

Vaje za domov: elektroakustika

Samo Beguš

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: samo.begus@fe.uni-lj.si

Take-home lab exercises: electroacoustics

Abstract. *The fields of acoustics, ultrasound and electroacoustics have a long tradition and a wide field of application. Theoretical knowledge of acoustics and ultrasound is associated with practical problems in laboratory exercises with a hands-on approach. Laboratory exercises are regularly adapted and supplemented with new ones. In 2020 and 2021, due to the governmental measures it was necessary to conduct lectures entirely at a distance, as well as some laboratory exercises, or at least for a certain period of time. Equipment and adequate laboratories are required for the successful performance of laboratory exercises. Due to the mentioned limitations of implementation, it was necessary to prepare exercises in a short time that would allow at least some basic experiments in the field of acoustics, using equipment that a student can receive by mail at home and using basic equipment that students can already have, e.g. USB cables, headphones, speakers, etc.*

In the article, the hardware and software that enables the implementation of laboratory exercises at home will be described.

1 Uvod

Področja akustike, ultrazvoka in elektroakustike imajo dolgo tradicijo in široko področje uporabe [1]. Študentom Fakultete za elektrotehniko so najbližje tematike s področij zabavne elektronike: ozvočenja, sistemi za snemanje in reprodukcijo zvoka, prenosni predvajalniki, izgubno in brezizgubno stiskanje posnetkov, računalniške igre itd. Pomembna področja, kot npr. zaščita pred hrupom, uporaba zvoka in ultrazvoka v medicini, industriji, pri raziskavah, implementacija zakonodaje v Evropski uniji, na področju varnosti, zagotavljanje kakovosti, merilne metode in druga pa so zastopana v manjši meri. Poleg teh, pa se odpirajo tudi druga, manj poznana področja uporabe, kot na primer uporaba zvoka pri gašenju ognja [2, 3]. Teoretična znanja akustike in ultrazvoka so pri laboratorijskih vajah s pristopom hands-on povezana s praktičnimi problemi [1]. Laboratorijske vaje se prilagajajo in dopolnjujejo z novimi [4, 5, 6].

V letu 2020 in 2021 je bilo potrebno zaradi ukrepov [7, 8] izvajati predavanja v celoti na daljavo, prav tako nekatere laboratorijske vaje, ali vsaj v določenem obdobju. Za uspešno izvajanje laboratorijskih vaj pri 'akustičnih predmetih' je potrebna oprema in ustrezen prostor. Zaradi omenjenih omejitev izvajanja je bilo

potrebno v kratkem času pripraviti vaje, ki bi omogočale vsaj nekaj osnovnih eksperimentov s področja akustike, ob uporabi opreme, katero lahko študent prejme po pošti na dom in ob uporabi osnovne opreme, katero imajo študenti lahko že doma, npr. USB kabli, slušalke, zvočniki, ipd.

V nadaljevanju prispevka bo opisana strojna in programska oprema, ki omogoča izvedbo laboratorijskih vaj doma.

2 Vaje za domov

Vaje v obliki, kot se običajno izvajajo na fakulteti, ni mogoče enostavno prilagoditi v obliko, ki bi bila primerna za izvedbo doma, saj zahteva priprava bolj poglobljeno analizo in percepcijo s strani študenta kot izvedba pod nadzorom v laboratoriju. 'Prva pomoč' pri izvedbi na daljavo, so video posnetki izvedbe laboratorijskih vaj z priloženimi rezultati meritev [9, 10], ki pa ne morejo nadomestiti praktične izvedbe v živo.

Tudi vseh vaj ni mogoče prilagoditi, zato je bilo izbrano le nekaj vaj, ki pa z enostavno strojno in programsko opremo omogočajo pridobiti vsaj nekaj praktičnih izkušenj.

3 Strojna in programska oprema

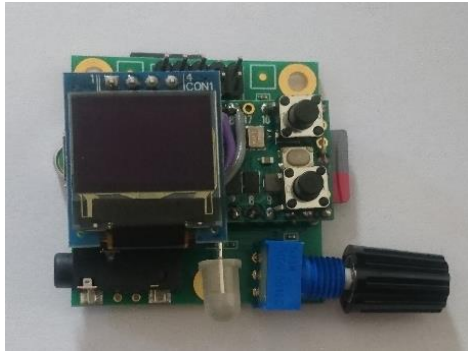
Kriteriji pri izbiri platforme, primerne za pripravo vaj so bili:

- dobavljivost opreme
- stereo analogno - digitalni pretvornik
- stereo digitalno - analogni pretvornik
- integriran ojačevalnik za slušalke
- nizka cena
- enostavno programiranje
- integriran predojačevalnik za mikrofona
- podpora za delovanje kot zunanja USB zvočna kartica
- USB ali baterijsko napajanje
- prikazovalnik
- nekaj tipk

Izbira razvojnih ploščic je široka, z različnimi konfiguracijami, perifernimi enotami, z že vgrajenimi programatorji in razhroščevalniki [11 - 15].

