

Izbira zvočnika za meritve v tlačnem polju

Samo Beguš¹, Saba Battelino²

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Ljubljana; Univerzitetni klinični center, Klinika za otorinolaringologijo
in cervikofacialno kirurgijo, Ljubljana, Slovenija
E-pošta: samo.begus@fe.uni-lj.si

Loudspeaker for pressure field measurements

Abstract. Objective hearing measurements include measurement of otoacoustic emissions (OAE). They were discovered by David Kemp in 1987 and are formed as a by-product of the activity of the external sensory cells of the organ of Corti. Evoked otoacoustic emissions can be detected in babies, toddlers and adults, by which a good functioning of the external auditory cells and part of the central auditory pathway can be confirmed. A variety of equipment is available for clinical and screening testing. During the development of a new measuring equipment for screening testing with Transient Evoked Otoacoustic Emissions (TEOAE), an acoustic system that can generate acoustic signals in the pressure field was needed in the frequency range from 100 Hz to 5 kHz. However, it must not have a loudspeaker that is based on the electrodynamic principle and must allow the reproduction of pure tones with an adjustable sound pressure level and multitone acoustic signals. In the article a suitable system is presented and evaluated.

1 Uvod

Med objektivne meritve sluha spada meritev zvočnega sevanja ušesa (OAE, Otoacoustic emissions) [1]. Zvočno sevanje ušesa je odkril David Kemp v letu 1987 [2]. Nastane kot stranski produkt aktivnosti zunanjih čutnic Cortijevega organa. Pojavi se lahko spontano ali po draženju. Izzvano zvočno sevanje ušesa se lahko zazna pri dojenčkih, malčkih in odraslih, kar potrjuje le dobro delovanje zunanjih slušnih celic in dela centralne slušne poti. Za klinično in presejalno testiranje je na voljo različna oprema. Pri razvoju nove merilne opreme za presejalno testiranje s prehodnim zvočnim sevanjem ušesa (TEOAE, Transient Evoked Otoacoustic Emissions) smo potrebovali akustični sistem, ki lahko predvaja akustične signale v tlačnem polju, za območje frekvenc od 100 Hz do 5 kHz, vendar ne sme imeti zvočnika, ki deluje na elektrodinamičnem principu in omogoča predvajanje čistih tonov z nastavljivo ravno zvočnega tlaka in tudi večtonske akustične signale.

2 Akustični kalibratorji

Akustični kalibrator, kot npr. Brüel&Kjær tip 4231 [3] deluje le pri frekvenci 1 kHz, ima možnost nastavitve ravni zvočnega tlaka 94 dB ali 114 dB. Vgrajen ima elektrodinamični pretvornik.



Slika 1. Akustični kalibrator tip 4231 (levo) in tip 4226 (desno) [3, 4].

Boljša izbira bi bil lahko Brüel&Kjær tip 4226 [4], kateri sicer omogoča priklop zunanega signala, vendar je amplitudno območje omejeno na 94 dB, 104 dB ali 114 dB. Prav tako ima lahko kalibrator elektrodinamični pretvornik, ki pa ni primeren za našo aplikacijo. Na sliki 1 sta prikazana oba kalibratorja.

Nizkofrekvenčni kalibrator GRAS 42AE pokriva le frekvenčno območje do 250 Hz [5].

Tudi drugi akustični kalibratorji omogočajo le standardne ravni zvočnega tlaka 94 dB in 114 dB pri frekvenci 1 kHz [6, 7, 8].

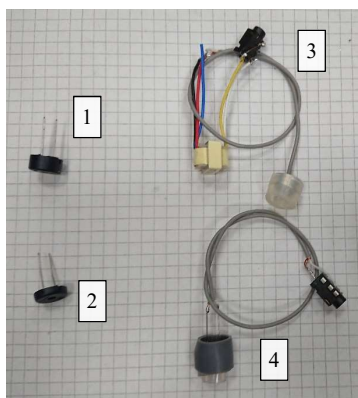
Ker komercialno dobavljivi sistemi ne izpolnjujejo zahtev smo se odločili, da pripravimo enostaven akustični vir, primeren za predvajanje akustičnih signalov v območju frekvenc od 100 Hz do 5 kHz, z zvočnikom, ki ne deluje na elektrodinamičnem principu in omogoča predvajanje čistih tonov z nastavljivo ravno zvočnega tlaka in večtonske akustične signale.

