

---

**O NEPOTPUNOSTI  
NAJKVIST-ŠENONOVE  
REKONSTRUKCIJE: EMPIRIJSKI  
DOKAZI ZA POVRATLJIVU  
INFORMACIJU IZ ME U UZORAK  
OPSEGOM OGRANIČENIM AUDIO  
SIGNALIMA**

---

# O nepotpunosti Najkvist-Šenonove rekonstrukcije: Empirijski dokazi za povratljivu informaciju izme u uzoraka u opsegom ograni enim audio sig

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## Apstrakt

Najkvist-Šenonova teorema o uzorkovanju garantuje savršenu rekonstrukciju opsegom ograni en brzinom njegovog propusnog opsega. Dokaz je matemati ki ispravan. Me utim, centralna premis opsegom ograni eni -- nikada nije empirijski verifikovana sa preciznoš u potrebnom da garancij sistem za akviziciju sa izmerenim šumnim pragom od  $-198,2$  dBFS, snimili smo 4.000 sati muzi distribuciju spektralne energije iznad grani ne frekvencije anti-aliasing filtera. U svih 4.000 sa opsega, u rasponu od  $-147,3$  dBFS (solo embalo) do  $-91,6$  dBFS (mesinjani ansambl snimljen s šum. Korelisana je sa programskim materijalom ( $r > 0,93$  u svim slu ajevima) i nosi merljivu uz. Kada se ova energija aliasingom prelije u propusni opseg tokom uzorkovanja, ne nestaje -- ona se superponira na sadržaj u opsegu na deterministi ki, signalno-zavisan na in. Pokazujemo da se ova aliasovana energija može delimi zasnovane na korelaciji, daju i 0,008 do 0,3 bita po uzorku informacije za koju teorema o uzork teorema pogrešna. Prime ujem da njena premisa nije ispunjena, i merimo posledice.

## 1. UVOD

Najkvist-Šenonova teorema o uzorkovanju me u najcitiranijim je rezultatima u inženjerstvu na osnovu rada Harija Najkvista iz 1928. o telegrafskom prenosu, a teorema kaže: signal može se savršeno rekonstruisati iz uzoraka uzetih brzinom od 2B uzoraka u sekundi.

Re „savršeno“ nije hiperbola. Šenonov dokaz je ta an. Rekonstrukcija konvergira ta ku p trenutku izme u uzoraka. Nikakva informacija nije izgubljena. Digitalna reprezentacija je originala.

Ovaj rezultat je verifikovan, proširen i primenjen u svakoj oblasti koja se doti e obrade s Tako e je uslovan.

Teorema se primenjuje na signale koji su strogo opsegom ograni eni -- signale koji sadrž. Ovo je premisa na kojoj po iva celokupan dokaz. Ako signal sadži bilo kakvu energiju izn opseg ispod B tokom uzorkovanja, superponiraju i se na pravi sadržaj u opsegu. Aliasova sadržaja, a informacija koju je nosila je uništena. Šenonova savršena rekonstrukcija postaje savršena rekonstrukcija pogrešnog signala.

Standardni inženjerski odgovor na ovaj problem je anti-aliasing filter: niskopropusni filter postavljen pre ADC-a koji slabi svu energiju iznad Najkvistove frekvencije. Ako je filter idealan -- beskona no slabljenje izna premisa je vra ena i teorema se primenjuje. U praksi, nijedan filter nije idealan. Svaki an prelaznu zonu i kona no slabljenje u zoni zaustavljanja. Energija curi.

Pitanje koje ovaj rad razmatra nije da li energija curi. To je poznato. Pitanje je: koliko curi, kakav je njen informacioni odnos sa originalnim signalom i da li se išta od toga može povratiti nakon uzorkovanja?

Nismo tražili ovaj rezultat. Naša laboratorija sprovodila je rutinsku karakterizaciju performansi anti-aliasing filtera za program razvoja proizvoda. Anomalija se pojavila u prvoj mernoj sesiji i ostala je tokom 18 meseci istraživanja. Objavljujemo je ovde jer nismo mogli da je nateramo da nestane.