Po pregledu izbora se je kot zelo primerna izbira izkazala Teensy razvojna ploščica [14, 16] z avdio vmesnikom [17]. Programski dodatek TeensyDuino [18] za programiranje temelji na okolju Arduino [19]. Veliko vlogo pri odločitvi je imela podpora programiranja 'avdio' dela programske kode v grafičnem načinu s pomočjo spletnega vmesnika [20]. Vmesnik temelji na

Node-RED grafičnem vmesniku [21]. Lahko deluje tudi v t.i. 'offline' načinu brez aktivne internetne povezave in je vključen v instalacijo programskega dodatka TeensyDuino. Poleg tega pa je podprt USB način za zunanjo avdio kartico, brez posebnih gonilnikov in povezava preko zaporednega vmesnika t.i. 'Virtual COM port'.

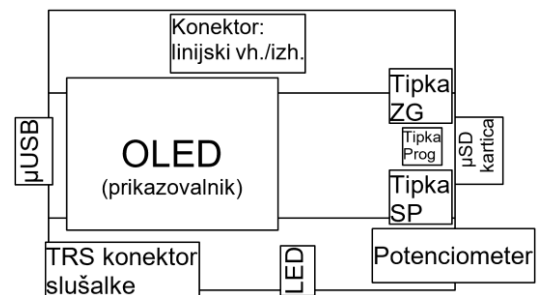


Slika 1. Procesorska ploščica s prikazovalnikom ter avdio vmesnikom.

Strojna oprema je tako sestavljena iz Teensy 4.0 ploščice, avdio vmesnika, enobarvnega miniaturnega grafičnega OLED prikazovalnika (64 x 48 slikovnih točk), večbarvne LED, elektret mikrofona, dveh dodatnih tipk in potenciometra. Poleg opisanega je v kompletu za vaje priložen še zvočnik, kostni vibratorni pretvornik [22], MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) mikrofona [23] na žici s konektorjem in konektor za slušalke z AC'97 kompatibilnim konektorjem, ki se priključi na linijski vhod in izhod avdio vmesnika [24, 17].

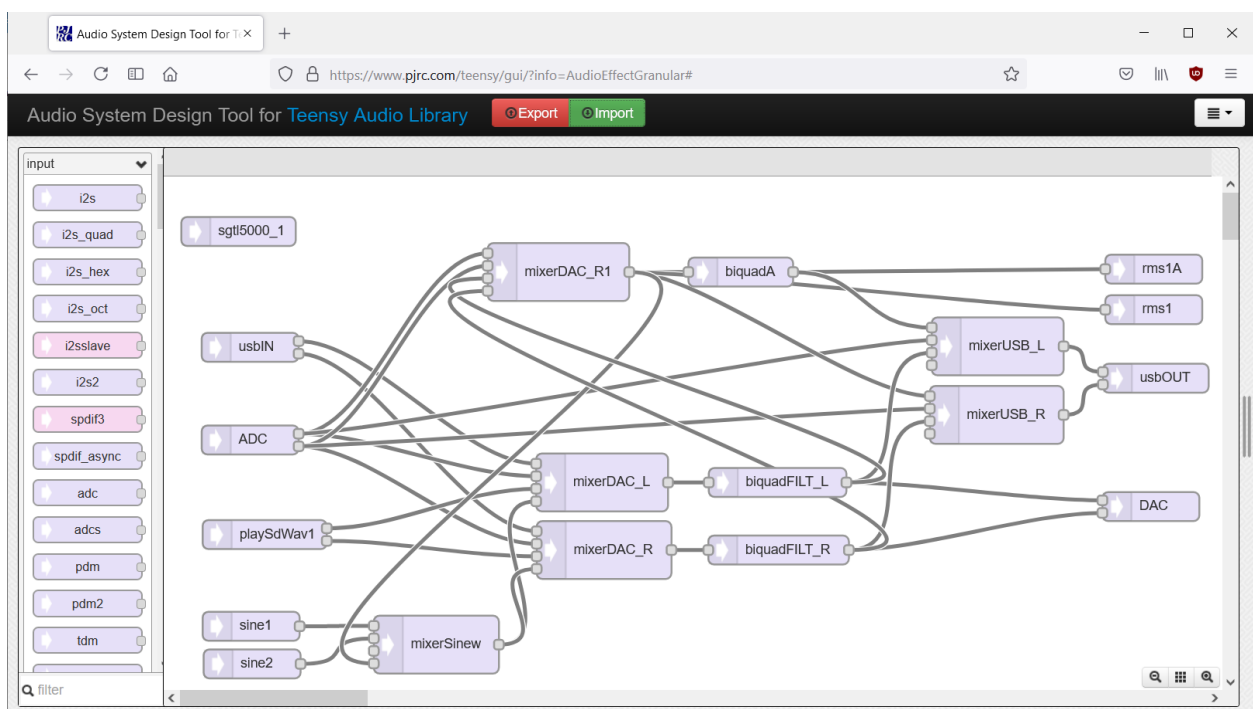
Podrobnejši opis sledi pri opisu posameznih vaj v nadaljevanju. Predstavljena oprema omogoča prikaz nekaj osnovnih akustičnih in elektroakustičnih nalog z različnimi nastavitvami.