3 Izbira zvočnika

Ker zaradi generiranja magnetnega polja med delovanjem elektrodinamičnega zvočnika, le tega ne moremo uporabiti za testiranje merilne opreme za presejalno testiranje s TEOAE, moramo uporabiti drugačne principe delovanja zvočnikov: piezoelektrični, elektrostatični, optoakustični, zvočniki s plazmo, idr. Od omenjenih načinov sta praktično uporabna piezoelektrični in elektrostatični princip. Piezoelektrični zvočniki so na voljo od raznih t.i. 'piskačev' oz. signalnih zvočnikov z ali brez vgrajenega oscilatorja. Pričakujemo pa lahko omejen in nelinearen frekvenčni odziv, predvsem v nizkofrekvenčnem območju. Zvočniki z elektrostatičnim načinom delovanja, npr. komercialna izvedba [9] je namenjen generiranju ultrazvoka, proizvajalec podaja frekvenčni odziv za tlačno polje od 1 kHz do 100 kHz.

Ker želimo sestaviti sistem z akustičnim sklopnikom, kjer je na eni strani zvočnik, na drugi pa mikrofonski sistem, katerim izmerimo odziv zvočnika, kasneje pa namesto tega mikrofona namestimo merilni sistem za detekcijo TEOAE želimo imeti zvočnik s premerom 5 mm do 10 mm.

Po pregledu dobavljenih piezoelektričnih zvočnikov smo se odločili za piezoelektrične pretvornike [10, 11, 12] in elektret kondenzatorski mikrofonski sistem [13] v funkciji elektrostatičnega zvočnika.

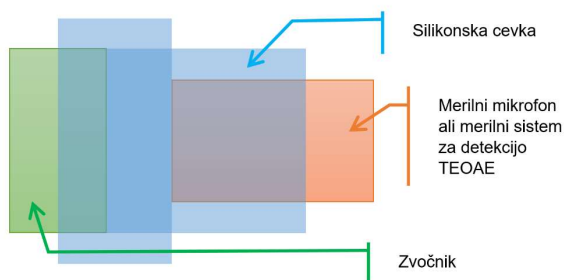


Slika 2. Fotografije zvočnikov.

Na sliki 2 so fotografije zvočnikov: Murata PS1440P02BT z oznako 1, PS1240P02BT z oznako 2, 400ER080-S z oznako 4 in elektret kondenzatorski mikrofonski sistem z oznako 3.

4 Akustični sklopnik

Akustični sklopnik sestavljajo zvočnik in silikonske cevke, s katerimi se prilagodi premer in zagotovi tesnenje. Pomanjkljivo tesnenje zmanjša amplitudni odziv sistema pri nizkih frekvencah.



Slika 3. Skica akustičnega sklopnika.

Na sliki 3 je prikazana skica in zgradba akustičnega sklopnika. V dve silikonski cevki, ki sta vstavljena ena v drugo za prilagoditev različnih premerov, je iz ene strani vstavljen zvočnik (piezoelektrični ali elektrostatični) in z druge strani merilni mikrofonski sistem za detekcijo TEOAE.

Notranji premer notranje cevke je 6 mm, dolžina akustičnega sklopnika med zvočnikom in merilnim mikrofonom je 5 mm, prostornina sklopnika je 0,04 cm³.

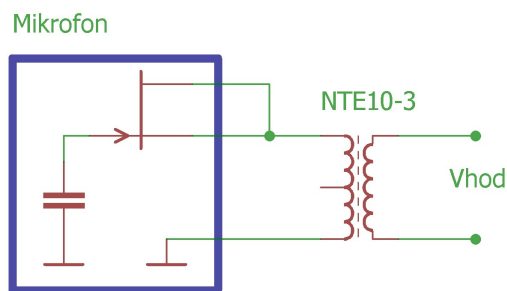
Fotografija sklopnika z elektrostatičnim zvočnikom in merilnim mikrofonom Brüel&Kjær tip 4135 je na sliki 4.



Slika 4. Fotografija akustičnega sklopnika z elektrostatičnim zvočnikom in merilnim mikrofonom B&K tip 4135.

5 Električna priključitev

Vse piezoelektrične zvočnike priključimo neposredno na izhod zvočne kartice (v našem primeru RME Babyface Pro [14]), namenjen priklopu slušalk. Uporabi se lahko visokoohmski ali nizkoohmski izhod na zvočni kartici, upoštevati je potrebno le razliko 6 dB v izhodni napetosti med obema izhodoma.