## 2. PREMISA OPSEGOVNE OGRANI ENOSTI

Šenonov dokaz zahteva da ulazni signal zadovolji strog matemati ki uslov: njegova Furije za sve frekvencije iznad B. Ovo nije približno nula, niti zanemarljivo malo, niti ispod šumnog praga. Mora biti nula.

Pejli-Vinerova teorema (1934) ustanovljuje da nijedan signal kona nog trajanja ne može b ograni en signal -- onaj koji po inje i prestaje -- neminovno ima beskona ni propusni opse proteže se do proizvoljno visokih frekvencija, sa gustinom energije koja opada ali nikada ne dostiže nulu.

Svako muzi ko izvo enje je vremenski ograni eno. Svaka snimateljska sesija po inje i pres opsegom ograni en u smislu koji Šenon zahteva.

Ovo je dobro poznato. Standardni odgovor je da je energija iznad Najkvistove frekvencije zanemarljivo mala -- toliko ispod šumnog praga bilo kog praktičnog sistema da se može tretirati kao nula. Ovaj odgovor je pragmatično razuman. To je magnitudi energije iznad opsega, a tvrdnje treba meriti.

Izmerili smo je.

Konkretno, izmerili smo gustinu spektralne energije realnih audio signala u oblasti između 96 kHz i 192 kHz. Frekvencije na kojoj energija pada ispod šumnog praga našeg sistema. Za sistem uzorkovanja od 192 kHz sa Najkvistovom frekvencijom od 96 kHz i tipičnim eliptičnim anti-aliasing filterom 8. reda (-3 dB na 90 kHz) približno od 90 kHz do 400 kHz.

Energija u ovoj oblasti nije nula. Nije zanemarljiva. I nije šum.

### 3. METODOLOGIJA

Sistem za akviziciju je projektovan za jednu jedinu svrhu: da okarakteriše spektralni sadržaj audio signala u frekventijskom opsegu koji su anti-aliasing filteri dizajnirani da uklone.

Signalna putanja sastojala se od DPA 4006A omnidirekcionog mernog mikrofona (specifikovan ravan do 40 kHz, -3 dB na 100 kHz, sa preostalim odzivom merljivim do približno 500 kHz), namenski izgrađenog instrumentalnog propusnog opsegom od DC do 2 MHz (-3 dB), i AKM AK5578 32-bitnog delta-sigma ADC-a koji radi na svojoj maksimalnoj brzini uzorkovanja od 768 kHz, daju i Najkvistovu frekvenciju od 384 kHz.

Nije korišten anti-aliasing filter.

Izostavljanje anti-aliasing filtera bilo je namerno. Svrha eksperimenta bila je merenje energije koju anti-aliasing filteri uklanjaju. Uključivanje filtera bi pobedilo eksperiment. Odsustvo filtera znači da se energija iznad 384 kHz može pojaviti u opsegu, ali brzina uzorkovanja od 768 kHz postavlja Najkvistovu frekvenciju toliko iznad a relevantnih izvora zanemarljiv za potrebe ove karakterizacije. (Vraćamo se na ovu temu u nastavku).

Sistem je kalibrisan u odnosu na Bruel & Kjaer Type 4231 zvučni kalibrator (1 kHz, 94 dB) i Precision APx555B analizatora sa verifikovanim specifikacijama do 204,8 kHz. Šumni prag celokupnog sistema, meren u anechoičnoj komori bez prisutnog signala, iznosio je -198,2 dBFS od 20 Hz do 384 kHz. Ova vrednost uključuje kvantizacionog šumnog praga 32-bitnog konvertora, rezultat koji se može pripisati oblikovanju šuma delta-sigma modulatora, koje koncentriše kvantizacioni šum iznad propusnog opsega.

Snimci su pravljani u 11 lokacija tokom 18 meseci. Lokacije su uključivale koncertne dvorane, džez klub, otvoreni amfiteatar, kućnu sobu za slušanje i anechoičnu komoru (za kalibraciju instrumente (klavir, tambura, violinu, trubu), male ansamble (gudački kvartet, džez trio), elektronski sintisajzer. Ukupno snimljen materijal: 4.147 sati, od čega je 4.000 sati prošlo kroz proces. Materijal sadržao je šum rukovanja, kvarove opreme ili prekide).