Na sliki 1 je prikazana Teensy ploščica in avdio vmesnik z OLED prikazovalnikom, tipkama, konektorji in večbarvno LED. Slušalke se priključijo preko TRS (Tip Ring Sleeve) 3,5 mm konektorja. Poudariti je potrebno, da je skupna sponka na tem konektorju priključena na polovično napetost napajanja, to je 1,6 V, zato je potrebna pazljivost pri povezovanju naprav.



Slika 2. Shematski prikaz komponent na Teensy ploščici in avdio vmesniku.

Osnovni namen sistema je z enostavno in dostopno opremo omogočiti samostojni prikaz elektroakustičnih pojavov z in tudi brez uporabe osebnega računalnika. Novejši notesniki ne omogočajo zajema stereo avdio signalov brez uporabe zunanje zvočne kartice. Omenjeni sistem po priključitvi na osebni računalnik preko mikro USB konektorja deluje kot zunanja stereo zvočna kartica.



Slika 3. Potek in povezave avdio elementov v programu.

Shematski prikaz komponent je predstavljen na sliki 2. Tokovna poraba vmesnika je do 0,1 A, odvisno od nastavitvev, tako da je napajanje mogoče z USB 5 V napajalniki ali baterijskim napajanjem (USB prenosna baterija - PowerBank).

Teensy 4.0 procesorska ploščica [16] je osnovana na ARM Cortex-M7 procesorju s frekvenco takta 600 MHz. Z dodatnim hlajenjem je možno taktno frekvenco povišati tudi celo preko 1 GHz. Visoka taktna frekvenca, strojna podpora računanju s plavajočo vejico, 1984 KB programskega in 1024 KB podatkovnega pomnilnika predstavlja dobro osnovo tudi za zahtevnejšo obdelavo avdio signalov.

Ob priključitvi na osebni računalnik se vmesnik prepozna kot zunanja 16 bit zvočna kartica s frekvenco vzorčenja 44,1 kHz. Poleg tega je aktiven tudi dvosmerni prenos podatkov preko virtualnega COM vmesnika s hitrostjo prenosa podatkov 115200 bit/s, brez paritete, 1 stop bit, 8 podatkovnih bitov. za prikaz obdelanih izmerjenih vrednosti (več v nadaljevanju).

Program je pisan v Arduino programskem okolju [19]. Po priključitvi napajanja ali po povezavi na osebni računalnik so aktivne nastavitve za prvo laboratorijsko vajo. Izbiro nastavitve oziroma laboratorijske vaje se lahko spremeni s hkratnim pritiskom zgornje (ZG) in spodnje (SP) tipke (vsaj za 1 s). Predvajanje avdio posnetka iz μ SD kartice se vključi avtomatsko ali s pritiskom na spodnjo tipko. Z zgornjo tipko se izbere trenutno aktiven parameter (vsaj za 0,5 s), nastavitve parametra se spreminja s spodnjo tipko (vsaj 0,5 s), amplitudo predvajanja se nastavi s potenciometrom, v spodnji vrstici prikazovalnika se izpisuje nastavljena vrednost amplitude. Frekvenco in kvaliteto filtra se nastavlja s pritiskom na spodnjo tipko in vrtenjem potenciometra.

Študentom so na voljo navodila z opisi vaj, primeri in kratko razlago delovanja [25].

4 Laboratorijske vaje

V nadaljevanju so na kratko predstavljene posamezne laboratorijske vaje.

4.1 Vaja 1 - Hrupometer

Na OLED prikazovalniku, slika 4, je prikazan nivo zvočnega tlaka brez in z A frekvenčno utežitvijo.