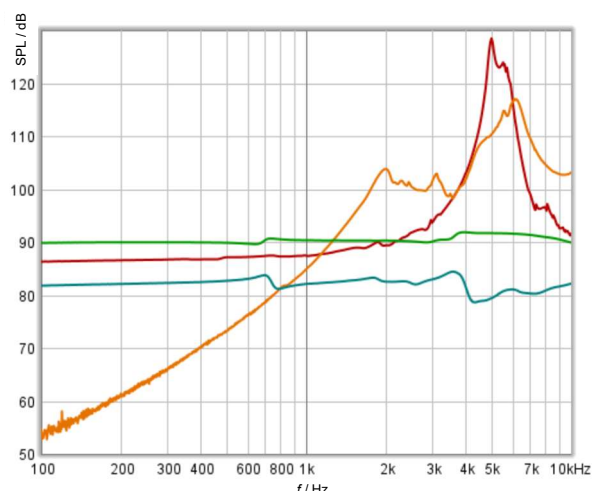
Slika 5. Shema priključitve elektret kondenzatorskega mikrofona EM173 kot zvočnika.

Priključitev elektrostatičnega zvočnika je prikazana na sliki 5. Kot elektroakustični pretvornik je uporabljen elektret kondenzatorski mikrofonski sistem EM173 [13] s transformatorjem NTE10-3, z razmerjem števila ovojev primerne in sekundarne navitja 1:10, za povečanje napetosti iz zvočne kartice. Zaradi vgrajenega JFET ojačevalnika je harmonsko popačenje odvisno od amplitude električnega signala za vzbujanje. Pri nizkih amplitudah (ko dioda med vrati in virom ne prevaja) imajo harmonske komponente amplitudo nižjo od 40 dBc.

6 Primerjava zvočnikov, meritve

Primerjava frekvenčnega odziva vseh štirih predlaganih zvočnikov je prikazana na sliki 6. Meritve so izvedene z uporabo merilnega mikrofona Brüel&Kjær tip 4135 z predojačevalnikom Brüel&Kjær tip 2669. Izhod predojačevalnika je priključen na visokoimpedančni vhod zvočne kartice. Piezoelektrični zvočniki so priključeni neposredno na izhod zvočne kartice oziroma

v primeru elektrostatičnega zvočnika preko transformatorja.

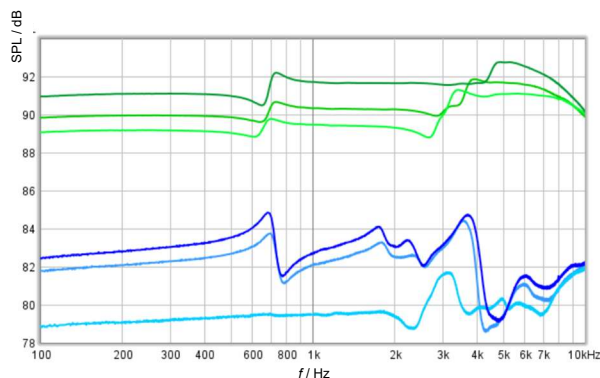


Slika 6. Primerjava frekvenčnih odzivov zvočnikov v akustičnem sklopniku. PS1440P02BT, PS1240P02BT, 400ER080-S, elektrostatični.

Iz primerjave lahko zaključimo, da sta najbolj primerna elektrostatični zvočnik in 400ER080-S, v kovinskem ohišju, saj imata najbolj linearni frekvenčni odziv.

Pri izbiri je tudi pomembno kakšna je ponovljivost frekvenčnega odziva pri premikanju mikrofona in s tem spreminjanju prostornine akustičnega sklopnika. Slika 7 prikazuje primerjavo frekvenčnih odzivov zvočnikov v akustičnem sklopniku pri spreminjanju pozicije za ± 1 mm od srednje vrednosti (5 mm). Zgornji trije grafi prikazujejo odzive za elektrostatični zvočnik, spodnji pa za piezoelektričnega.

Opazimo lahko, da se po pričakovanju, pri povečanju razdalje raven zvočnega tlaka zniža in pri zmanjšanju razdalje poveša. Večje razlike so pri piezoelektričnem zvočniku, domnevno zaradi oblike ohišja.

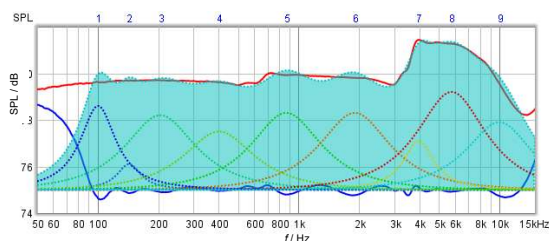


Slika 7. Primerjava frekvenčnih odzivov zvočnikov v akustičnem sklopniku pri spreminjanju pozicije. Podrobnosti v besedilu.

