldo-Soto, L. Mora, A. Erkoreka, I. Uriarte in P. Eguia, "Overall uncertainty analysis of zonal indoor air temperature measurement in an inuse office building," *Building and Environment*, str. 109123, 2022.

- [5] Jie Z., Wang D., Yang R., Zhu W., "Accuracy Improvement for Optical Free-Field Acoustic Pressure Measurements by Photon Correlation Based on Microscopic Imaging", *Optical Engineering*, 61(1), str. 1–14, 2022. doi: 10.1117/1.OE.61.1.014105
- [6] Radosz J., "Uncertainty Due to Instrumentation for Sound Pressure Level Measurements in High Frequency Range", *Noise Control Engineering Journal*, 62(3), str. 200–206, 2014. doi: 10.3397/1/376219
- [7] Nevrela M., Weisz M., Szweda J., Vašina M., "Removing Additive Noise in Measurements of Low Sound Pressure Levels", *MM Science Journal*, 2020(10), str. 56–63, 2020. doi: 10.17973/MMSJ.2020_10_2020044
- [8] Schim A., "ANSI/ASA S12.60/Part 1-2010 (R2020): Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools", *ANSI Blog*, 24. oktober 2023. Dostopno na: <https://blog.ansi.org/ansi-asa-s12-60-part-1-2010-r2020-school-acoustics> (9.4.2025)

Anton Nino Bratina Novak je leta 2025 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno opravlja delo mladega raziskovalca v Laboratoriju za metrologijo in kakovost, kjer se ukvarja z razvojem in ovrednotenjem okoljskih merilnikov. Svoje znanje je izpopolnjeval na nacionalnem meroslovnem inštitutu VSL na Nizozemskem.

Gaber Begeš je leta 2009 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Deluje na področju merjenja in tehniške kakovosti. V okviru raziskovalnega dela v laboratoriju se ukvarja z avtomatizacijo merilnih procesov, implementacijo sistemov kakovosti v realno življenje in s preskušanjem varnosti električnih proizvodov ter sodeluje pri vzdrževanju akreditacije na področju preskušanja in kalibracijske dejavnosti v Laboratoriju za metrologijo in kakovost na Fakulteti za elektrotehniko. Aktiven je pri medlaboratorijskih primerjavah na različnih področjih. Pomemben del raziskovalnega dela posveča okoljskim merilnikom v smislu ovrednotenja točnosti in merilne negotovosti.