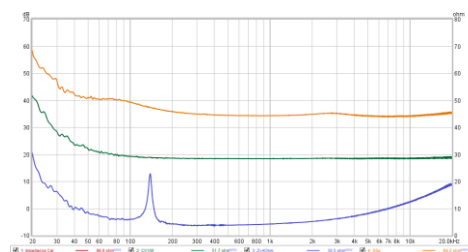
Slika 4. Priključen MEMS mikrofonski preko linijskega vhoda na avdio vmesniku v načinu delovanja 'hrupometer'.

Vrednosti se izpisujejo tudi preko virtualnega zaporednega vmesnika. Nivo zvočnega tlaka z A frekvenčno utežitvijo je predstavljen z večbarvno LED diodo z barvnim prikazom v območju od 35 dBA (modra) do 85 dBA (rdeča). L kanal avdio signala preko

USB vmesnika (kot zvočna kartica) vsebuje vzorčen signal izbranega mikrofona z A frekvenčno utežitvijo, D kanal avdio signala pa vzorčen signal iz izbranega mikrofona brez frekvenčne utežitve. Tako je mogoče na računalniku opazovati spektra signalov s primernim programom, npr. REW [26]. Izraz 'hrupometer' je uporabljen namenoma, saj merilni sistem ne izpolnjuje zahtev standarda za merilnike zvoka oz. fonometre IEC 61672-1 [27] in ostalih standardov.

4.2 Vaja 2 – Zvočna kartica

Vmesnik prevzame funkcijo zvočne kartice, predvajanemu posnetku se lahko nastavlja amplitudo s potenciometrom na avdio vmesniku. Nastavitve se lahko uporabi za merjenje impedance slušalk in zvočnikov s pomočjo programa REW [28]. Primer meritve je na sliki 5. Slušalke ali zvočnik se priključi s pomočjo priloženega kabla s konektorji. Ker avdio vmesnik ne uporablja nizkoimpedančnega izhoda in visokoimpedančnega vhoda in zaradi presluha se pojavi napaka meritve pri nizkih frekvencah (pod 50 Hz).



Slika 5. Primeri izmerjenih impedanc slušalk CX100 - Sennheiser (sredina), 4 Ω zvočnika (spodaj) in slušalk SoundSport - Bose (zgoraj).

4.3 Vaja 3 – Filtriranje

Pri tej nastavitvi se uporablja filtre iz avdio knjižnice [29], katerim se lahko nastavlja vrsto filtra, mejno frekvenco, kvaliteto filtra in vir avdio signala. Kot vir signala se lahko uporabi osebni računalnik, avdio posnetek iz μ SD kartice, MEMS ali elektret mikrofonski. S programom REW se lahko opazuje spekter filtriranega signala, testni signal (npr. psevdonaključni beli šum) se generira s programom REW.

4.4 Vaja 4 – WAV predvajalnik



Slika 6. Avdio vmesnik z vibratornim pretvornikom.

WAV predvajalnik predvaja datoteko z imenom 01.wav shranjeno na μ SD kartici. Če kartica ni prisotna, javi napako. Amplituda predvajanja posnetka je višja, kot pri ostalih nastavitvah, tako da se lahko uporabi tudi vibratorni avdio pretvornik, slika 6, s katerim se lahko preveri prevajanje zvoka preko kosti (pretvornik se prisloni na mastoid) ali pa se uporabi

primerno površino kot zvočnik. Odziv pri nizkih frekvencah se lahko izboljša z obtežitvijo vibratornega pretvornika.

4.5 Vaja 5 – Simetrična priključitev signalov

MEMS mikrofoni [23] je analogni mikrofoni s simetričnim (diferencialnim) izhodom. S simetrično priključitvijo se lahko zmanjša motnje, ki se pojavijo na povezovalnih kabljih. Izbira se lahko med tremi priključitvami mikrofona: simetrična, kjer se uporabi oba izhoda mikrofona, izhodni signal je razlika obeh signalov; pri nesimetrični priključitvi pa le + izhod mikrofona ali le – izhod. Glede na izbiro se avtomatsko prilagodi ojačanje. Pri nesimetrični priključitvi lahko opazimo boljše razmerje signal/šum. Zaradi kratkega priključnega kabla je razlika v amplitudi motenj zanemarljiva. Avdio signal iz mikrofona je na voljo na D avdio kanalu preko USB vmesnika (zunanja zvočna kartica). Mikrofoni so občutljivi na svetlobo.