Ker želimo generirati večtonske signale, je pomembno kolikšno intermodulacijsko (IMD) popačenje je prisotno pri generiranih signalih. Predvidena raven posameznega tona pri testnih signalih je nizka, od 30 dB SPL do 50 dB SPL.

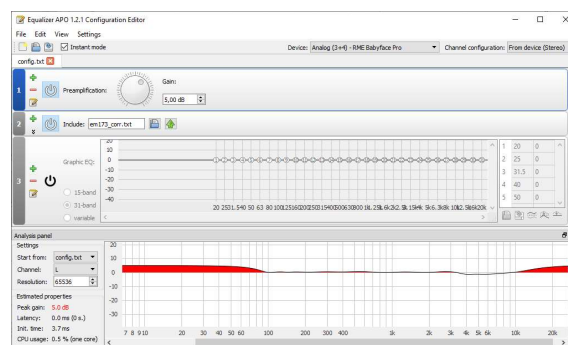
7 Meritve s korekcijo frekvenčnega odziva

Če želimo še manjša odstopanja frekvenčne karakteristike lahko frekvenčni odziv korigiramo z dodatnimi filtri. Za izračun filtrov smo uporabili prosto dostopni program REW [14] s katerim smo tudi merili frekvenčne odzive. Primer za elektrostatični zvočnik je prikazan na sliki 8.



Slika 8. Izračun korekcijskih filtrov za elektrostatični zvočnik. Odziv zvočnika (rdeča), pričakovan korigiran odziv (modro), posamezni filtri so označeni s prekinjeno črto.

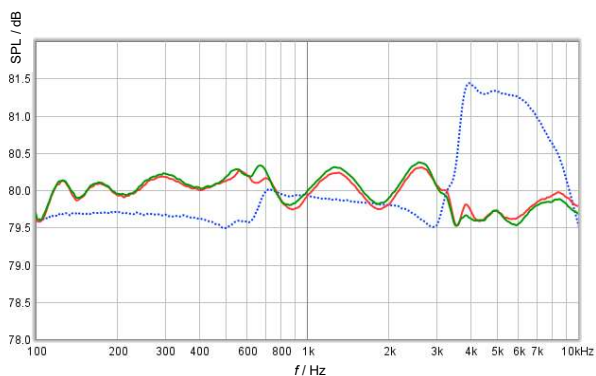
Za filtriranje predvajanih signalov smo uporabili prosto dostopni parametrični izenačevalnik, program Equalizer APO [16]. Slika 9 prikazuje njegov vmesnik z aktivnimi filtri.



Slika 9. Grafični izenačevalnik z aktivnimi filtri za korekcijo frekvenčnega odziva elektrostatičnega zvočnika.

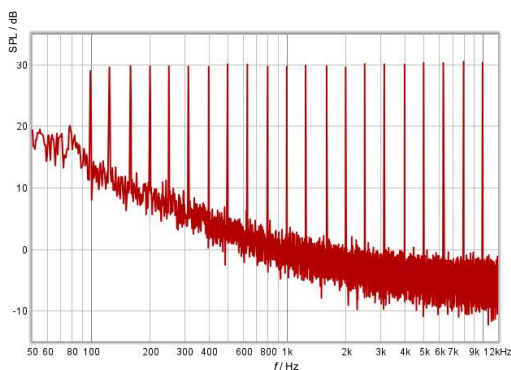
Program deluje kot 'Audio Processing Object (APO)', objekt za obdelavo avdio signalov in uporablja infrastrukturo sistemskih zvočnih učinkov, uvedenih z operacijskim sistemom Windows Vista. Uporaba z ASIO gonilniki ni mogoča. S tem se pojavi težava, saj program REW z gonilniki Java omogoča le 16 bitni zajem signalov in s tem slabšo ločljivost in dvig šumnega praga analiziranih signalov. Težavo se enostavno reši tako, da se požene dve instanci programa REW: prva služi za predvajanje testnih signalov in deluje z Java gonilniki, druga instanca, za obdelavo in zajem signalov, pa deluje z ASIO gonilniki in omogoča ločljivost zvočne kartice.

Frekvenčni odziv elektrostatičnega zvočnika in frekvenčno korigiran odziv so prikazani na sliki 10. Meritev korigiranega odziva je bila izvedena dvakrat, s ponovno vstavitvijo merilnega mikrofona (Brüel&Kjær tip 4135) v akustični sklopnik. Odstopanja od idealne frekvenčne karakteristike so manjša od $\pm 0,5$ dB.