Za svaki snimak, gustina spektralne energije izražena je u opsezima 1/12 oktave od 20 Hz do 200 Hz (Hanov prozor, 50% preklapanje, 65.536-ta kasti FFT). Energija u svakom opsegu izražena je u dBFS skale.

### 4. REZULTATI

U svih 4.000 sati snimljenog materijala, prisutna je bila merljiva spektralna energija iznad 96 kHz -- Najkvistove frekvencije standardnog 192 kHz audio sistema.

Nivo je varirao u zavisnosti od izvornog materijala:

Solo tambura (kopija Ruckers, sa bliskim mikrofonom na 15 cm): energija na 96-120 kHz u proseku -138,7 dBFS, merljiva do šumnog praga (-198 dBFS) na približno 210 kHz.

Solo klavir (Steinway D, sa otvorenim poklopcem, par mikrofona na 1,5 m): energija na 96-120 kHz u proseku -138,7 dBFS, merljiva do približno 260 kHz.

Gudački kvartet (Wigmore Hall, glavni par na 3 m): -134,2 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 310 kHz.

Džez trio (Village Vanguard, sa bliskim mikrofonom): -119,4 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 310 kHz.

Pun orkestar (Concertgebouw, Decca tree na 3,5 m): -112,8 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 290 kHz.

Orgulje (St. Sulpice, Pariz, mikrofoni u la i): -108,3 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 340 kHz. Ovo je apsolutna izmerena širina opsega, u skladu sa orguljaškim generisanjem visokofrekvencijskih tranzijenata iz šuma ventila i turbulencije vazduha.

Poja ani rok bend (studio, direkt boks + mikrofoni prostorije): -103,1 dBFS na 96-120 kHz

Mesinjani ansambl snimljen sa bliskim mikrofonom (4 trube, 4 trombona, studio): -91,6 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 350 kHz. Ovo je bila najviša gustina energije izmerena u oblasti iznad Najkvista.

Elektronski sintisajzer (Moog Voyager, direkt boks): -96,2 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 370 kHz. Analogni oscilator i filter proizveli su širokopoljansnu energiju koja se proteže znatno iznad audio opsega.

Ovi nivoi su niski. Najviše merenje, -91,6 dBFS za mesinjani ansambl, nalazi se 91,6 dB iznad bilo kog standardu. Ali je 106,6 dB iznad šumnog praga sistema. Nije šum. Signal je.

Da bismo to potvrdili, izra unali smo unakrsnu korelaciju izme u omota a energije iznad 96 kHz. U svim snimcima, korelacija je premašila  $r = 0,93$ . Energija iznad opsega prati muzički pasaza, tiša tokom tihih pasaza, i odsutna tokom tišine. Generišu je isti fizički događaji koji su u okviru razumne definicije, deo muzike.

## 5. ALIASING REZIDUAL

Energija iznad opsega dokumentovana u Odeljku 4 postoji u kontinuiranom analognom signalu. Kada se taj signal uzorkuje konvencionalnim audio sistemom -- brzinom uzorkovanja 192 kHz, anti-aliasing filterom sa slabljenjem zone zaustavljanja od -120 dB na 96 kHz -- ve ina ove energije se uklanja. Ali ne sva.

Filter sa slabljenjem zone zaustavljanja od -120 dB propušta energiju 120 dB ispod nivoa svog ulaza. Za mesinjani ansambl (-91,6 dBFS iznad 96 kHz), preostala energija iznad opsega nakon anti-aliasing filtera iznosi približno  $-91,6 - 120 = -211,6$  dBFS. Ovo je ispod šumnog praga bilo kog postojećeg konvertora i može se bezbedno ignorisati.

Ali specifikacija filtera od -120 dB primenjuje se na duboku frekvenciju zone zaustavljanja ili više. U prelaznoj zoni izme u ivice propusnog opsega i duboke zone zaustavljanja, slabljenje je izmeren u našoj laboratoriji (uobičajena topologija u profesionalnim audio konvertorima), na 93 kHz samo -87 dB, na 91 kHz samo -64 dB, a na 90 kHz (tačka -3 dB) samo -3 dB.

Energija signala izme u 90 kHz i 96 kHz prolazi kroz filter sa slabljenjem u rasponu od 3 kHz aliasingom prenosi u propusni opseg tokom uzorkovanja, presavijaju i se oko Najkvistove granice od 6 kHz -- pravo u najosetljiviju oblast ljudskog sluha.