4.6 Vaja 6 – Izhod AC

Pri tej nastavitvi procesor in avdio vmesnik generira izmenični (AC) električni signal nizke amplitude pri frekvenci 1 kHz na L kanalu priključka za slušalke (do 10 mVrms). Amplitudo izhodne napetosti se nastavlja s potenciometrom. Če je občutljivost slušalk znana, se lahko nastavi znan nivo zvočnega tlaka. Izhodna impedanca ojačevalnika za slušalke na avdio vmesniku je nizka ($< 1 \Omega$), tako da se sprememba napetosti zaradi obremenitve s slušalkami lahko zanemari.

5 Zaključek

V prispevku je opisana strojna in programska oprema za laboratorijske vaje, ki se lahko izvajajo doma. Strojna oprema temelji na Teensy procesorski ploščici in avdio vmesniku. Z dodatnimi perifernimi enotami (potenciometer, tipke, prikazovalnik) in elektroakustično opremo (kostni vibratorni vmesnik, konektorji, mikrofoni, ...) omogoča prikaz elektroakustičnih pojavov z in tudi brez uporabe osebnega računalnika.

Študenti so prejeli opremo po pošti na dom. Odziv je bil pozitiven, koncept pa označen kot 'poučen'. Obstoječe vaje se lahko nadgradi z novimi z dodatno programsko in strojno opremo.

Literatura

- [1] Beguš, Samo. Moderni pristopi k poučevanju akustike in ultrazvoka. *Elektrotehniški vestnik*. 2013, letn. 80, št. 1/2, str. 27-33. <https://ev.fe.uni-lj.si/1-2-2013/Begus.pdf>
- [2] Stawczyk, Paweł and Wilk-Jakubowski, Jacek. "Non-invasive attempts to extinguish flames with the use of high-power acoustic extinguisher" *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, 2021, pp. 349-355. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0037>
- [3] Ali E Aliev, Nathanael K Mayo, Ray H Baughman, Brent T Mills and Ed Habtour Subwoofer and nanotube butterfly acoustic flame extinction, *Journal of Physics D:*

Applied Physics, Volume 50, Number 29, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa78e5>

- [4] Beguš, Samo. *Avdiologija in elektroakustika: gradivo za laboratorijske vaje*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za metrologijo in kakovost, 2014.
- [5] Beguš, Samo. *Akustika in ultrazvok: gradivo za laboratorijske vaje*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za metrologijo in kakovost, 2015.
- [6] Beguš, Samo. *Slušni in govorni trening ter elektroakustični pripomočki, akustično merjenje in avdiometriiranje: gradivo za laboratorijske vaje*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za metrologijo in kakovost, 2019.
- [7] Odlok Vlade RS (Ur. l. RS, št. 146/2020) z dne 18. 10. 2020 o razglasu epidemije v RS in dopolnitev ukrepov Vlade RS z 22. 10. 2020.
- [8] <https://www.uradni-list.si/pdf/2021/Ur/u2021047.pdf>
- [9] Video posnetki izvedbe laboratorijskih vaj pri predmetu 'Akustika in ultrazvok', dostopni v spletni učilnici predmeta.
- [10] Video posnetki izvedbe laboratorijskih vaj pri predmetu 'Avdiologija in elektroakustika', dostopni v spletni učilnici predmeta.
- [11] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-boards.html>
- [12] <https://www.mikroe.com/smart-displays>
- [13] <https://www.embeddedartists.com/>
- [14] <https://www.pjrc.com/teensy/>
- [15] <https://www.olimex.com/Products/ARM/>
- [16] <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>
- [17] https://www.pjrc.com/store/teensy3_audio.html
- [18] <https://www.pjrc.com/teensy/teensyduino.html>
- [19] <https://www.arduino.cc/en/software>
- [20] <https://www.pjrc.com/teensy/gui/index.html>
- [21] <https://nodered.org/>
- [22] Bone Conductor Transducer with Wires - 8 Ohm 1 Watt <https://www.adafruit.com/product/1674>
- [23] InvenSense ICS-40619 <https://invensense.tdk.com/products/ics-40619/>
- [24] <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005512/boards-and-kits/desktop-boards.html>
- [25] Navodila za uporabo TeensyAudio ploščice, na voljo v spletni učilnici predmetov 'Akustika in ultrazvok', 'Avdiologija in elektroakustika' in 'Navidezna in obogatena resničnost'.
- [26] Room Acoustics Software, <http://www.roomeqwizard.com/>
- [27] IEC 61672-1:2013 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications <https://webstore.iec.ch/publication/5708>
- [28] https://www.roomeqwizard.com/help/help_en_GB/html/impedancemeasurement.html
- [29] <https://www.pjrc.com/teensy/gui/index.html?info=AudioFilterBiquad>