Slika 10. Frekvenčni odziv elektrostatičnega zvočnika (modra, črtkana črta) Frekvenčno korigiran odziv, rdeča in zelena polna črta.

Pri razvoju nove merilne opreme za presejalno testiranje s prehodnim zvočnim sevanjem ušesa bo potrebno generirati večtonske signale.



Slika 11. Večtonski signal v frekvenčnem območju od 100 Hz do 10 kHz z 1/3 oktavnim frekvenčnim korakom.

Primer na sliki 11 prikazuje večtonski signal v frekvenčnem območju od 100 Hz do 10 kHz z 1/3 oktavnim frekvenčnim korakom. Izmerjeno z mikrofonom Brüel&Kjær tip 4135. Signal bomo uporabili pri merjenju razmerja signal/šum mikrofona merilnega sistema za detekcijo TEOAE.

8 Zaključek

Na podlagi meritev in primerjav različnih piezoelektričnih zvočnikov in elektrostatičnega zvočnika smo ugotovili, da je najbolj primeren za uporabo v akustičnem sklopniku za testiranje nove merilne opreme za presejalno testiranje s TEOAE elektrostatični zvočnik. Uporabljen je elektret kondenzatorski mikrofoni, ki ima dosegljive priključke vira in ponora vgrajenega JFETA. S kompenzacijo frekvenčne odvisnosti smo dosegli valovitost manjšo od $\pm 0,5$ dB. Pozornost je potrebno nameniti pozicioniranju elementov v akustičnem sklopniku, saj se s premikom spremeni prostornina, s tem pa raven zvočnega tlaka in frekvenčna odvisnost. Pri ponovnem vstavljanju mikrofona je bilo odstopanje manjše od 0,25 dB. Ker je uporabljen elektret kondenzatorski mikrofoni z vgrajenim ojačevalnikom, je pri višjih amplitudah (več kot 120 mVrms na sponkah mikrofona) prisotno harmonsko popačenje akustičnega

signala zaradi diode med vrati in ponorom ojačevalnega JFETA. Pri meritvah frekvenčnega odziva to popačenje ni moteče, pri generiranju večtonskih signalov pa se nastavi amplitudo tako nizko, da so nelinearna popačenja zanemarljiva.

Literatura

- [1] Mateja Božič, Zgodnje odkrivanje in začetna obravnava otrok z izgubo sluha. V: Battelino, Saba (ur.). Avdiometrija, vestibulometrija in avdiološka elektroakustika v vsakdanji praksi: učbenik za tečajnike avdiometrije in vestibulometrije, avdiološke elektroakustike, logopede, študente splošne in dentalne medicine, specializante otorinolaringologije, klinične logopedije in nevrologije ter specializante medicine dela, prometa in športa. 2., nova in dopolnjena izd. Ljubljana, 2017.
- [2] Kemp, D. "Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system," J. Acoust. Soc. Am. 64, 1386–1391, 1978.
- [3] Sound Level Calibrator Type 4231 <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>
- [4] Multifunction Acoustic Calibrator Type 4226 <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/calibrators/4226>
- [5] GRAS 42AE Low Frequency Calibrator <https://www.grasacoustics.com/products/product/260-42AE>
- [6] Class I Acoustic Calibrator PCE-SC 09-ICA https://www.pce-instruments.com/eu/measuring-instruments/test-meters/calibrator-pce-instruments-class-i-acoustic-calibrator-pce-sc-09-ica-incl.-iso-calibration-certificate-det_5975874.htm?list=kat&listpos=4
- [7] SKC AcoustiCHEK Calibrator <https://www.skcin.com/products/acoustichek-class-1-with-built-in-barometer>
- [8] Cirrus Acoustic Calibrators <https://www.noiselevelmeter.com/products/acoustic-calibrators/>
- [9] TDT Electrostatic Speakers <https://www.tdt.com/docs/hardware/ec1-es1-electrostatic-speaker/>
- [10] Murata PS1440P02BT <https://www.murata.com>
- [11] Murata PS1240P02BT <https://www.murata.com>
- [12] Prowave 400ER080-S <http://www.prowave.com.tw/>
- [13] Elektret mikrofoni Primo EM173 <https://primomic.com/>
- [14] Zvočna kartica RME Babyface Pro <https://babyface.rme-audio.de/>
- [15] Room Acoustics Software, <http://www.roomeqwizard.com/>
- [16] Equalizer APO, <https://sourceforge.net/projects/equalizerapo/>