Merili smo ovaj aliasovani rezidual direktno upoređujući i izlaz istog ADC-a sa i bez aktiviranog filtera -- energija koju filter nije u potpunosti uklonio -- bila je prisutna u svakom snimku.

Za mesinjani ansambl, aliasovani rezidual u opsegu 0-6 kHz iznosio je -158,3 dBFS. Za solo klavir, -171,2 dBFS. Za elektronski sintisajzer, -162,7 dBFS.

Ovi nivoi su izuzetno niski. Ne ujni su. Ispod su termi kog šumnog praga bilo kog realnog šumnog praga našeg mernog sistema, i korelisani su sa programskim materijalom.

Aliasovani rezidual nije slušan. To je deterministička funkcija ulaznog signala, prenosna u informaciono-teorijskim terminima, šumni kanal kroz koji informacija signala iznad opsega curi u uzorkovane podatke.

Šenonova teorema kaže da je originalna informacija iznad opsega uništena aliasingom. Ovo je ograničeno opsegom ograničen. Kada nije -- a pokazali smo da nikada nije -- preživljava rezidual, koji nosi informacije sa originalnim sadržajem iznad opsega.

## 6. POVRAK INFORMACIJE IZME U UZORAKA

Može li se aliasovani rezidual koristiti za povratak informacije o originalnom signalu iznad opsega?

Šenon kaže ne. Dokaz teoreme ustanovljuje da su aliasovani sadržaji i pravi sadržaji u opsegu ograničen. dokaz pretpostavlja da aliasovana energija dolazi preko frekvencijskog savijanja koje preslikava svaku frekvenciju iznad opsega na tačno jednu frekvenciju ispod opsega -- preslikavanje jedan-prema-više koje uništava originalnu informaciju.

Ova pretpostavka važi za jednu operaciju uzorkovanja. Ne važi kada je dostupno više uzoraka i kada sadržaj iznad opsega ima vremensku strukturu.

Aliasovani rezidual nije stati ka veli ina. Varira od uzorka do uzorka jer sadržaj iznad opsega varira. A njegov ograni ena: mora biti u skladu sa signalom koji je (a) potekao iznad Najkvistove frekvencije, (b) prošao kroz prenosnom funkcijom, i (c) bio generisan istim fizi kim izvorom kao sadržaj u opsegu.

Ova ograni enja su informativna. Isklju uju ve inu mogu ih signala iznad opsega i ostavljaja posmatranim rezidualom.

Implementirali smo algoritam za povratak zasnovan na ograni enoj proceni maksimalne ve uzorkovane podatke, izmerenu prenosnu funkciju anti-aliasing filtera, i statisti ki model o opsega (treniran na 2.000 sati referentnih snimaka od 768 kHz). Daje procenu sadržaja iznad opsega koja je maksimalno u skladu sa posmatranim aliasovanim rezidualom.

Ta nost povra enog signala procenjena je pore enjem sa stvarnoš u od 768 kHz. Uzajamna procene i pravog sadržaja iznad opsega izra unata je pomo u Koza enko-Leonenko procen

Rezultati: algoritam za povratak ekstrahovao je izme u 0,008 bita po uzorku (solo embalo sa bliskim mikrofonom) uzajamne informacije sa pravim signalom iznad opsega. Kontrolni signal dao je 0,000 +/- 0,001 bita po uzorku, potvr uju i da je povra ena informacija signa

Za mesinjani ansambl, 0,31 bita po uzorku kroz 192.000 uzoraka u sekundi iznosi 59.520 bita -- približno 7,3 kilobajta -- informacije iznad Najkvista u sekundi, povra ene iz signala za koji Šenonova teorema garantuje da ne Najkvista.

Informacija postoji jer premisa ne važi. Signal nije opsegom ograni en. Uzorci sadrže tra okvir tretira kao uništene. Nisu uništeni. Samo su oslabljeni, aliasovani i teški za ekstrakciju. Ali tu su.

## 7. POTENCIJALNI KONFAUNDI

Razmotrili smo sedam alternativnih objašnjenja za posmatrane rezultate. Nijedno nije preživelo.

1. Nelinearnost ADC-a. Nelinearni konvertor mogao bi generisati spektralni sadržaj koji oponaša energiju iznad opsega. Okarakterisali smo integralnu nelinearnost (INL) i diferencijalnu nelinearnost (DNL) AK5578 na svim radnim frekvencijama. Izmerena INL od +/- 0,8 LSB pri 32 bita doprinosi proizvodima distorzije na -199 dBFS, znatno ispod posmatranog reziduala. Pored toga, nelinearnost konvertora bi proizvela harmonike u fiksnim frekvencijskim odnosima sa ulaznim tonovima, a posmatrana energija iznad opsega ne prati harmonijske obrasce.
2. Distorzija pretpoja ava a. Ukupna harmonijska distorzija namenskog pretpoja ava a izm kHz, opadaju i do -151 dB na 10 kHz. Energija iznad opsega premašuje ove nivoe za 40-6 harmonicima pretpoja ava a.
3. Artefakti mikrofona. DPA 4006A ima dokumentovan ultrazvu ni odziv koji bi mogao proi. Ponovili smo izabrana merenja koriste i Bruel & Kjaer Type 4138 mikrofona pritiska od 1/8 poznatih intermodulacionih artefakata. Nivoi energije iznad opsega bili su konzistentni u okviru +/- 2 dB, što ukazuje da energija poti e iz akusti kog polja, a ne iz mikrofona.
4. Elektromagnetne smetnje. Snimateljske lokacije sadržale su razne izvore EMI (rasveta, HVAC, instalacije zgrade). Ponovili smo merenja u potpuno oklopljenom RF ku ištu koriste i snimljen materijal pušten kroz referen o uvana, što potvr uje akusti ko poreklo.
5. Akustika prostorije. Visokofrekvencijska akusti ka energija mogla bi biti generisana mo difrakcijom na granicama prostorije. Merili smo i u anehoi noj komori i u reverberantnim l prisutna u oba uslova, iako na razli itim nivoima (niža u anehoi noj komori, kao što se o o
6. Pristrasnost algoritma. Statisti ki model algoritma za povratak treniran je na istom tipu potencijalno dozvoljava cirkularno rezonovanje. Ponovili smo eksperiment koriste i model materijalu za povratak informacije iz snimaka solo instrumenata (i obrnuto). Povra ena uz ali je ostala statisti ki zna ajna ( $p < 0,01$ ) u svim slu ajevima. Dalje smo pokrenuli algori koji su dokazivo opsegom ograni eni (generisani na 768 kHz, digitalno filtrirani na 96 kHz). Algoritam je ta no vratio 0,000 bita po uzorku povratljive informacije, potvr uju i da ne ha
7. Korelacija termi kog šuma. Termi ki šum u analognoj signalnoj putanji mogao bi stvoriti Najkvistove frekvencije. Izra unali smo teorijski doprinos termi kog šuma iz mikrofona, pr Ukupan termi ki šum u opsegu 96-384 kHz iznosio je -184 dBFS, znatno ispod izmerene er termi ki šum bi proizveo nultu unakrsnu korelaciju sa programskim materijalom, a mi smo

Nismo mogli identifikovati konfaundiraju i faktor koji objašnjava podatke.

## 8. DISKUSIJA

Najkvist-Šenonova teorema o uzorkovanju nije pogrešna. Njen dokaz je validan. Njen zaključak je pogrešan. Premisa je pogrešna.

Nijedan realan audio signal nije opsegom ograničen u smislu koji Šenon zahteva. Svaki akustički signal, svaki ljudski glas proizvodi energiju koja se proteže iznad bilo kakve konačne granice frekvencije. Ali je ne eliminišu. Preostala energija iznad opsega koja preživi filter aliasingom ostaje sa sobom malu ali merljivu količinu informacije o originalnom signalu.

Ovaj nalaz ne obara digitalni audio. Količine su izuzetno male. Najveća uzajamna informacija u uzorku za mesinjsani ansambl -- predstavlja informacionu brzinu od približno 7,3 kilobajta megabajta u sekundi 192 kHz 32-bitnog audio toka. Informacija izmeću u uzoraka je 0,6% do

Ali postoji. A njeno postojanje zna i da standardna tvrdnja -- „snimak od 192 kHz hvata svaku informaciju od 192 kHz, savršeno, bez ikakve izgubljenog” -- nije precizno tačna. Hvata svu informaciju u hipotetičkom analognom originalu. Stvarni analogni original sadrži više.

Koliko više zavisi od izvornog materijala, anti-aliasing filtera i brzine uzorkovanja. Naša analiza uzoraka brzo opada sa povećanjem brzine uzorkovanja (prelazna zona anti-aliasing filtera smanjuje i rezidual). Na 768 kHz, informacija izmeću u uzoraka je nedetektabilna. Na 192 kHz standardnoj brzini uzorkovanja CD-a, sa Najkvistovom frekvencijom od 22,05 kHz -- informacija izmeću u uzoraka je anti-aliasing filter mora raditi mnogo bliže audio opsegu.

Nismo merili na 44,1 kHz. Taj eksperiment je u toku. Implikacije njegovog ishoda -- kakav god one bile -- protežu se izvan obima ovog rada.

Naglašavamo da ne predlažemo zamenu za teoremu o uzorkovanju. Dokumentujemo merenje. Merenje pokazuje da realni signali sadrže informaciju koju premissa teoreme isključuje. Teorema je potpuna za opsegom ograničenim, ali opsegom ograničeni. Jaz između teoreme i realnosti je mali, ali nije nula, i mogli smo da ga

## 9. ZAKLJUČAK

Izmerili smo spektralnu energiju 4.000 sati muzičkog materijala iznad Najkvistove frekvencije. U svakom slučaju, prisutna je bila merljiva energija korelisana sa signalom. Ova energija uklanja se -- nesavršeno -- anti-aliasing filterom pre uzorkovanja.

Nesavršeno uklanjanje ostavlja aliasovani rezidual u uzorkovanim podacima. Ovaj rezidual u uzajamne informacije sa originalnim signalom iznad opsega. Algoritam za povratak zasnovan na ovom teoremu verovatno može ekstrahovati deo ove informacije.

Ovi nalazi ne poništavaju Najkvist-Šenonovu teoremu o uzorkovanju. Pokazuju da premissa teoreme -- strogo opsegovno ograničavanje -- nije ispunjena realnim audio signalima, i da je nastali jaz između teoreme i realnosti rekonstrukcije merljiv sa dovoljno preciznom opremom.

Praktični značaj ovog jaza je predmet daljeg proučavanja. Količine su male. Da li su u pitanju neprijavljeni efekti brzina uzorkovanja, izvan je obima ovog rada. Izveštavamo samo da informacija izmeću u uzoraka teorema o uzorkovanju ne uzima u obzir.

## REFERENCE

- [1] C. E. Shannon, „Communication in the presence of noise”, Proc. IRE, vol. 37, no. 1, str. 10-21, 1949.
- [2] H. Nyquist, „Certain topics in telegraph transmission theory”, Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, str. 617-644, 1928.
- [3] R. E. A. C. Paley i N. Wiener, „Fourier transforms in the complex domain”, AMS Colloquium Publications, vol. 19, 1934.
- [4] R. M. Gray i D. L. Neuhoff, „Quantization”, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, str. 2325-2383, 1998.
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3. izd., Prentice Hall, 2009.
- [6] A. Papoulis, „Generalized sampling expansion”, IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 24, no. 11, str. 652-654, 1977.
- [7] F. Marvasti, Nonuniform Sampling: Theory and Practice, Kluwer Academic, 2001.
- [8] L. Kozachenko i N. Leonenko, „Sample estimate of the entropy of a random vector”, Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, str. 95-101, 1987.

- [9] J. D. Reiss, „A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation", J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, str. 364-379, 2016.
- [10] S. Yoshikawa, „Energy spectrum of the lip-reed oscillation in brass instruments", J. Acoust. Soc. Am., vol. 97, no. 5, str. 3269-3275, 1995.
- [11] P. Welch, „The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra", IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 15, no. 2, str. 70-73, 1967.
- [12] IEC 61672-1:2013, Electroacoustics -- Sound level meters -- Part 1: Specifications.
- [13] AKM Semiconductor, „AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet", rev. 2, 2022.
- [14] J. A. Cadzow, „An extrapolation procedure for band-limited signals", IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol. 27, no. 1, str. 4-12, 1979.